

González Ramón, A. *et al.*, 2009. La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de poblaciones. Experiencias en la provincia de Jaén. *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 289-304
ISSN: 0366-0176

La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de poblaciones. Experiencias en la provincia de Jaén

A. González-Ramón⁽¹⁾, C. Martín-Montañés⁽²⁾, J. Gollonet⁽³⁾, S. Martos-Rosillo⁽⁴⁾ y J.C. Rubio-Campos⁽⁵⁾

(1) Oficina de Proyectos del IGME en Granada. Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo. 18006 Granada. Tlf 958 183143/46
antonio.gonzalez@igme.es

(2) Oficina de Proyectos del IGME en Granada. Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo. 18006 Granada. Tlf 958 183143/46
c.martin@igme.es

(3) c/. Ronda de los Montes, edif Torre 10° D. Urb. Parque del Cubillas, 18220 Albolote (Granada).
gollonet@teleline.es

(4) Subdelegación de Gobierno. Pza. de España - Torre Norte. 41013 - Sevilla. Teléfonos - 954 236 611 - 954 236 677
s.martos@igme.es

(5) Oficina de Proyectos del IGME en Granada. Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo. 18006 Granada. Tlf 958 183143/46
jc.rubio@igme.es

RESUMEN

Desde hace varias décadas, el Instituto Geológico y Minero de España trabaja en la provincia de Jaén, en colaboración con otros organismos de la administración, para la resolución de problemas en el abastecimiento a los núcleos de población que utilizan agua subterránea. En el marco de estos trabajos se han realizado a lo largo de los años diversas experiencias, que plantean la inclusión de la recarga artificial en los esquemas de abastecimiento en diversos núcleos. Se describen en este artículo los resultados de las experiencias realizadas en un pequeño acuífero Mioceno, utilizado para abastecimiento a Mancha Real, en el acuífero kárstico Gracia-Morenita, que apoya el abastecimiento a la Comarca de Martos, y en el acuífero calcarenítico de los Llanos, del que se abastece la población de Alcalá la Real. Pese a que las tres experiencias resultaron positivas y demostraron su viabilidad, no ha sido posible hasta la fecha, por diferentes causas, construir ninguna instalación permanente que aproveche la capacidad de almacenamiento de los acuíferos usando la recarga artificial.

Palabras clave: acuíferos prebéticos, acuíferos subbéticos, provincia de Jaén, recarga artificial, sondeos de inyección

The artificial recharge as supply support town. Experiences in the province of Jaén

ABSTRACT

Since several decades, the Geological Survey of Spain works in the province of Jaén, with other institutions, for the resolution in urban supply. Among these works, the artificial recharge has been raised as a possible solution to problems in the urban supply. This paper describes the outcome of the experiences in the Miocene aquifer use for Mancha Real; in the Gracia-Morenita karstic aquifer for supply at "Comarca de Martos", and the Llanos grainstone aquifer use for Alcalá la Real. The three experiences were positive and demonstrated its utility, but nowadays there is no permanent installation in province of Jaén.

Key words: artificial recharge, injection well, prebetic aquifers, province of Jaén, subbetic aquifers

Introducción

El sur de la provincia de Jaén se caracteriza por la presencia de un gran número de acuíferos de mediana y pequeña dimensión y estructura compleja. Estos acuíferos han sido y son claves para el abastecimiento a los núcleos de población de la zona (González-Ramón *et al.*, 2002c). En algunos casos, los bombeos continuados para satisfacer las demandas de abastecimiento han ocasionado problemas puntuales en ellos, especialmente en los que presentan actualmente menores volúmenes de recursos renovables.

También se han observado afecciones a manantiales emblemáticos, que han generado conflictos sociales (González-Ramón y Rubio-Campos, 2008).

En esta problemática se enmarcan las experiencias sobre recarga artificial llevadas a cabo en la provincia de Jaén desde la oficina de proyectos del IGME en Granada. Con este artículo se pretenden describir estas experiencias y valorar las posibilidades de aplicación efectiva de la recarga artificial en instalaciones permanentes. Los acuíferos en los que se han realizado experiencias son los siguientes: Mancha Real-Pegalajar, en un sector relacionado con el abasteci-

González Ramón, A. *et al.*, 2009. La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 289-304

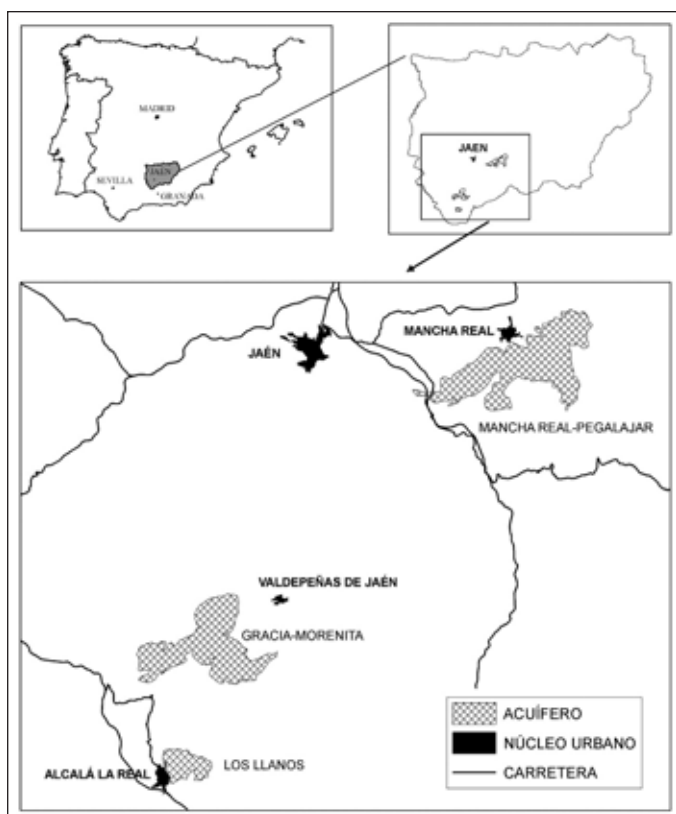


Figura 1. Localización geográfica de los acuíferos en los que se han realizado experiencias de recarga artificial
Figure 1. Location of aquifers in which MAR experiences have been done

miento de Mancha Real (unos 9.300 habitantes) (Rubio-Campos *et al.*, 1995, 2002, 2003; Gollonet *et al.*, 2002; González-Ramón, 2008); Gracia-Morenita, utilizado como apoyo al abastecimiento de la Comarca de Martos (más de 53.000 habitantes) (González-Ramón, 2001; González-Ramón *et al.*, 2002b, 2005); y Acuífero de los Llanos, explotado para el abastecimiento de Alcalá la Real (más de 19.000 habitantes) (Gollonet *et al.*, 2002; González-Ramón *et al.*, 2002a).

Experiencias de recarga artificial en Mancha Real

Al sur de Mancha Real se localiza un acuífero kárstico, constituido por carbonatos prebéticos del cretácico (figura 2). Tiene una extensión de afloramientos permeables de 27,4 km² y sostiene el abastecimiento de los tres municipios situados en su entorno, Mancha Real, Pegalajar y La Guardia (González-Ramón, 2008). El municipio de Mancha Real utiliza actualmente para su abastecimiento un volumen de agua de 1,2 hm³ anuales, del orden del 70 % del total bombeado en el acuífero.

La Masa de Agua Subterránea en la que se incluye el acuífero tiene declaración de sobreexplotación (CHG, 2007), motivada por la afección que las explotaciones de agua subterránea para abastecimiento

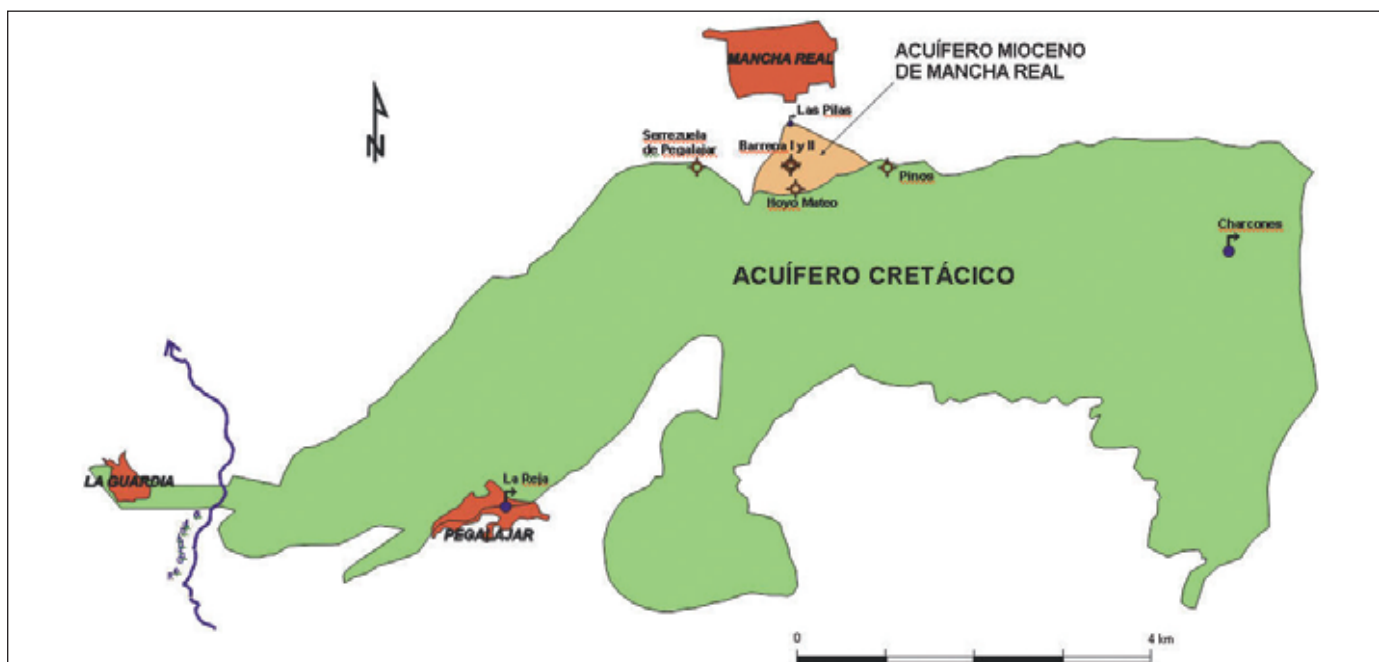


Figura 2. Esquema de acuíferos y puntos de agua relacionados con las operaciones de recarga
Figure 2. Scheme of aquifers and water points related to artificial recharge projects

González Ramón, A. *et al.*, 2009. La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 289-304

produjeron al manantial de la Reja, situado en el casco urbano del núcleo de Pegalajar.

Adosado al acuífero cretácico, en su borde norte, existe otro pequeño acuífero formado por carbonatos y calcarenitas miocenas y materiales detríticos plio-cuaternarios, que ha sido denominado acuífero Mioceno de Mancha Real (González-Ramón *et al.*, 2002c). Tiene una extensión del orden de 1 km² y fue donde se ubicó el primer sondeo empleado para abastecimiento a Mancha Real. Este sondeo, denominado Barrena I, fue construido por el antiguo Instituto Nacional de Colonización (INC). Comenzó a explotarse en 1958, aunque fue durante los años 70 y 80 del pasado siglo cuando se utilizó con mayor intensidad. A mediados de los años 80 el nivel piezométrico en este acuífero había registrado un descenso de más de 137 m, y sus reservas estaban prácticamente agotadas (González-Ramón, 2008). Su explotación continuó con bombeos medios muy moderados (5 L/s) hasta el año 1996 en que se abandonó por completo.

El núcleo de Mancha Real, también utiliza históricamente para su abastecimiento un manantial de la zona (manantial de los Charcones), del que dispone de una concesión limitada, y que, debido a la irregu-

laridad de su caudal, tenía en los años noventa excedentes invernales. También existían excedentes invernales, en mayor cuantía, en un cauce situado a unos 10 km hacia el este, el río Torres.

Las experiencias de recarga artificial tuvieron como objetivo estudiar la capacidad de infiltración de la infraestructura de sondeos abandonada existente y el volumen de agua que el acuífero Mioceno de Mancha Real podría almacenar. El planteamiento era utilizar puntualmente los excedentes invernales del río Torres y del manantial de los Charcones como agua de recarga caso de construirse una instalación permanente. Para la inyección de agua en el acuífero se podía utilizar el antiguo sondeo abandonado de abastecimiento a Mancha Real (sondeo Barrena I).

Ensayos realizados

Los primeros ensayos se realizaron en mayo de 1991 y consistieron en dos cortas pruebas de inyección de 8 y 7 horas de duración con caudales que variaron entre 34 y 67 L/s. El intervalo entre ambas pruebas fue de 5 días (Rubio-Campos, *et al.*, 1995). La inyección se rea-

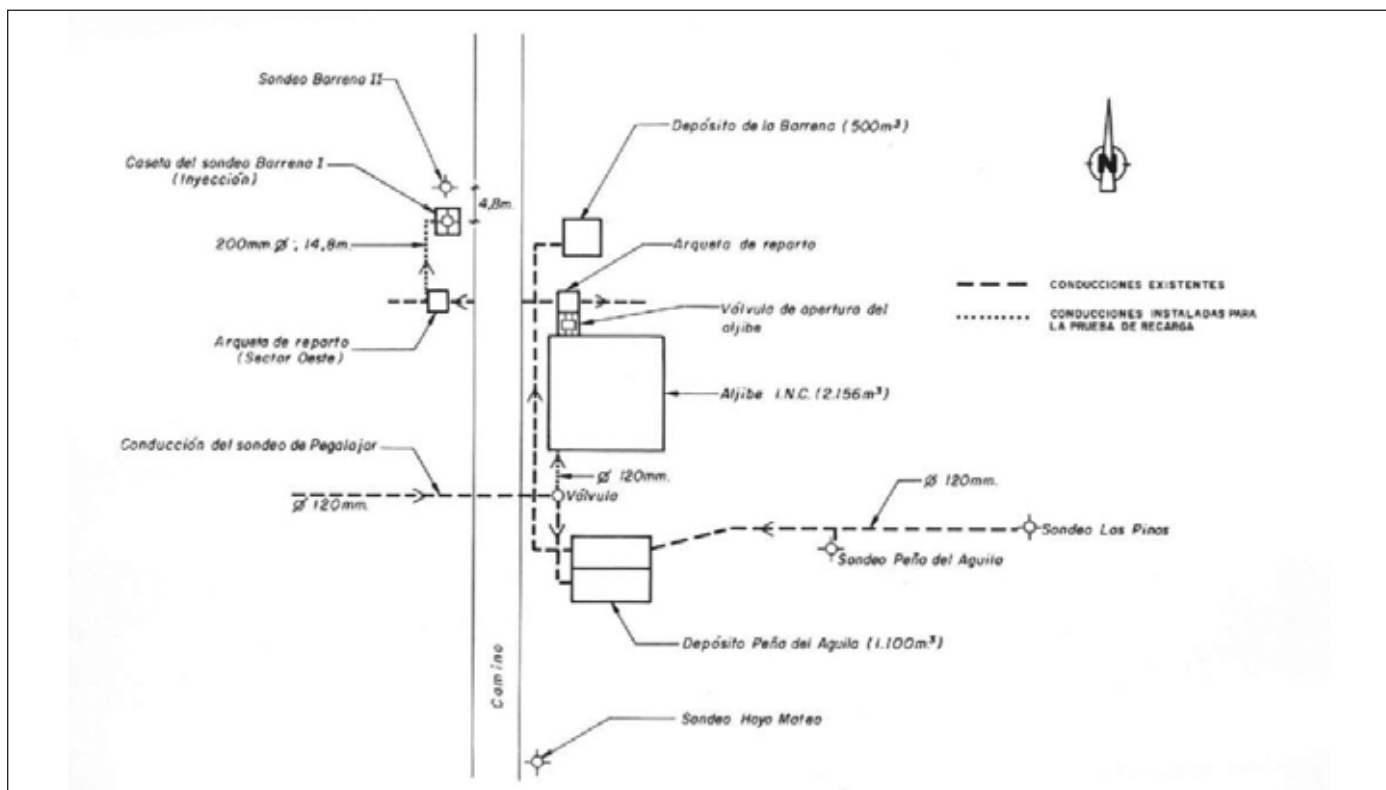


Figura 3. Esquema de infraestructura hidráulica utilizada para recarga artificial en el acuífero Mioceno de Mancha Real
Figure 3. Water intraestructure used for artificial recharge in mancha real Miocen aquifer

González Ramón, A. *et al.*, 2009. La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 289-304

lizó en el sondeo Barrena I y el control de niveles en el sondeo Barrena II situado a 4,8 m de distancia (figura 4). El agua utilizada para la prueba provenía de uno de los sondeos ubicados en el acuífero cretácico que sólo se bombeaba en estiaje, el volumen total recargado en estas pruebas fue algo inferior a 3500 m³.

En diciembre-enero de 1999 se realizó un nuevo ensayo de inyección. En esta ocasión, la recarga efectiva duró 29 días, con un volumen inyectado de 20.900 m³ (Gollonet *et al.*, 2002; Rubio-Campos *et al.*, 2003). La metodología de inyección y seguimiento fue la misma que en los ensayos anteriores, con la diferencia de que se utilizó también un sondeo situado a 220 m de distancia para el control de niveles, el sondeo Hoyo Mateo. En ambos piezómetros se instalaron data logger con sensores de presión. La procedencia del agua de recarga fue la misma que en la prueba anterior. Una diferencia importante con los ensayos de 1991 es que como se había abandonado la explotación del acuífero, este fue lentamente recargándose y en 1999 presentaba el nivel piezométrico 84 m por encima del nivel medido en 1991 (González-Ramón, 2008). Hay que indicar que la recarga del acuífero Mioceno de Mancha Real se produce de un modo más o menos lineal, sin que se aprecie una especial incidencia por cambios en el régimen de las precipitaciones. Esto es debido a que el acuífero se encuentra semiconfinado y con una compleja relación con el acuífero cretácico y los materiales detríticos superpuestos, de donde procede su alimentación. El volumen de agua recargada de forma natural se ha calculado en tan solo 0,15 hm³ anuales (González-Ramón, 2008).



Figura 4. Instalaciones de La Barrena, que fueron utilizadas para las operaciones de recarga
Figura 4. La Barrena devices

Resultados obtenidos

Los ensayos realizados en 1991 permitieron evaluar la gran capacidad de admisión de caudales del sondeo Barrena I, y confirmaron la existencia de una antigua infraestructura que podía fácilmente acondicionarse para su utilización en recarga artificial (figura 3 y figura 4). También permitieron realizar una primera valoración de los parámetros hidráulicos del acuífero y del volumen de agua que sería capaz de almacenar. En el ensayo de 1999 se inyectó un caudal medio de 720 m³/día, con un ascenso total en el acuífero debido a la recarga del 2,61 m de media en los dos puntos controlados (figura 5). La afección de la recarga en ambos puntos fue prácticamente inmediata.

A partir de la información obtenida en los ensayos de recarga y de la información procedente de ensayos de bombeos previos, se deduce que parece existir una zona más permeable en el entorno de los sondeos de la Barrena que en el resto del acuífero mioceno, con transmisividades que se encuentran entre 800 y 1100 m²/día, si bien se constata un diferenciación vertical en la distribución de permeabilidades, con k en torno a 40 m/día para los 20 m finales de carbonatos, y alrededor de 10 m/día cuando el espesor saturado pasa a ser de 100 m. En el resto del acuífero la k varía entre 6 y 10 m/día con valores de T entre 200 y 600 m²/día. Los valores obtenidos para el coeficiente de almacenamiento se sitúan entre 2,5 y $9,4 \times 10^{-3}$, que son valores característicos de acuíferos semiconfinados (González-Ramón, 2008).

El volumen de agua almacenable hasta una cota de agua de 650 m s.n.m., que es la alcanzada históricamente, con el acuífero lleno hasta la cota del manantial de las Pilas (antiguo drenaje del acuífero), sería próximo a 3 hm³.

Conclusiones

El acuífero Mioceno de Mancha Real es un almacén de aguas subterráneas que puede perfectamente ser utilizado para recarga artificial. En los últimos tiempos, el gran desarrollo del regadío de olivar en la provincia de Jaén, ha ocasionado que la práctica totalidad de los recursos disponibles de manantiales y ríos hayan sido captados para su uso agrícola. Las comunidades de regantes, con el apoyo de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir han construido enormes balsas superficiales que almacenan estos excedentes, con lo que ya no hay recursos en el entorno que pudieran utilizarse para recargar el Acuífero Mioceno.

El abandono de la explotación en el acuífero mio-

González Ramón, A. *et al.*, 2009. La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 289-304

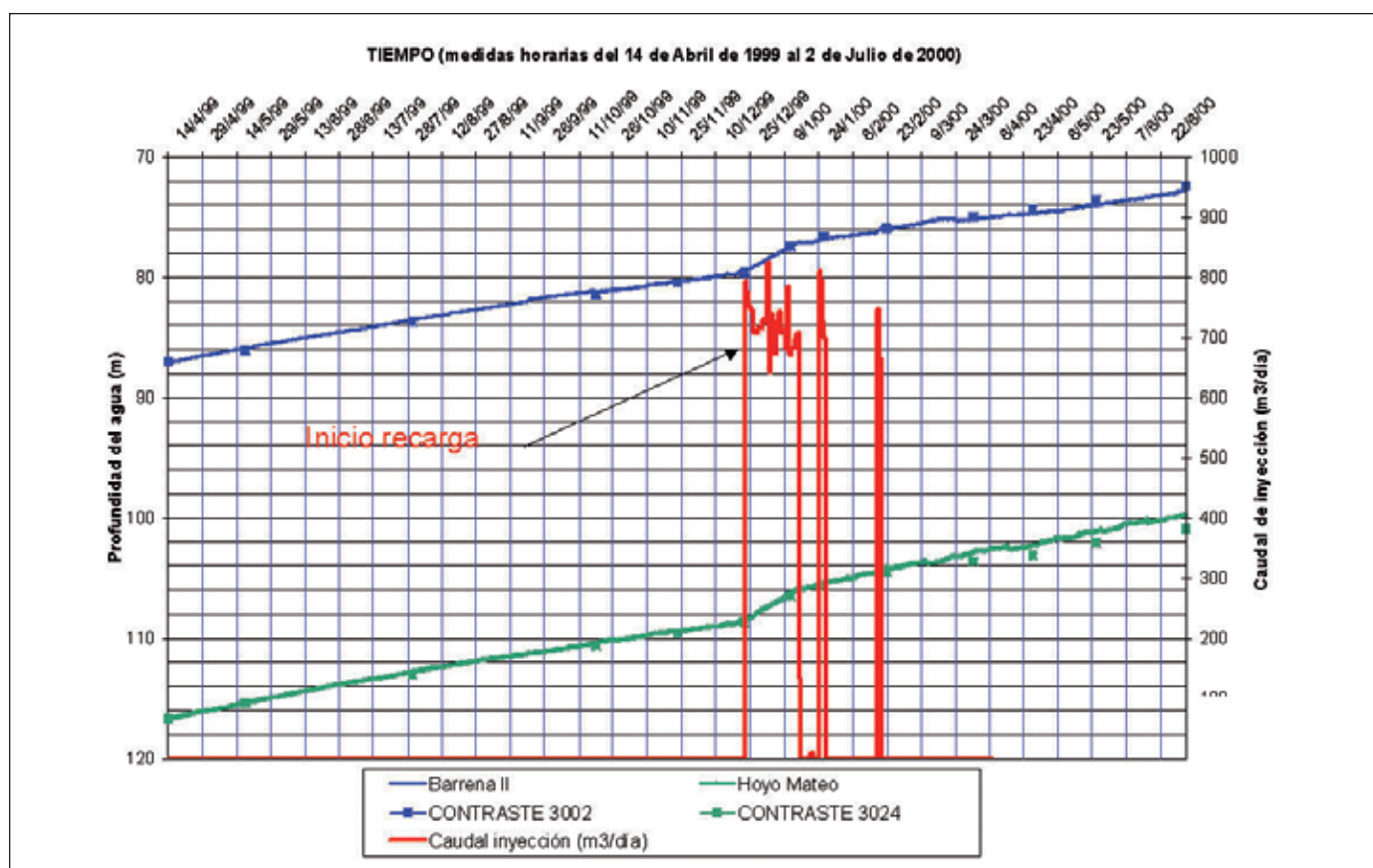


Figura 5. Evolución piezométrica en los sondeos Barrena II y Hoyo Mateo en el periodo abril de 1999 y junio de 2000
Figure 5. Piezometric evolution in Barrena II and Hoyo Mateo boreholes, for april 1999 to june 2000 period

ceno desde el año 1996 hasta el año 2000 produjo el llenado parcial del mismo. En el año 2000, la empresa que gestiona el abastecimiento a Mancha Real comenzó a explotarlo controladamente, con un volumen similar al de su recarga natural; esto permitió que los niveles piezométricos se mantuvieran equilibrados. La situación se sostuvo hasta el estiaje de 2006, en que como consecuencia de las modificaciones que se realizaron en la infraestructura del abastecimiento a Mancha Real, fue necesario utilizar de nuevo las reservas almacenadas en el Acuífero Mioceno. Gracias a esto Mancha Real pudo solventar un grave problema de suministro temporal.

El acuífero mioceno, si se deja recuperar, es un estupendo almacén que ya ha demostrado que puede solucionar perfectamente emergencias puntuales en el abastecimiento a Mancha Real. En esta línea debe planificarse su utilización futura, ya que la realización de recarga artificial parece hoy en día inviable pues no existen excedentes a utilizar en su entorno.

Experiencias de recarga artificial en el acuífero Gracia-Morenita

El acuífero Gracia-Morenita está situado al suroeste de la provincia de Jaén, entre las poblaciones de Castillo de Locubín y Valdepeñas de Jaén (figura 6). La zona meridional del acuífero constituye la cabecera el Río San Juan, y la septentrional es atravesada por el Río Grande, que aguas abajo pasa a denominarse Víboras. Ambos ríos son tributarios del Guadajoz, a su vez afluente del Guadalquivir.

El acuífero está constituido por calizas y dolomías jurásicas, su superficie aflorante es de 19 km² y su espesor entre 150 y 300 metros. El sustrato impermeable está compuesto por lutitas triásicas. Presenta sectores confinados bajo las margocalizas cretácicas que lo recubren en parte o bajo las arcillas triásicas superpuestas en diversas zonas como consecuencia de la compleja estructura geológica existente (González-Ramón *et al.*, 2002b; 2005). Los recursos

González Ramón, A. *et al.*, 2009. La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 289-304

son del orden de 10 hm³/año y las reservas mínimas explotables superiores a 35 hm³ (González-Ramón, 2001; González-Ramón *et al.*, 2006).

Entre los años 1995 y 2000 se llevó a cabo una investigación en la cabecera del río Víboras con el objetivo de resolver los problemas de abastecimiento a los núcleos de población incluidos en la Comarca de Martos. El suministro conjunto se realizaba desde derivaciones en el cauce del río Víboras, complementado con algunas captaciones menores en cada término municipal. En estos estudios se estimó un déficit en el abastecimiento a la Comarca de Martos, centrado exclusivamente en años secos, que se cifró en un máximo de 80 L/s. Por otra parte, también se detectaron problemas en el abastecimiento en momentos de fuertes lluvias debido a la turbidez en las aguas captadas en las derivaciones del Río Víboras, y en la calidad del agua por la existencia de

vertidos de aguas residuales procedentes de Valdepeñas de Jaén.

Los trabajos culminaron con la ejecución de seis sondeos en el sector septentrional del acuífero Gracia-Morenita, próximos a la toma principal de las captaciones en el río Víboras denominadas Fuentes de Martos (sondeos Víboras I al VI). Dos de los sondeos construidos quedaron instalados como sondeos de explotación y otros dos se acondicionaron para permitir la inyección de caudales en operaciones de recarga artificial. La infraestructura creada, es capaz de cubrir, en caso de emergencia, la totalidad del abastecimiento a la Comarca de Martos.

La explotación del acuífero, planteada exclusivamente como apoyo a la Comarca de Martos en épocas de sequía o de emergencia o por otras causas, no supondría ningún problema, ya que su potencialidad es suficiente. Sin embargo en el futuro podría planifi-

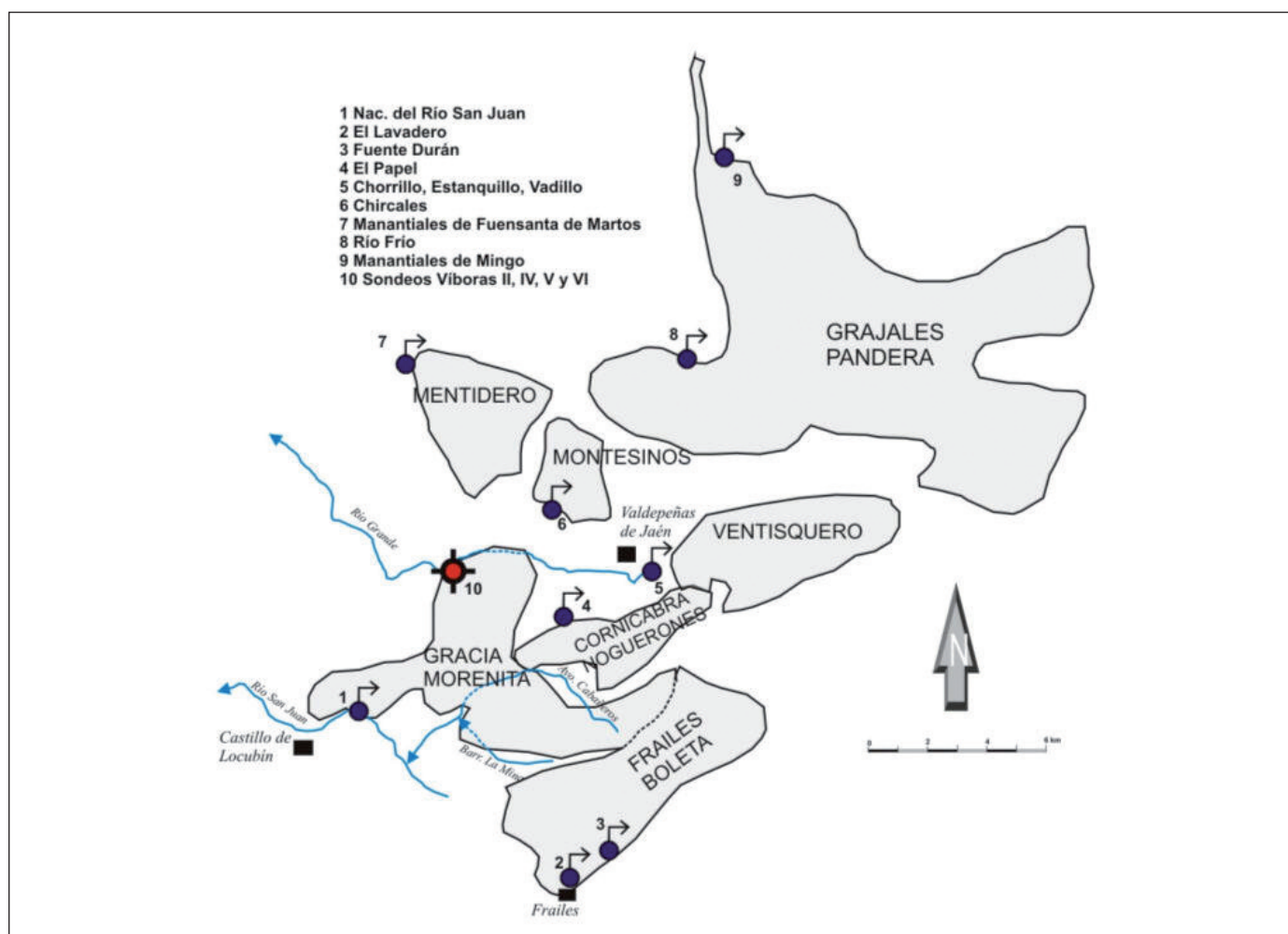


Figura 6. Situación geográfica del Acuífero Gracia-Morenita y contexto hidrogeológico en relación con otros acuíferos de la zona
 Figure 6. Gracia-Morenita aquifer location, hydrogeological context and relations with other aquifers

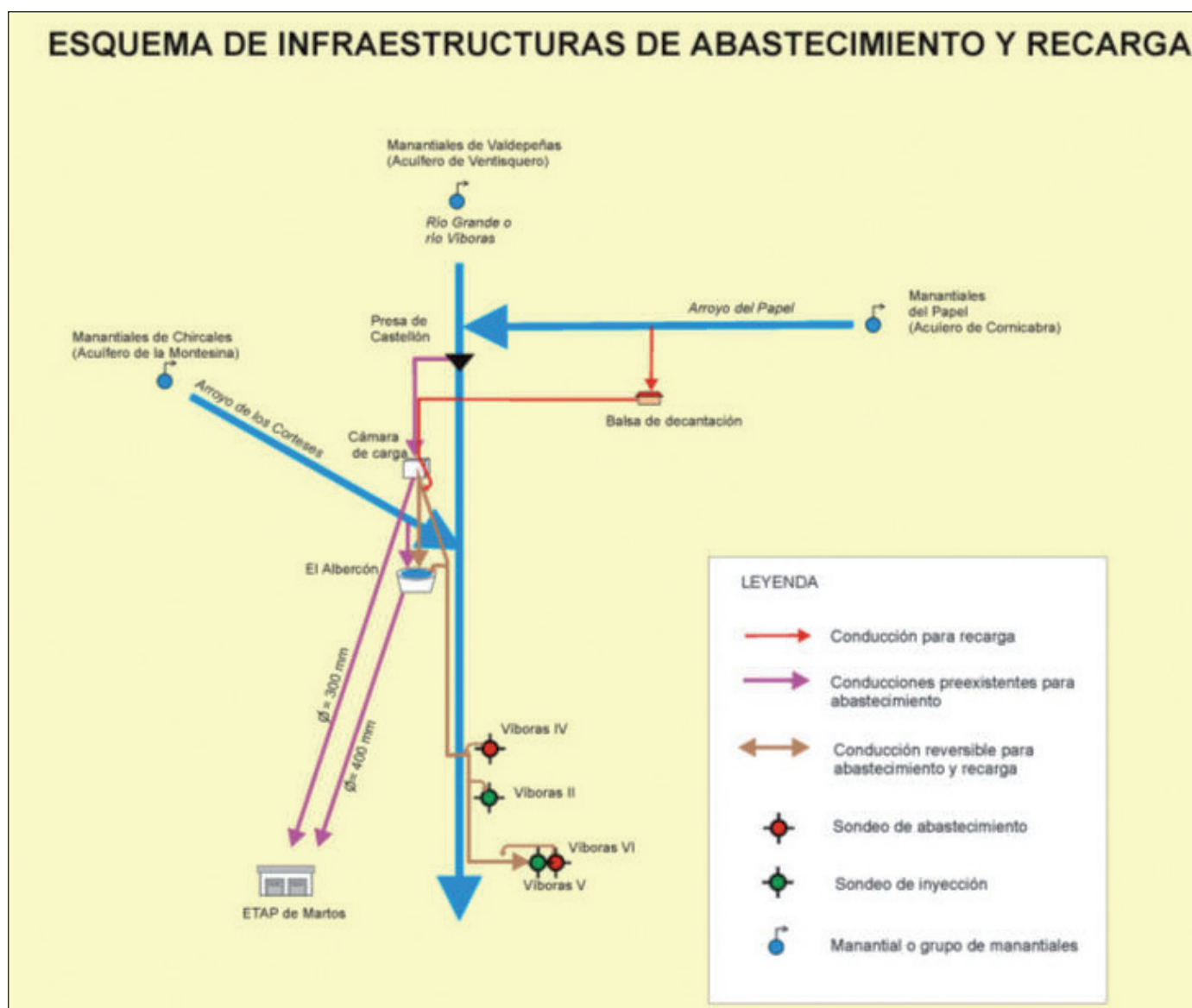


Figura 7. Esquema de infraestructuras existente en la Cabecera del río Víboras para el abastecimiento a la Comarca de Martos
 Figure 7. Infrastructure available in Viboras river upper basin for Martos region water supply

carse una explotación más intensa, lo que provocaría afecciones al manantial principal que drena el acuífero, el Nacimiento del río San Juan. Para prever esta afección se estudió la posibilidad de atenuarla mediante operaciones de recarga artificial con excedentes invernales de la cabecera del Río Víboras. Dicho estudio fue realizado durante el año 2000, a partir de una serie de ensayos de inyección en el acuífero Gracia-Morenita, y una posterior simulación mediante modelización matemática de las diferentes alternativas de explotación-recarga (González-Ramón *et al.*, 2005).

Ensayos realizados

Las aportaciones en cabecera del Río Víboras proceden de las descargas de los acuíferos de Ventisquero, Cornicabra-Noguerones y la Montesina (figura 6) y se estimaron en una media cercana a 10 hm³ anuales para el periodo 1983 a 1999. El caudal excedentario, una vez detraídos los usos para abastecimiento y regadío, se estimó en 4 hm³ en años medios, de aportaciones subterráneas exclusivamente; en el año 1998/99 fue estimado en 5,8 hm³ (González-Ramón *et al.*, 2005). Estos excedentes son regulados aguas

abajo por el embalse del Víboras, si bien una parte puede ser utilizada para recarga artificial.

En la figura 7 se muestra la infraestructura de abastecimiento existente. Para estudiar la viabilidad de la recarga artificial, además de los caudales excedentarios utilizables, se estudió la calidad de las aguas disponibles. Las labores de muestreo en los cursos superficiales permitieron determinar que el agua presentaba una conductividad comprendida entre 500 y 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con un SAR inferior a 1, sólidos en suspensión entre 6 y 11 mg/L, bajo contenido en nutrientes, (a excepción del Río Víboras) y un trazado microbiológico variable, pero idéntico al de las aguas de abastecimiento, ya que los puntos de toma para el agua de recarga estaban próximos a las tomas de abastecimiento. Las aguas de mayor calidad para la recarga son las del Arroyo de los Corteses y del Arroyo del Papel, pues en el Río Víboras existen vertidos de aguas residuales procedentes de Valdepeñas de Jaén.

Para la experiencia de recarga se decidió emplear las aguas del Arroyo del Papel (figura 8) ya que existía una infraestructura previa que, con ligeras modificaciones, podía ser utilizada. El agua procedente del Arroyo del Papel se deriva hacia un depósito que sirve como balsa de decantación. Desde el depósito se conduce hacia una arqueta de la que parte una tubería de polietileno que va introducida en el canal de derivación del Víboras para abastecimiento a la Comarca de Martos y cuyo fin es evitar la mezcla con las aguas que circulan por el canal, de peor calidad. La tubería de polietileno enlaza con la procedente de los sondeos de explotación y de inyección. El sistema permite conducir hacia los sondeos un máximo de 80 L/s.



Figura 8. Punto de derivación de las aguas del arroyo del Papel utilizadas para las operaciones de recarga artificial

Figure 8. Deviation point of Papel river for artificial recharge purposes

Los sondeos de inyección debieron acondicionarse para producir una rotura de presión en la boca del sondeo ya que la diferencia de cota con el punto de captación es de unos 140 metros. Para la experiencia de recarga sólo pudo utilizarse como sondeo de inyección el Víboras II.

Resultados obtenidos

El caudal inyectado fue de 19 L/s durante 43 días; el volumen total durante el periodo de recarga fue de 70.642 m^3 . El control del volumen inyectado se realizó mediante contador y el control de la evolución de niveles mediante medidas diarias en los cuatro sondeos existentes. También se realizó un control diario del caudal drenado en el Nacimiento del Río San Juan, basado en medidas de la lámina de agua surgente y un control periódico de la calidad del agua inyectada, que consistió en análisis de aniones y cationes mayoritarios, nitratos, nitritos, fósforo, DBO_5 , DQO, pH, sólidos en suspensión y microbiológicos.

En la figura 9 se muestra la evolución de niveles durante el periodo de inyección tanto en el sondeo Víboras II como en los piezómetros de observación. El ascenso de nivel en el sondeo de inyección fue de 23,6 metros, con un caudal específico de 0,8 L/s/m. El piezómetro Víboras IV, situado a 133 m al noreste evoluciona de forma paralela al de inyección. En los piezómetros Víboras V y VI, situados a 270 m al suroeste, se detecta elevación del nivel a partir de los primeros 300 minutos de recarga que alcanza un máximo de 10 cm. A partir de los 7 días de recarga, el nivel sigue la evolución general del acuífero sin detectar influencia de la recarga.

A los 23-24 días del inicio de la recarga se detecta una ligera influencia en la altura de la lámina de agua drenada por el Nacimiento del Río San Juan que contribuye a retardar el vaciado del acuífero, aunque no modifica la tendencia general descendente del caudal de salida. La disminución de caudal del manantial es consecuencia de la ausencia de precipitaciones antes y durante la prueba de recarga.

A partir de la información obtenida se realizó una simulación de las alternativas de recarga mediante modelización matemática, con el objetivo de determinar el efecto que tendría sobre el acuífero la recarga a distintos caudales, así como el efecto derivado de los bombeos en épocas de mayor demanda. Para la elaboración del modelo se utilizó el programa de McDonald y Harbaugh (1984) de U.S. Geological Survey, que simula el flujo en tres dimensiones resolviendo la ecuación diferencial general de flujo por el

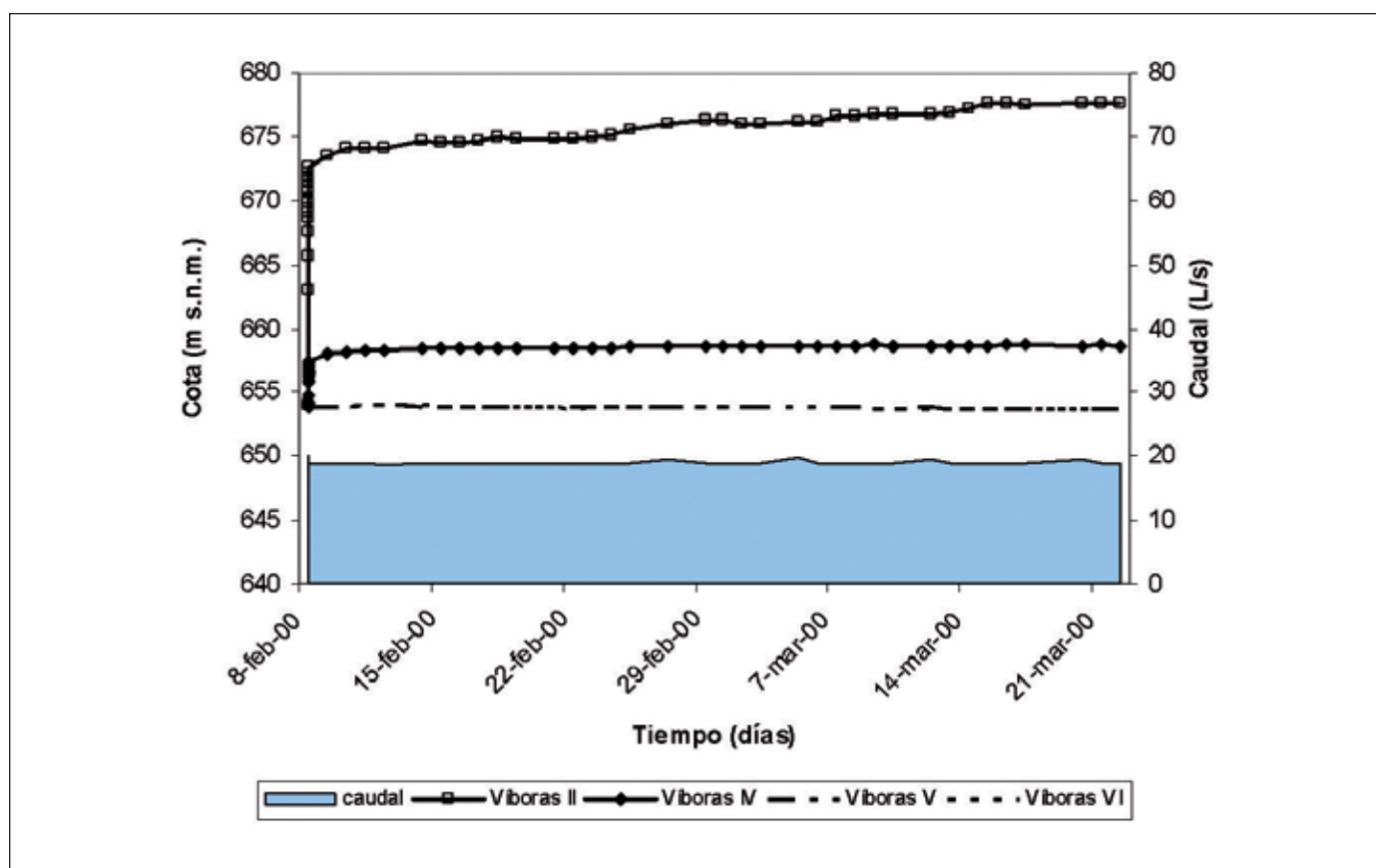


Figura 9. Evolución de nivel y caudal inyectado en el pozo de recarga y piezómetros de observación durante el periodo de recarga
 Figure 9. Level and injected water flow in the recharge well and monitoring piezometers during the recharge period

método de las diferencias finitas. El acuífero se discretizó en mallas cuadradas, con un tamaño de 500 x 500 m a las que se les asignaron diferentes parámetros hidráulicos como permeabilidad, cota de muro, superficie permeable, cota piezométrica e infiltración.

Para la calibración del modelo se realizó, en primer lugar, una modelización en régimen permanente, con el objeto de comprobar la coherencia de las hipótesis emitidas sobre el funcionamiento hidráulico del acuífero. El modelo se consideró calado al conseguir una variación de la piezometría final con respecto a la inicial, inferior al 1 %, además de haber conseguido un caudal medio de salida similar al caudal medio de drenaje del manantial de San Juan.

Una vez calado el modelo en régimen permanente se procedió al calado en régimen transitorio. Con respecto a la simulación en régimen permanente se realizaron dos modificaciones: Se introdujeron los datos anuales y mensuales de recarga para cada año del periodo 1983-1995 y se introdujo el coeficiente de almacenamiento.

La calibración en régimen transitorio se realizó

bajo dos supuestos diferentes (figura 10): Simulación para un periodo de 13 años (1983-1995) (Gracia MT); o Simulación para un periodo de doce meses correspondiente a la media anual del año hidrológico (Gracia MT-mes).

Una vez considerado el modelo como razonablemente ajustado se realizaron nuevas simulaciones con el objetivo de comprobar el resultado de diversos supuestos de explotación-recarga del acuífero.

Como principal conclusión, el aspecto más destacado de la explotación del modelo para el calado con cadencia de un año para 13 años de simulación es el siguiente: se observa que los bombeos provocan un descenso del caudal de salida en el manantial del orden del 28 % para una extracción continua de 100 L/s, sin embargo si esta extracción se combina con periodos de recarga artificial de 50 L/s el porcentaje disminuye al 2,3 %.

Finalmente se realizó un estudio económico para determinar el coste extra en el bombeo del agua en el acuífero que producirían las operaciones de recarga artificial. Se concluye que el coste del m³ bombeado

González Ramón, A. *et al.*, 2009. La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 289-304

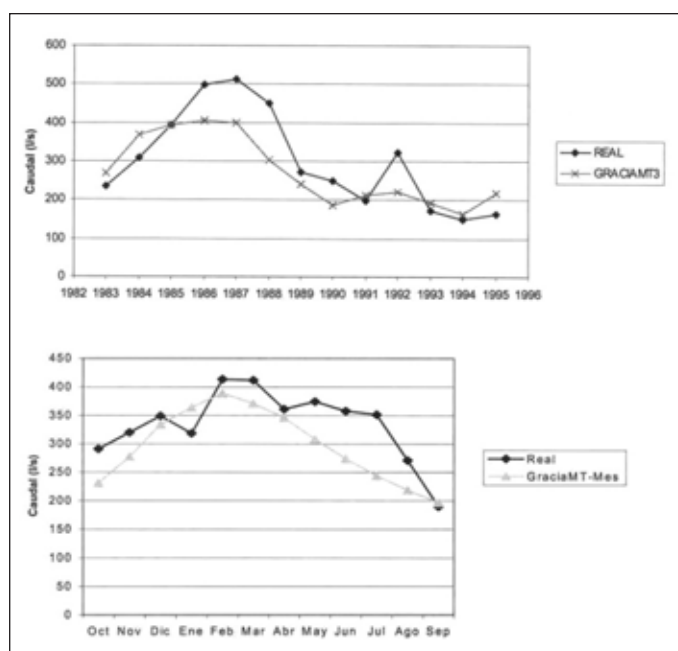


Figura 10. Evolución del caudal real del manantial de San Juan frente a la evolución de caudal de la simulación Gracia MT arriba y Gracia MT-mes abajo

Figure 10. Real evolution of San Juan spring flow against evolution of Gracia-Morenila upstream and downstream

en el acuífero es de 35,35 pts del año 1999. Si se incluyen operaciones de recarga, se incrementa el coste en 0,69 pts/m³ en los gastos de amortización y en 0,8 pts/m³ en los costes de mantenimiento.

Conclusiones

Las pruebas realizadas demuestran que las operaciones de recarga artificial en este acuífero son viables a bajo coste. Esto permitiría en el futuro, caso de plantearse su necesidad, utilizar el almacén que supone el acuífero para regular los excedentes del resto de acuíferos de la cabecera del río Víboras (Ventisquero, Montesinos y Cornicabra-Noguerones) sin necesidad de crear ninguna infraestructura en ellos. Una forma de operar podría ser la de bombear intensamente el acuífero Gracia Morenila en estiaje y recuperarlo después en invierno utilizando la recarga artificial.

El embalse del Víboras regula las aguas de todos estos acuíferos aguas abajo. Sin embargo, todo su vaso se encuentra en materiales de afinidad triásica, en los que el yeso es abundante. La calidad del agua embalsada es deficiente para su uso en abastecimiento urbano, y es necesario potabilizarla mediante ósmosis inversa, con un elevado consumo energético

y altos costes. La utilización del acuífero Gracia-Morenila en combinación con operaciones de recarga artificial, permitiría el uso del agua antes de que su calidad se deteriore, reduciendo en gran medida los costes energéticos y económicos y además se liberarían recursos del embalse para otros usos como la agricultura, cuyas exigencias de calidad son mucho menores.

Experiencias de recarga artificial en el acuífero de Los Llanos de Alcalá la Real

El acuífero de Los Llanos (figura 11), incluido administrativamente en la M.A.S. 05.28 "Montes Orientales. Sector Norte", se localiza en el término municipal de Alcalá la Real (Jaén) y está constituido por un afloramiento de calcarenitas bioclásticas del Mioceno, que se disponen subhorizontales con forma casi tabular, buzando levemente hacia el sureste, sobre las margas miocenas que conforman su substrato. Se extiende desde el núcleo urbano de Alcalá la Real a la pedanía de Santa Ana; en general, se sitúa a cotas comprendidas entre 900 y 1.050 m s.n.m., con una cota media próxima a 950 m s.n.m. (Gollonet *et al.*, 2002).

Los límites del acuífero están definidos por el contacto con las margas miocenas de carácter impermeable, que se sitúan bajo las calcarenitas. Su superficie es de 6'6 km² y la potencia media del conjunto calcarenítico es de unos 50-60 m, con mínimos de 36 m y máximos de 97 m en los sondeos existentes. Se trata de un acuífero libre y colgado, si bien en su parte suroriental está confinado, pues se produce un cambio de facies entre las calcarenitas y las margas, por lo que las calcarenitas presentan indentaciones o incluso se sitúan localmente por debajo de las margas impermeables. La alimentación del acuífero procede de la infiltración del agua de lluvia, drenándose de forma natural mediante los manantiales de Fuente del Rey/Fuente Gallardos y La Corredera y, en épocas de aguas altas, a través de Fuente Somera (Gollonet *et al.*, 2002).

Las reservas del acuífero han sido estimadas entre 3'2 y 3'9 hm³, para situaciones de estiaje y aguas altas, respectivamente. El agua del acuífero presenta una conductividad eléctrica inferior a 500 µS/cm y facies bicarbonatada cálcica. Los contenidos en nitratos están comprendidos entre 20 y 30 mg/l. El balance hídrico del acuífero, para un período de 24 años hidrológicos (1975-76 a 1998-1999), permite evaluar unos recursos renovables medios de 1,3 hm³/año (Gollonet *et al.*, 2002).

La población de derecho del municipio de Alcalá la

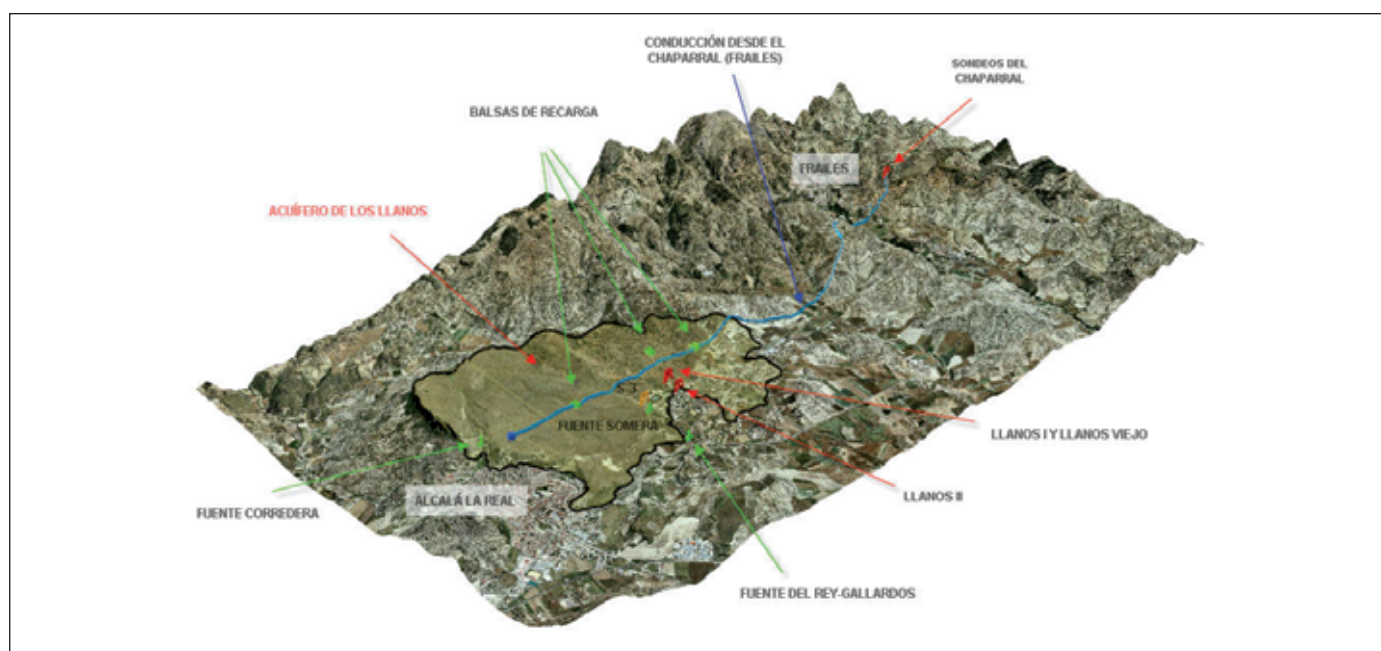


Figura 11. Esquema general del acuífero de Los Llanos e infraestructuras de recarga
 Figure 11. General scheme of Los Llanos aquifer and artificial recharge infrastructure

Real a la fecha de la experiencia de recarga (2000) era de 21.599 habitantes. En el núcleo principal, Alcalá la Real, que disponía de un sistema de abastecimiento independiente de las numerosas pedanías o entidades de población del municipio, se concentraban unos 14.500 habitantes lo que, considerando una dotación media de 270 L/hab/día, (O.M. del M.O.P.T. de 24/09/92 en B.O.E. n° 249 de 16/10/92), representa una demanda teórica de agua de 1,47 hm³/año (equivalente a unos 47 L/s continuos).

El sistema de abastecimiento en alta al núcleo de Alcalá la Real comprendía siete captaciones situadas en tres acuíferos diferentes, de los que el de mayor importancia era, y sigue siendo en la actualidad, el acuífero de Los Llanos donde se ubican las captaciones de abastecimiento Sondeos Llanos I y II, Fuente Somera y Fuente Corredera. En la figura 13 se presenta un esquema del sistema de abastecimiento.

El acuífero de Los Llanos y el sistema de abastecimiento de Alcalá la Real han sido objeto de numerosos trabajos por parte del IGME y otros organismos, debido a los problemas surgidos en la década de los 80 ante una explotación intensiva del acuífero, con el consiguiente agotamiento de sus principales surgencias y la insuficiencia de los sondeos existentes en el mismo para atender el suministro normal de Alcalá la Real. Posteriormente, se realizaron los sondeos del Chaparral en un acuífero cercano (figura 11) que per-



Figura 12. Balsa nº 2 y dispositivo de llenado
 Figure 12. Pond nr. 2 and filling device

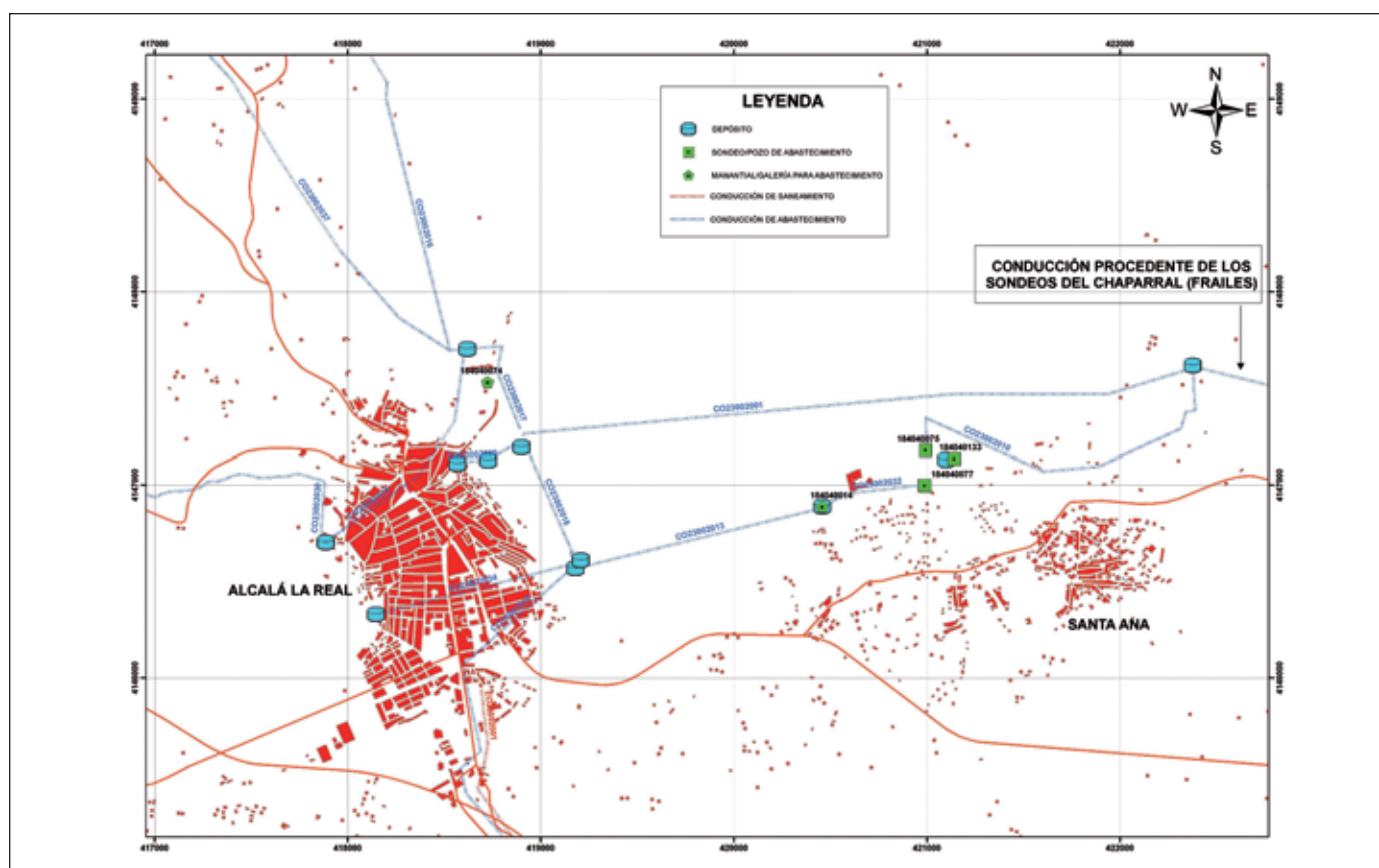


Figura 13. Esquema de las infraestructuras actuales de abastecimiento de Alcalá la Real
 Figure 13. Current infrastructure for water supply to Alcalá la Real

mitieron solucionar el problema, aunque generaron múltiples conflictos sociales con la vecina localidad de Frailes (González Ramón *et al.*, 2002a). De hecho, en estos sondeos el caudal está limitado, según concesión de la entonces Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, a un máximo de 20 L/s en la época estival (de 1 de mayo a 31 de agosto) y de 51,3 L/s el resto del año (1 de septiembre a 30 de abril).

El agua de los sondeos del Chaparral es de facies sulfatada cálcico-magnésica y su contenido en sulfatos varía entre 205 y 335 mg/L dependiendo del caudal y tiempo de bombeo. Tiene una conductividad eléctrica algo superior a 1.300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ frente a valores siempre inferiores a 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las restantes fuentes de suministro. La recarga provocará una mezcla de ambos tipos de agua, con un efecto positivo para el abastecimiento por la mayor regularidad en la composición química del agua que llega a la red a lo largo del año, aunque produciría un empeoramiento de la calidad del agua del acuífero de Los Llanos. Si se considera que los recursos renovables del acuífero

son del orden de 1,3 $\text{hm}^3/\text{año}$ y la recarga sería de 0'27 $\text{hm}^3/\text{año}$, cabe estimar que la calidad del agua no sufriría grandes cambios a corto plazo.

El objetivo de la experiencia de recarga descrita en el presente artículo fue estudiar la viabilidad técnica de la misma para así complementar el abastecimiento urbano a Alcalá la Real con el consiguiente incremento de la garantía futura en el abastecimiento, utilizando para ello los caudales excedentarios de la concesión de los sondeos del Chaparral durante el periodo comprendido entre septiembre y abril (51,3 L/s).

Ensayos realizados

Las instalaciones utilizadas para la recarga consistieron en una conducción existente desde los sondeos del Chaparral (Frailes) hasta el depósito municipal de Los Llanos (de 350 mm de diámetro y 125 l/s de capacidad máxima), que atraviesa de este a oeste el acuífero (figura 11) junto a la que el Ayuntamiento cons-

González Ramón, A. *et al.*, 2009. La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 289-304

tuyó en 1992 tres balsas experimentales para la recarga con el asesoramiento del anterior S.G.O.P. (Dirección General de Obras Hidráulicas), de pequeñas dimensiones (superficies comprendidas entre 38 y 43 m²). Para mejorar la admisión de las balsas n^{os} 2 y 3 se construyeron dos sondeos junto a cada una de ellas y conectados a las mismas. La infraestructura de recarga se completó reacondicionando los tramos de conexión entre la conducción de Frailes y las balsas disponiendo nuevas tuberías de polietileno, con capacidad para aportar hasta 15 L/s en la n^o 3 y hasta 10 L/s en la n^o 2, así como nuevos contadores de mayor diámetro para la medida del caudal recargado. Asimismo, se instaló un sistema de boya con flotador a la entrada del agua en cada balsa, para cerrar la entrada y evitar el rebose del agua una vez llenas, permitiendo su funcionamiento nocturno de forma automática (figura 12).

El caudal de recarga y el volumen total de agua recargada se determinó mediante lecturas diarias de los contadores volumétricos instalados al efecto a la entrada de cada balsa. Para el control de la evolución piezométrica, se utilizó el piezómetro S-3 del SGOP y el Sondeo Llanos Viejo, instalados con data logger (figura 11). Este control piezométrico puntual se complementó con sendas campañas piezométricas al

principio y final del período de recarga. El caudal de Fuente del Rey/Fuente Gallardo se controló mediante 4 aforos con micromolinete y 5 estimaciones con medida de la lámina de agua y el de Fuente Somera se dedujo de los volúmenes diarios captados para abastecimiento a Alcalá la Real.

Se inyectó agua durante un período de 66 días, simultáneamente en las balsas n^{os} 2 y 3. El agua utilizada procedía de los sondeos del Chaparral (Frailes). Los caudales reales que llegaban a las balsas no superaron, en ningún momento, los 10 L/s en la Balsa n^o 3 ni los 5 L/s en la Balsa n^o 2. El total recargado fue de 57.960 m³ (10'2 L/s de media). El 67 % del volumen recargado se produjo en la Balsa n^o 3, y el resto en la Balsa n^o 2. El agua de recarga es de facies sulfatada cálcico-magnésica y cabe destacar su contenido en sulfatos, de 335 mg/l, frente a valores en el acuífero de los Llanos inferiores siempre a 45 mg/l. Otros iones significativamente más elevados en el agua de recarga son el cloruro, sodio, magnesio y calcio. Presenta una conductividad eléctrica de 1.340 µS/cm. No se observaron problemas de turbidez, ni de arrastre de sólidos de ningún tipo; tampoco aparecieron en el intervalo de recarga fenómenos de eutrofización en las balsas (formación de algas, etc...) ni se detectó colmatación de los elementos de recarga.

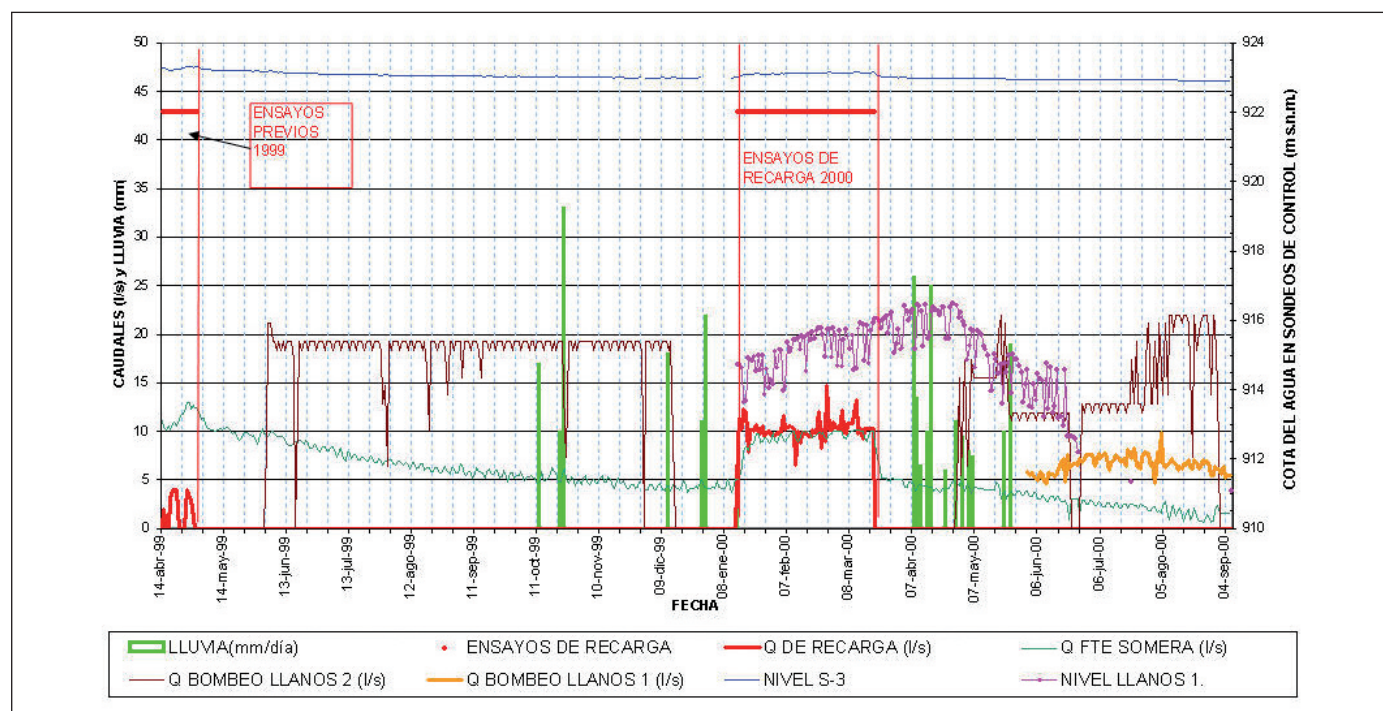


Figura 14. Gráfico general de datos de control en el acuífero de Los Llanos
 Figure 14. Monitoring data of Los Llanos aquifer

González Ramón, A. *et al.*, 2009. La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 289-304

Los manantiales de Fuente del Rey y Fuente Gallardo permanecieron con caudal prácticamente constante todo el período de recarga, con una media conjunta próxima a 9 L/s, totalizando unas descargas próximas a 45.600 m³ en ese periodo, sin ningún tipo de afección aparente. El manantial de Fuente Somera experimentó un incremento de caudal debido a la recarga de unos 5 L/s durante el período de inyección (desde 4 hasta 9 l/s de caudal medio), equivalente a unos 28.500 m³ (el 73 % del agua inyectada en Balsa nº 3, directamente relacionada con dicho manantial a través de conductos kársticos).

Resultados obtenidos

En la figura 14 se incluyen conjuntamente todos los parámetros controlados temporalmente en el período de observación, a nivel diario, incluyendo unos ensayos preliminares de 1999. Destacan claramente las afecciones de los bombeos sobre caudales y niveles piezométricos y la escasa influencia aparente de las lluvias sobre el acuífero (a pesar de registrarse hasta 45 mm/día). Asimismo, se observa que la afección por la recarga es muy rápida tanto en el sondeo S-3 como en Fuente Somera (tiempo de respuesta del orden de 1'5 días, que equivaldría a una velocidad aparente del flujo próxima a 500 m/día) observándose-

se además una perfecta correlación del caudal con los niveles de S-3: ascensos de apenas 16 cm en el citado piezómetro producen incrementos del caudal del manantial de hasta 5 l/s. El incremento directo de caudal producido por la recarga en ese manantial sería de unos 5 L/s, que representa el 73 % del agua recargada en la Balsa nº 3, porcentaje elevado pero lógico por la posición del mismo respecto a la balsa, su escasa distancia (800 m) y las cavernas y zonas preferenciales de flujo detectadas bajo la misma. Unos 6 días después de finalizar la recarga, tanto los niveles en S-3 como el caudal drenado por Fuente Somera recupera su situación inicial.

Con respecto a las características fisicoquímicas del agua, los datos de evolución temporal de la conductividad eléctrica en los dos manantiales controlados (figura 15), ponen de manifiesto que, por una parte, en el manantial de Fuente Somera es evidente la mezcla progresivamente creciente entre el agua de recarga y la del acuífero durante el periodo de inyección, lo que provoca un incremento relativo y progresivo de conductividad eléctrica desde 430 a 490 $\mu\text{S/cm}$. Tras la recarga y antes de 4 días, el valor desciende a 320 $\mu\text{S/cm}$. Por otra parte, en Fuente del Rey/Fuente Gallardo la conductividad eléctrica se mantiene entre 340 y 365 $\mu\text{S/cm}$ con tendencia más bien a disminuir en el tiempo, confirmando su no afección durante la recarga.

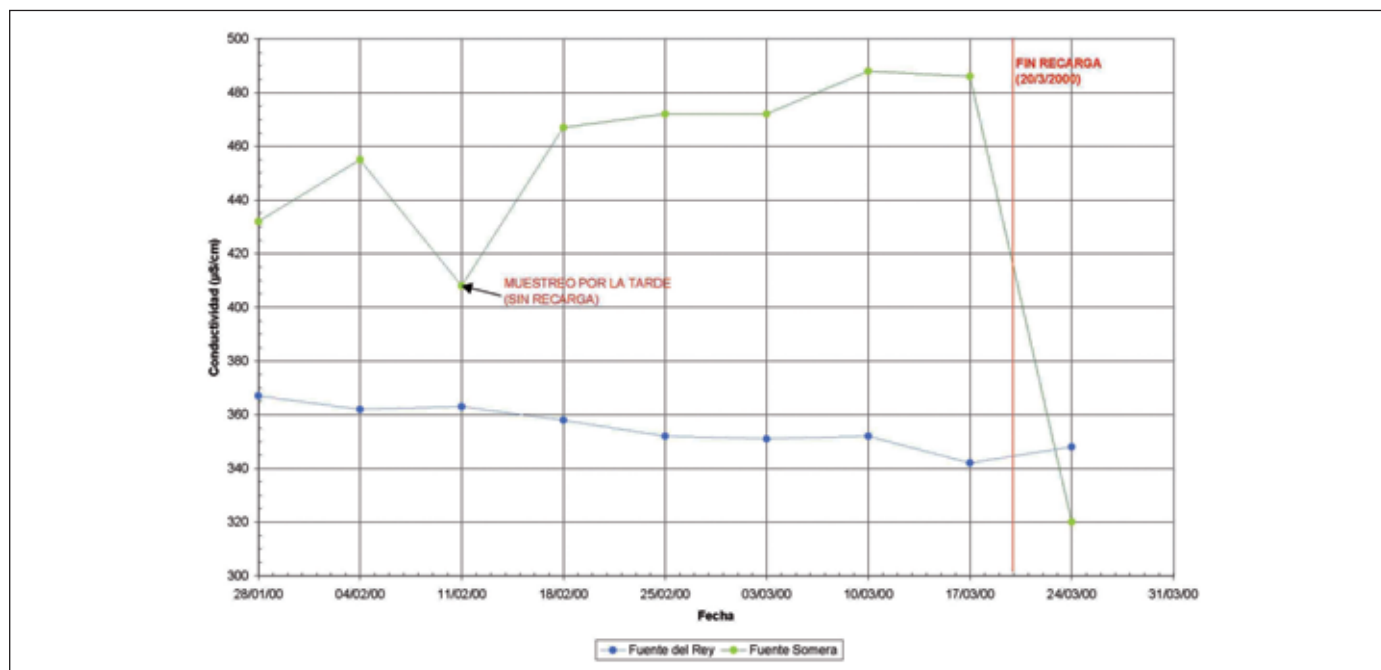


Figura 15. Evolución temporal de la conductividad eléctrica del agua durante la recarga
Figure 15. Evolution with time of electrical conductivity of water during artificial recharge

González Ramón, A. *et al.*, 2009. La recarga artificial como apoyo al abastecimiento de... *Boletín Geológico y Minero*, 120 (2): 289-304

Conclusiones

Las pruebas realizadas muestran el comportamiento del acuífero y confirman que, en una situación como la de la experiencia en que los niveles piezométricos están relativamente elevados, la efectividad de la recarga en la Balsa nº 3 es muy reducida, drenándose más del 70 % de forma rápida por Fuente Somera, mientras que en la Balsa nº 2 es mucho más efectiva y tiende a amortiguar rápidamente el conoide de bombeo provocado por los sondeos de Los Llanos I y II. La inercia del cuerpo inferior de calcarenitas es muy acusada, manteniéndose el caudal de Fuente del Rey/Fuente Gallardo prácticamente constante todo el período de control, sin afecciones de ningún tipo.

La experiencia realizada permite confirmar la viabilidad hidráulica de la recarga para garantizar el suministro urbano de Alcalá la Real en años secos, aunque con ligeras modificaciones de los dispositivos ya existentes, cuyo dimensionamiento se debe replantear con los nuevos datos obtenidos.

Referencias

- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, 2007. Plan de Ordenación de Extracciones de la Unidad Hidrogeológica Mancha Real-Pegalajar (U.H. 05.19). 32 pp. <http://www.chguadalquivir.es>
- González-Ramón, A. 2001. *Contribución al conocimiento hidrogeológico e hidroquímico del acuífero kárstico Gracia-Morenita (provincia de Jaén)*. Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada, 64 pp.
- González-Ramón, A. 2008. *Hidrogeología de los acuíferos kársticos de las sierras de Pegalajar y Mojón Blanco*. IGME, Serie: Tesis doctorales (14), 304 pp.
- González-Ramón, A.; Gollonet, J.; Rubio-Campos, J.C.; Luque, J.A.; Hidalgo-Cano, J.L. e Hidalgo-Cano, M. 2002a. Posibilidades de mejora del abastecimiento de Alcalá la Real mediante inyección de aguas en el acuífero de los Llanos. *Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén*, IGME, Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas (7), Linares (Jaén), 347-350
- González-Ramón, A.; Molina-Molina, A.; Lupiani-Moreno, E.; Fernández-Rubio, R. 2002b. Los acuíferos de la cabecera del Río Víboras. *Libro Homenaje a Manuel del Valle Cardente. Aportaciones al conocimiento de los acuíferos andaluces*, IGME, CHG, Instituto del Agua de Andalucía (COPTJA) y DPG, Madrid, 281-290.
- González-Ramón, A.; Rubio-Campos, J.C.; Lupiani, E.; López-Chicano, M.; Gollonet, J. y González-Hernández, L. 2002c. Acuíferos del sector La Pandera-Mancha Real. *Libro homenaje a Manuel del Valle Cardente. Aportaciones al conocimiento de los acuíferos andaluces*, IGME, CHG, Instituto del Agua de Andalucía (COPTJA) y DPG, Madrid, 271-280.
- González-Ramón, A.; Rubio-Campos, J.C.; Ortuño-Alcaráz, I. y Martos-Rosillo, S. 2005. Posibilidades de la recarga artificial como apoyo al abastecimiento urbano. Aplicación al acuífero de Gracia-Morenita. *Libro homenaje al Profesor Rafael Fernández Rubio, Agua, Minería y Medio Ambiente*, IGME, Madrid, 401-413.
- González-Ramón, A.; Rubio-Campos, J.C.; López-Chicano, M. y Martos-Rosillo, S. 2006. Análisis hidrodinámico del nacimiento del río San Juan. Acuífero Gracia-Morenita (provincia de Jaén). En: Durán, J.J., Andreo, B. y Carrasco, F. (Eds.). *Karst y cambio climático y aguas subterráneas*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas (18). Madrid, 113-123.
- González-Ramón, A. y Rubio-Campos, J.C. 2008. El acuífero de Mancha Real-Pegalajar. Propuestas al Plan de Ordenación de Extracciones. *VII Simposio del Agua en Andalucía. Agua y Cultura*. IGME. Baeza (Jaén), T. II, 875-885.
- Gollonet, J.; González-Ramón, A.; Rubio-Campos, J.C.; Rosales, M. e Hidalgo-Cano, J.L. 2002. Operaciones de recarga artificial en los acuíferos de Mancha Real-Pegalajar y de Alcalá la Real. *Libro homenaje a Manuel del Valle Cardente. Aportaciones al conocimiento de los acuíferos andaluces*. IGME, CHG, Instituto del Agua de Andalucía (COPTJA) y DPG, Madrid, 177-181.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1984, A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *U.S. Geological Survey Open-File Report* 83-875, 528 p.
- Rubio-Campos, J.C., Gollonet, J.; González-Ramón, A. y Luque, J. A. 1995. Resultados de la experiencia de recarga artificial seguida por el ITGE en el acuífero de Mancha Real. *VI Simposio de Hidrogeología. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. Sevilla, Vol. XXI, 147-157.
- Rubio-Campos, J.C., Gollonet, J.; González-Ramón, A., Peinado, T.; Luque, J. A. y Murillo, J.M. 2002. Aplicación de la recarga artificial en el acuífero de Mancha Real. *Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén*, IGME, Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas (7), Linares (Jaén), 355-358
- Rubio-Campos, J.C.; González-Ramón, A.; López-Geta, J.A. y Gollonet, J. 2003. Recarga artificial y sostenibilidad del abastecimiento a poblaciones. Ejemplo de Mancha Real-Pegalajar (Jaén). *Ingeniería Civil*, 131: 163-171.

Recibido: junio 2009

Revisado: septiembre 2009

Aceptado: septiembre 2009

Publicado: octubre 2009

