

Determinación de los volúmenes de agua a gestionar en las infraestructuras de la fase II del proyecto de recarga artificial del acuífero cuaternario de la comarca de "El Carracillo", Segovia (sector occidental)

C. Macías Antequera⁽¹⁾, R. Martínez Gamo⁽²⁾ y J. Martínez Rubio⁽³⁾

(1) Grupo de hidrogeología de la Gerencia de Planificación y Gestión Hídrica de TRAGSATEC. C/ Julián Camarillo, Edificio 6B, 28037. Madrid
cmaa@tragsa.es

(2) Grupo hidrogeología de la Gerencia de Planificación y Gestión Hídrica de TRAGSATEC. C/ Julián Camarillo, Edificio 6B, 28037. Madrid
rmg@tragsa.es

(3) Gerente de Planificación y Gestión Hídrica de TRAGSATEC. C/ Julián Camarillo, Edificio 6B, 28037. Madrid
jmr@tragsa.es

RESUMEN

La primera investigación hidrogeológica para la definición del acuífero de *El Carracillo* (Segovia) se realiza con el fin de planificar de la mejor manera posible las obras de recarga artificial previstas en el Real Decreto-ley 9/1998 *Recarga del acuífero del Carracillo. Obras de toma, conducción principal, infiltración y adecuación de las zonas regables (Segovia)*.

En estos trabajos se puso de manifiesto la existencia de dos regiones hidrogeológicamente favorables para el almacenamiento de las aguas derivadas del río Cega: la primera denominada *paleoforma* situada en el interior de la zona regable, y la segunda denominada *zona almacén* situada en el sector oriental de la comarca.

Para conocer con exactitud los volúmenes máximos y mínimos de agua que pueden ser gestionados en la *paleoforma*, durante los cinco años siguientes, el Grupo Tragsa, a petición del Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, llevó a cabo una serie de trabajos de carácter hidrogeológico entre los que destacan el seguimiento exhaustivo del comportamiento piezométrico del acuífero y el análisis en detalle de cada una de las acciones externas que influyen directamente sobre él, como la lluvia útil, la propia recarga artificial, los bombeos o el paso de aguas superficiales a través de los cauces.

Palabras clave: Acuífero cuaternario, Carracillo, recarga artificial, volúmenes de gestión.

Estimation of the water volume to be managed in the infrastructure of phase II of the artificial recharge plant in the "El Carracillo" region, Segovia (western area)

ABSTRACT

The first hydrogeological investigation for the definition of the Carracillo aquifer (Segovia) was carried out in order to plan the best possible artificial recharge works provided for within the framework of the Royal Decree-Law 9/1998 "El Carracillo Aquifer Recharge. Intake and Pipeline Work, Infiltration and Irrigation Adequacy (Segovia) These studies revealed the existence of two regions hydrogeologically favourable for water storage from flows derived from the river Cega: the first known as the paleo-landform site located within the irrigation area, and the second area called the storage area located in the eastern sector of the district.

In order to exactly estimate the minimum and maximum volume of water that has to be managed in the paleo-landform site over a period of five years, the Tragsa Group has carried out, at the request of the Ministry of Agriculture Fisheries and Food, some of the hydrogeological work, which included the exhaustive follow up of the piezometric behaviour of the aquifer and the detailed analysis of each of the external actions that have a direct influence upon it, such as the useful rain, the artificial recharge, the extraction by pumping, and the overland flow, amongst others.

Key words: artificial recharge, Carracillo, quaternary aquifer, volume management.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction

The first hydrogeological investigation to define the El Carracillo aquifer (Segovia) was aimed to improve the artificial water recharge works planned provided for within the Royal Decree-Law 9/1998 "El Carracillo Aquifer Recharge. Intake and Pipeline Work, Infiltration and Irrigation Adequacy (Segovia)": The recharge will be made thanks to the winter surplus of the Cega River (Figure 1), which is planned to be stored in the superficial quaternary aquifer within the irrigation area.

The investigation revealed the existence of two hydrogeologically favourable areas (Galán et al., 2001) for water storage; a structure known as the paleo-landform site within the irrigation area, and a structure known as the storage area located in the eastern sector of the region (Figure 2).

In order to exactly estimate the volume that has to be managed in the paleo-landform area over a period of five years, the Tragsa Group has carried out, at the request of the Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, some hydrogeological work, which included the exhaustive follow up of the piezometric behaviour of the aquifer and the detailed analysis of each of the external actions that have a direct influence upon it, such as the useful rain, the artificial recharge, the extraction by pumping, and the overland flow, amongst others.

Objectives

The main objective of the work carried out and presented in this paper, was to exactly estimate the minimum and maximum volume of water that have to be managed in the paleo-landform area. By knowing the exact capacity of the paleo-landform area, depending on the determining factors of each hydrologic year, it will be possible to predict what quantity of water will be necessary to recharge this sector with the designed devices by taking advantage of the capacity available at every moment and thus avoid flooding.

Work carried out

Monitoring of the piezometric development over a period of six hydrologic years (from 1999/2000 to 2004/2005)

With the aim of knowing the evolution of the levels of the aquifer, a piezometric control network was established at end of 1999, based on the inventory of water points made that year for the study area. 59 points, which detected the quaternary aquifer, were selected. In addition, the hydrogeological investigation boreholes and continuous sampling boreholes, which had been built during the research project, were added to the above mentioned network. In June 2005, the piezometric control network provided 128 points.

The data collection was done every four months, from February 2000 to September 2005, permitting the calculation of the piezometric surface of the quaternary aquifer in high water periods and before and after the irrigation (Figure 3), and to prepare the isodepth maps (Figure 4).

Water balance in "paleoforma" area and adjustment of the effective porosity

While planning the artificial recharge of the paleo-landform area it was essential to know the different quantities that come into the aquifers by natural regimes. In order to achieve this objective, the first task was to prepare a study on useful rain from the hydrological years 2000/2001 to 2004/2005. The water surplus was established from the rain, evapotranspiration, land use and pedology data. Using the water-surplus data and applying different runoff coefficients depending on the characteristics of the land and vegetation, it was possible to establish the difference between superficial and subterranean runoff.

As result of this research, the quantity of water coming into the aquifer was estimated at between 0.58 and 4.86 hm³/year (Table 1).

Another factor having influence on the water balance is the groundwater entry to the paleo-landform area from the eastern storage area sector. This entry was estimated at 0.13 hm³/month using the classic method supported by the mathematic model created in 2001 (Galán et al., 2001) (Figure 5).

The study also took into account the pilot test for artificial recharge carried out in the whole aquifer from January to April, when 5.46 hm³ was derived. In order to estimate the quantity of water that infiltrated the aquifer, direct flow measurements were made every month from the volumes derived in those channels where the waters from the Cega River passed (Figure 6). After analysing the data from the direct flow measurements, the monthly recharge volume was estimated at between 0.90 and 1.38 hm³ for the paleo-landform sector of the El Carracillo aquifer (Table 2).

Once the water entry in the paleo-landform sector was quantified by adding the data from the useful rain, lateral entry and the artificial recharge infiltrations, the study compared the data of the water entry with the

variations observed in the piezometric levels and the capacity of storage defined previously and taking into account an effective porosity of 15%. The results showed that the adjustment in the balance was not appropriate (Table 3). The extractions obtained thanks to the differences between the piezometric areas during the summer months, were greater than those obtained through the irrigation catalogue.

In the balance mentioned above, the volume of infiltration from rivers and streams that cross the paleo-landform area are not taken into account, however these volumes are estimated to be less than 1 hm³ during the months without irrigation.

As a consequence, it was decided to revise the effective porosity in the paleo-landform zone by using some continuous sample drillings already in place (Galán et al., 2001) and by the approximate percentage of clays, clayey sand and sand in the composition of the lithologic columns. The results of the revision were that the paleo-landform area was made up of 69.86% sand and 30.14% clayey sands and clays.

The effective porosity average in the whole paleo-landform area was reduced, using an arithmetic calculus, by 11%. Taking into account the revised estimation for effective porosity, the comparison between the volumes estimated for the piezometric variations, the volumes obtained by the addition of the water surplus, artificial recharge and the lateral groundwater entry, was done again (Table 4), and even if the differences between both models were considerably reduced, the study continued to search for a better option to minimise the differences. Finally the definitive effective porosity was established at 9% (Table 5).

Results and discussion: calculation of the water volume to be managed

The water volume to be managed was calculated using historical data from 1999 to 2005; these volumes were classified as maximum, minimum and average volume.

A maximum manageable volume was considered as the water quantity that could be introduced when the piezometric situation was very unfavourable (as in 2002, when the lowest piezometric levels of the historical series were registered) and the water surplus practically did not exist. A minimum manageable volume was considered as the water quantity that it could be introduced when the piezometric levels were similar to those in 2004 (the best year of the historical series) and the water surplus was at maximum levels due to the precipitations. The average manageable volume could be established as an initial average piezometric situation and an average natural recharge from precipitations.

The manageable volumes mentioned above, were estimated as follows: average manageable volume, 3.64 hm³; maximum manageable volume, 8.24 hm³; and the minimum manageable volume as zero. In the most favourable case, the paleo-landform area would be completely recharged by natural means, and therefore it would not be necessary to undertake the artificial recharge.

Conclusions

When planning the volume of water from the Cega River to the artificial recharge for the paleo-landform area every month, it is essential to know in detail the hydrogeological features of the environment, as well as its hydrodynamic characteristics and the quantification the water balance of the aquifer sector that is planned to be recharged.

To avoid surpluses or deficits of water for each hydrological year, once all the elements involved have been established and measured, it is only necessary know two parameters: the piezometric situation of the aquifer at the beginning of the hydrological year and the monthly useful rain that penetrates the aquifer. Thanks to this information it is possible to calculate the storage capacity of the paleo-landform area at the end of each month, and therefore, determine the flow that must be taken from the Cega River.

In the studies undertaken and presented in this paper, the maximum, minimum and average manageable volumes of the artificial recharge of the paleo-landform area have been established.

Introducción

En septiembre del año 2001 fue entregado por parte del Grupo Tragsa al Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación el informe final de la primera investigación hidrogeológica para la definición del acuífero del Carracillo (Segovia) a nivel de toda la comarca, con objeto de planificar de la mejor manera posible las obras de recarga artificial previstas en el Real Decreto-ley

9/1998 *Recarga del acuífero del Carracillo. Obras de toma, conducción principal, infiltración y adecuación de las zonas regables (Segovia)*. Los estudios pretendían dar respuesta a cómo debería llevarse a cabo el almacenamiento de agua en el terreno. El volumen de agua autorizado, unos 14 hm³/a procedentes del río Cega, sería transportado hasta la comarca por medio de una tubería y almacenado en el acuífero cuaternario superficial, dentro de la zona regable (figura 1).

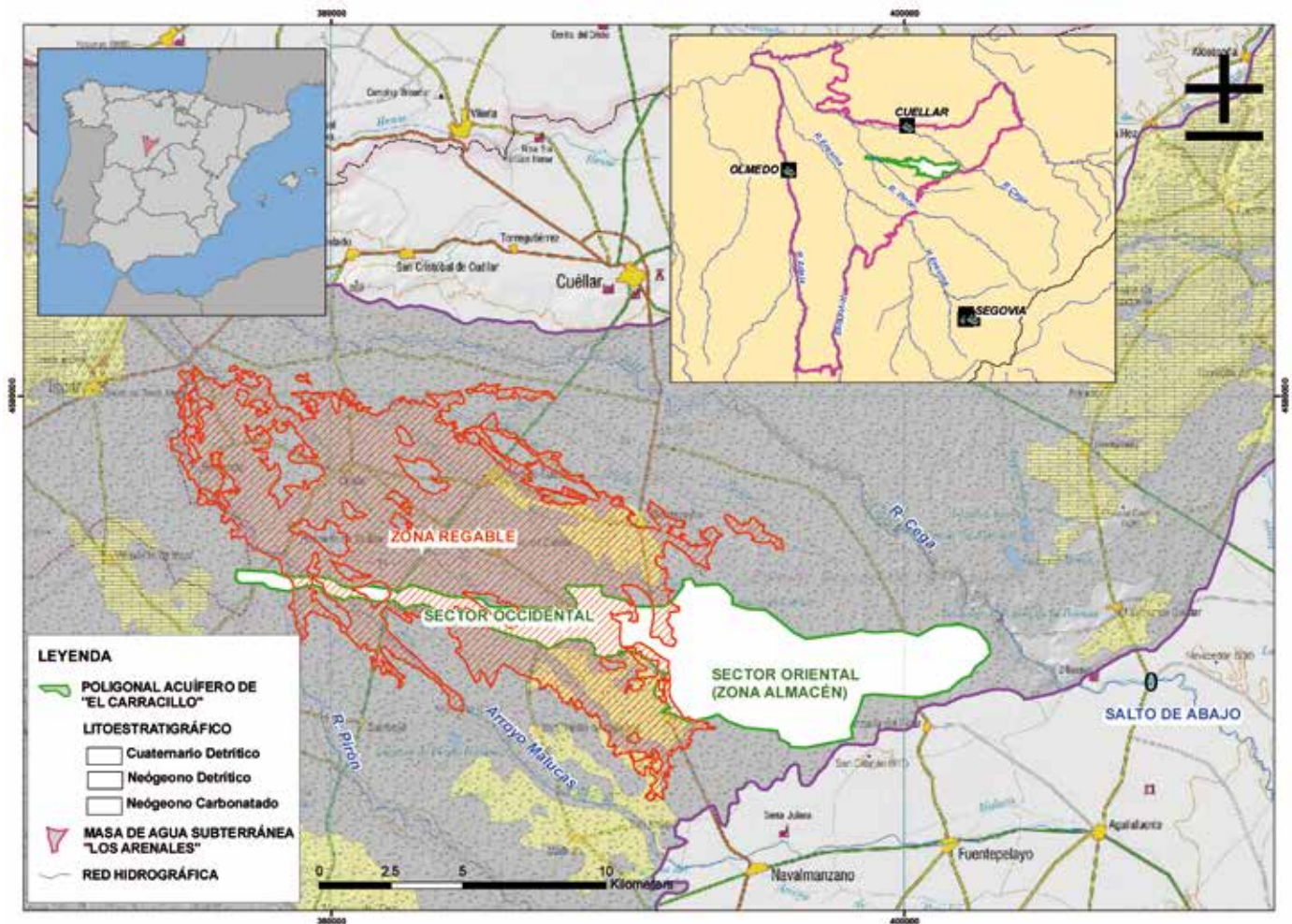


Figura 1. Plano general de situación de la comarca de El Carracillo.
Figure 1. General map of the situation of the "El Carracillo" region.

En la investigación (Galán et al, 2001) se puso de manifiesto que la morfología y distribución de las arenas cuaternarias no eran homogéneas a lo largo del territorio, sino que existían zonas con mayores y menores espesores. Concretamente, se identificaron dos regiones hidrogeológicamente muy favorables que podían actuar como depósitos naturales para almacenar las aguas derivadas del río Cega: una estructura denominada *paleoforma* situada en el interior de la zona regable, y una estructura denominada *zona almacén* situada en el sector oriental de la comarca (figura 2).

Tras este primer trabajo, entre otras cuestiones, surgió la necesidad de conocer con exactitud cuáles eran los volúmenes que se podían gestionar en estas estructuras, ya que en una primera aproximación se llegó a la conclusión de que el espacio que quedaba en el acuífero tras la campaña de riegos, no era

suficiente para albergar el agua demandada por la Comunidad de Regantes El Carracillo. De hecho, la depresión significativa del nivel piezométrico sólo se produce en la *paleoforma*, que es donde se localizan la mayoría de las explotaciones para regadío en el acuífero superficial. El resto de las explotaciones captan el acuífero terciario, de mucha peor calidad. Por su parte, en la *zona almacén*, actualmente no hay extracciones.

En consecuencia durante los 5 años siguientes, se hizo un seguimiento exhaustivo del comportamiento piezométrico del acuífero, además de analizar con detalle cada una de las acciones externas que influyen directamente sobre él, como la recarga natural, los bombeos o el paso de aguas superficiales a través de los cauces.

Paralelamente, en el año 2004 se realizó una derivación piloto desde el río Cega en los primeros puntos

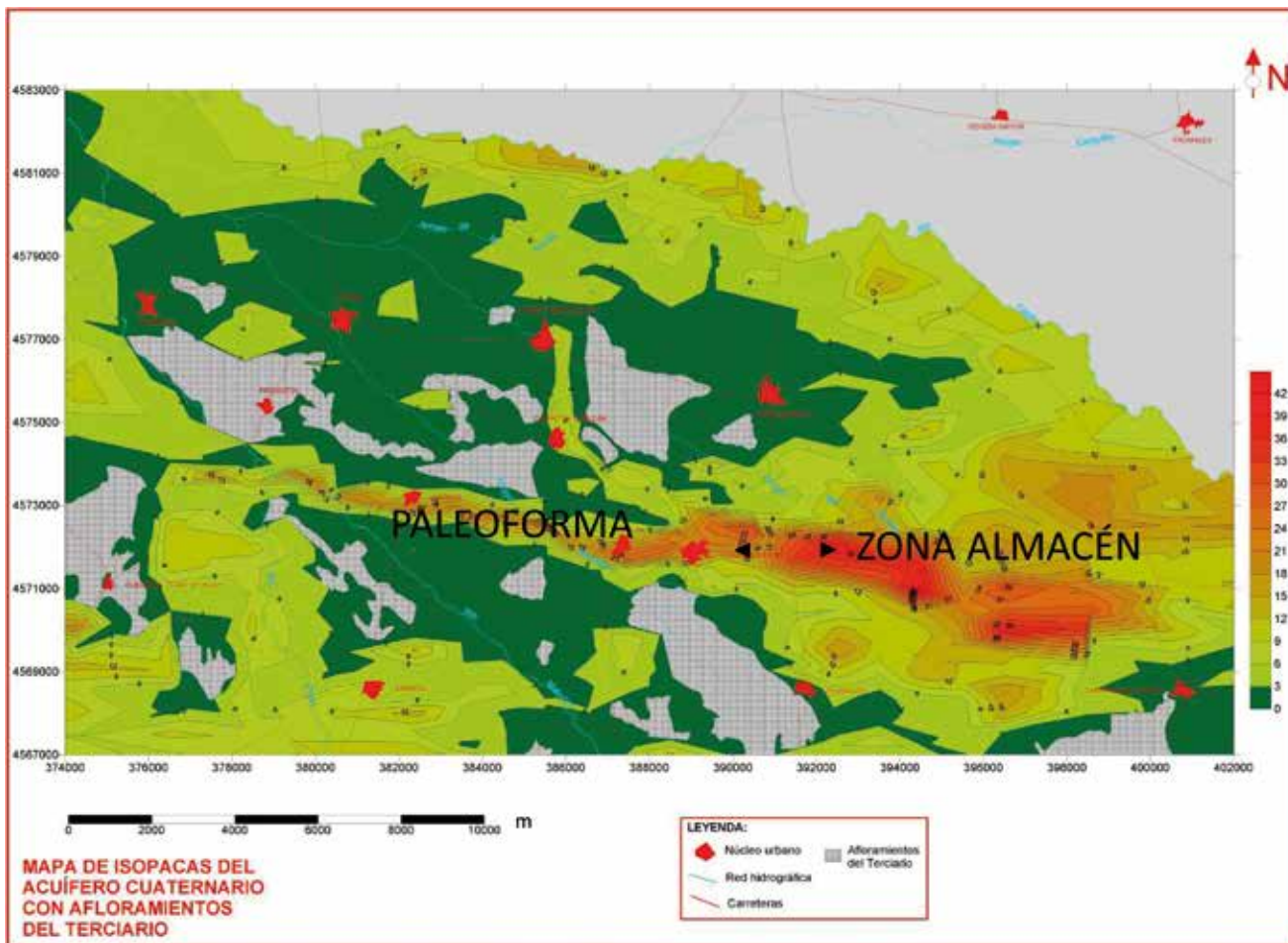


Figura 2. Mapa de isopacas del acuífero cuaternario con afloramientos del Terciario. Situación de zona almacén y paleoforma.
Figure 2. Isopach map of the quaternary aquifer with tertiary outcrops. Situation of the paleo-landform area and the storage area.

de descarga ya construidos desde la tubería principal, por lo que fue posible valorar los efectos de dicha recarga a través de la toma de datos en campo.

Objetivos

El objetivo fundamental de los trabajos expuestos en este artículo, ha sido conocer con exactitud cuáles son los volúmenes máximos y mínimos que pueden ser gestionados en la *paleoforma*, o porción del acuífero cuaternario superficial situado al oeste de la coordenada UTM X= 392 000 (European Datum 1950 Huso 30), aproximadamente coincidente con la zona situada al oeste del trazado de la carretera N601 de Valladolid a Segovia, en la coordenada UTM Y = 4573 000.

Conociendo con exactitud la capacidad de la *paleoforma*, en función de los condicionantes de cada año hidrológico (situación piezométrica al inicio de la

campana, recarga adicional por lluvia útil, etc.) se podrá predecir el volumen de agua que será necesario recargar a través de los dispositivos diseñados, aprovechando la capacidad disponible en cada momento y evitando encharcamientos.

Trabajos realizados

Seguimiento piezométrico durante seis años hidrológicos (de 1999/2000 a 2004/2005)

Para conocer la evolución de los niveles en el acuífero cuaternario, objetivo de la recarga artificial, a finales de 1999 se definió una red de control piezométrico a partir del inventario de puntos de agua. Se seleccionaron un total de 59 puntos, todos ellos pozos privados. La primera superficie piezométrica, realizada para noviembre de 1999, confirmó que se trataba de un acuífero bastante homogéneo.

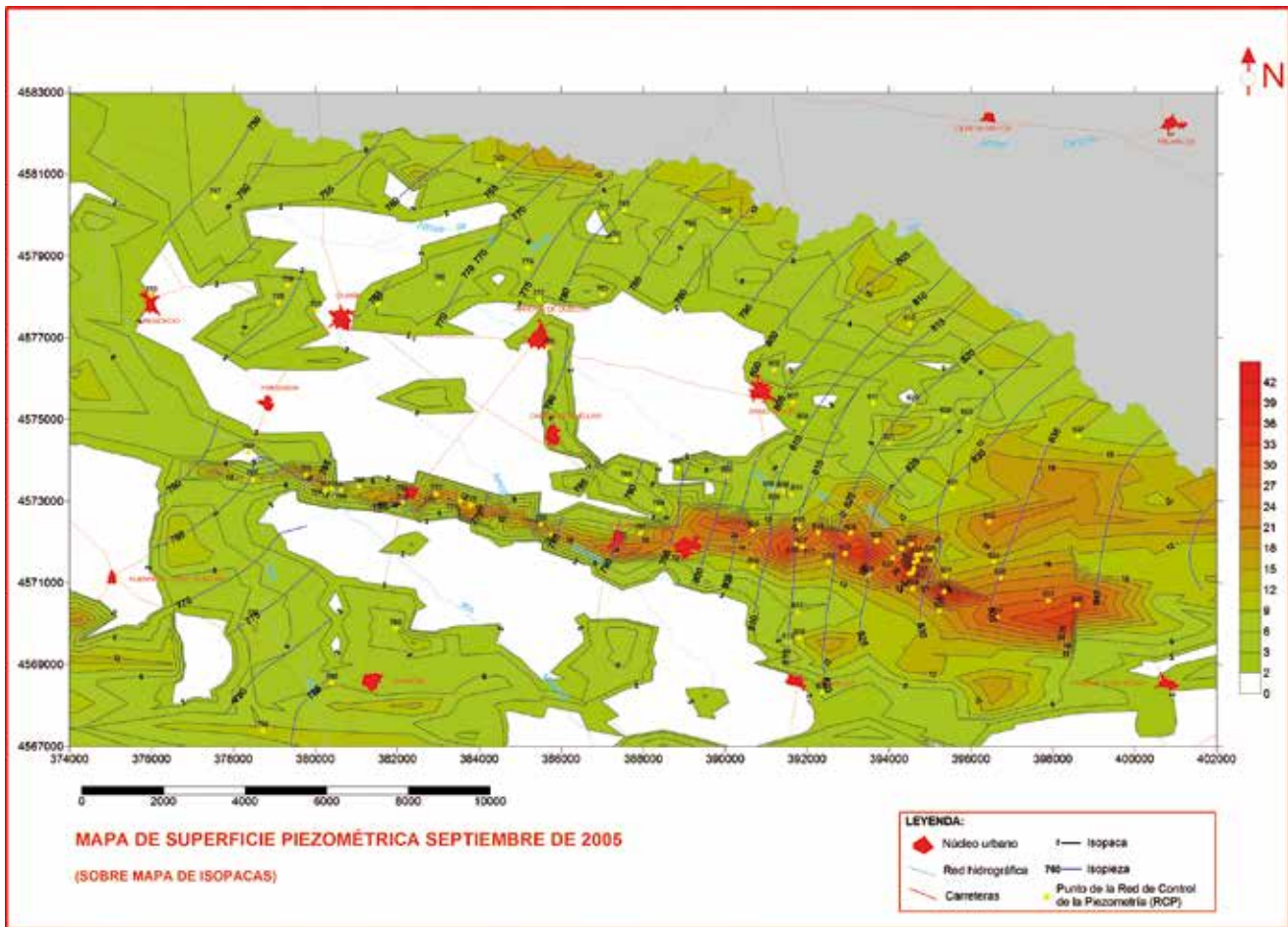


Figura 3. Mapa de superficie piezométrica correspondiente a septiembre de 2005.
Figure 3. Map of the piezometric surface in September 2005.

La red de control piezométrico se fue incrementando con los sondeos de investigación hidrogeológica y de testigo continuo construidos durante el proyecto, hasta los 128 puntos en junio de 2005.

Se midió cada cuatro meses (febrero-marzo, mayo-junio y septiembre-octubre) desde febrero de 2000 hasta septiembre de 2005. De esta forma, se pudo conocer la piezometría del acuífero cuaternario en época de aguas altas, antes del riego y después del riego.

Los mapas resultantes muestran, en todos los casos, dos direcciones principales de flujo: una E-O a lo largo de la *paleoforma* y otra, SE-NO en la margen izquierda del río Cega y en el entorno del río Pirón (figura 3). Esta diferenciación se debe al afloramiento o proximidad del sustrato impermeable en el área central que desconecta ambas zonas. También reflejan niveles piezométricos más altos en febrero, debido a que las extracciones son casi inexistentes en esta época y el acuífero se recarga ligeramente por las precipitaciones. En cambio, en septiembre los niveles bajan coincidiendo con el final de la época de

riego y los meses más secos. Además, las variaciones piezométricas son más acentuadas en el entorno de la *paleoforma*, donde se encuentran las poblaciones de Narros de Cuellar y Chatún, por las concentraciones de bombeos.

Por su parte, los mapas de isoprofundidades del nivel piezométrico (figura 4) muestran la existencia de dos zonas diferenciadas:

- Superior a 6 m: coincidente con las dunas eólicas de la zona oriental del acuífero donde la cota topográfica es más alta, la parte noroccidental de la margen izquierda del río Cega y las poblaciones de Narros de Cuellar y Chatún, donde el nivel piezométrico está afectado por los bombeos.
- Inferior a 6 m: en las poblaciones de Sanchonuño, Gomezserracín y norte de Arroyo de Cuellar, donde las extracciones son menos intensas y el nivel piezométrico se encuentra en régimen natural.

En Narros de Cuellar se observa la relación entre la piezometría y la intensidad de los bombeos, des-

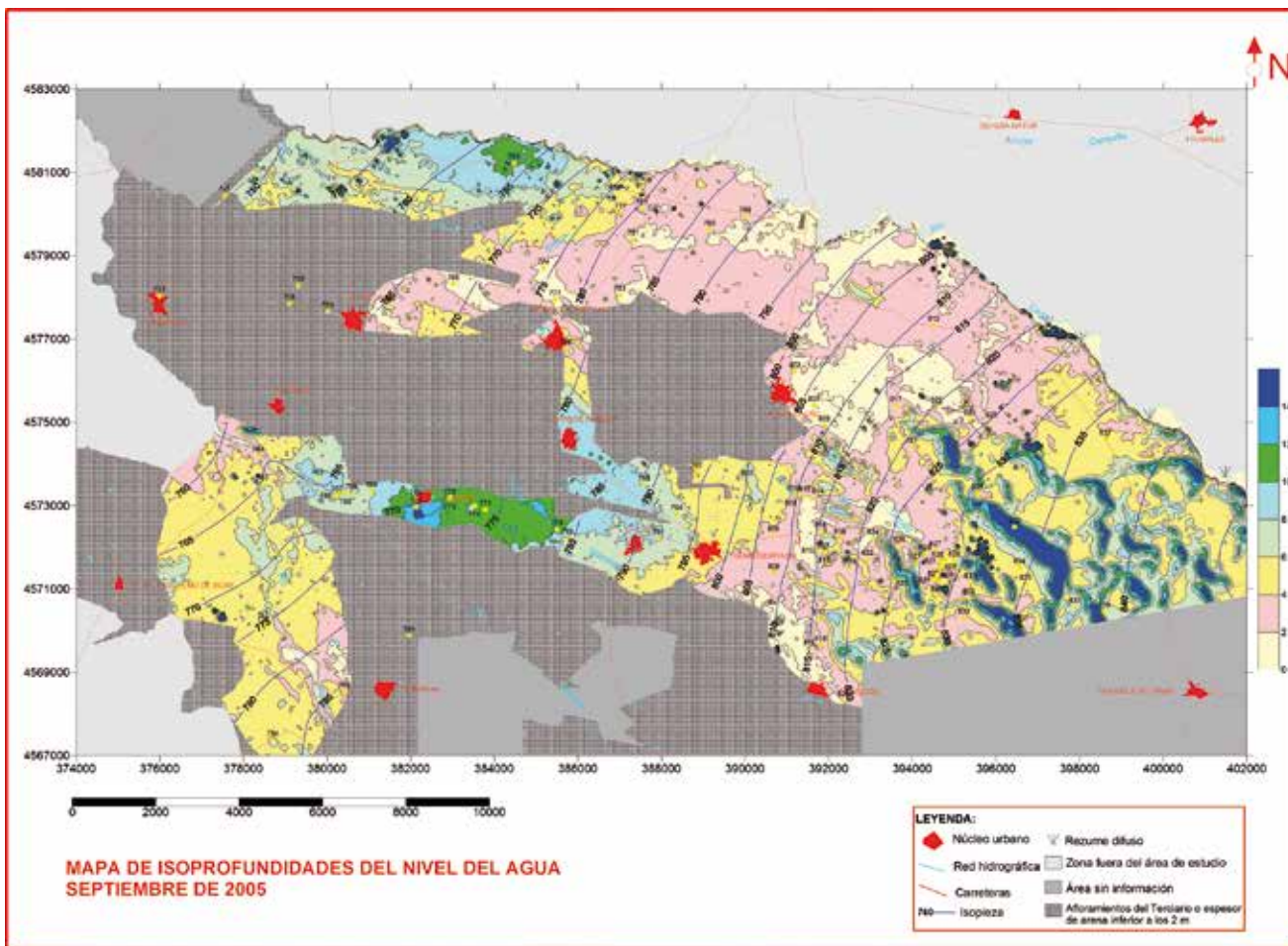


Figura 4. Mapa de isopropfundidades del nivel piezométrico correspondiente a la campaña de septiembre de 2005.
Figure 4. Isodepth map of the piezometric level in September 2005.

ciendo los niveles después de verano, cuando las extracciones son más importantes.

En la zona oriental los niveles apenas varían a lo largo del año, lo que implica que los descensos en la zona final de la *paleoforma*, no afectan a la zona de cabecera.

Balances hídricos en la "paleoforma". Ajustes de la porosidad eficaz

Conocer los diferentes volúmenes de agua que recibe el acuífero de forma natural, es fundamental a la hora de planificar la recarga en la *paleoforma*.

Con este objetivo se realizó un estudio de lluvia útil para los años hidrológicos 2000/2001, 2001/2002, 2002/2003, 2003/2004 y 2004/2005. Como primer paso, a partir de los datos de lluvia y evapotranspiración, datos de usos del suelo y datos edafológicos, se determinó el excedente hídrico, definido como la cantidad de lluvia caída sobre el acuífero que pasa a

formar parte de la escorrentía, sea superficial o subterránea. En segundo lugar, una vez conocido el excedente hídrico, se determinó la escorrentía superficial y la subterránea aplicando diferentes coeficientes de escorrentía en función de las características del terreno y de la vegetación.

Se analizaron los datos meteorológicos registrados entre octubre de 2000 y marzo de 2005 en la estación completa de Gomezerración (SG01), perteneciente a la red SIAR del Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, y que también aporta los datos de evapotranspiración por Penman-Monteith.

Los datos de uso del suelo se obtuvieron de dos fuentes, por un lado de tres mapas de cultivos y aprovechamientos a escala 1:50 000 editados por el Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente, a partir de los cuales se discriminó entre zonas de bosque, cultivos y pastizales. Por otro lado, se contó con el elenco de regadíos realizado para el proyecto

de recarga, con el que se discriminaron los tipos de cultivo. A cada uso del suelo se asignó un coeficiente de cultivo o Kc.

Los datos edafológicos se obtuvieron a partir de los análisis de muestras de suelos realizados por la Junta de Castilla y León (1994) que sirvieron para la estimación de la reserva máxima o capacidad total de retención de agua en el suelo (Ro).

Finalmente, para el establecimiento de los coeficientes de escorrentía se consultaron diversas fuentes, hasta elegir los establecidos por Marsh, W. en 1978, datos seleccionados por el MOPU en 1992.

El resultado final de estos trabajos se muestra en la tabla 1. Los excedentes hídricos y las entradas al acuífero estimadas en la zona de la *paleoforma* (28.11 km²) para el cultivo herbáceo varían entre 0.58 y 4.86 hm³/a.

Otro factor que influye en el balance hídrico de la *paleoforma* es la entrada de agua subterránea desde el sector oriental (*zona almacén*). Se utilizó para su cálculo la metodología clásica, a partir de la sección de corte saturada del acuífero y del gradiente hidráulico. Se usó el modelo matemático elaborado en el año 2001 (Galán et al, 2001), utilizando el perfil de una

Volumen de lluvia útil que llega a la paleoforma: año hidrológico 2000-2001 (hm ³)													
Uso del suelo	Oct-00	Nov-00	Dec-00	Jan-01	Feb-01	Mar-01	Apr-01	May-01	Jun-01	Jul-01	Aug-01	Sep-01	Total
Cultivos Herbáceos	0.00	0.32	1.11	2.17	0.17	1.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.86
Pastizales	0.00	0.45	1.39	2.75	0.18	1.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.04
Coníferas	0.00	0.40	1.39	2.75	0.18	1.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.07
Volumen de lluvia útil que llega a la paleoforma: año hidrológico 2001-2002 (hm ³)													
Uso del suelo	Oct-01	Nov-01	Dec-01	Jan-02	Feb-02	Mar-02	Apr-02	May-02	Jun-02	Jul-02	Aug-02	Sep-02	Total
Cultivos Herbáceos	0.00	0.00	0.00	0.37	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58
Pastizales	0.00	0.00	0.00	0.47	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.58
Coníferas	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.59
Volumen de lluvia útil que llega a la paleoforma: año hidrológico 2002-2003 (hm ³)													
Uso del suelo	Oct-02	Nov-02	Dec-02	Jan-03	Feb-03	Mar-03	Apr-03	May-03	Jun-03	Jul-03	Aug-03	Sep-03	Total
Cultivos Herbáceos	0.00	0.52	0.86	1.65	0.32	0.07	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.55
Pastizales	0.00	0.73	1.05	2.07	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.21
Coníferas	0.00	0.66	1.05	2.07	0.36	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.32
Volumen de lluvia útil que llega a la paleoforma: año hidrológico 2003-2004 (hm ³)													
Uso del suelo	Oct-03	Nov-03	Dec-03	Jan-04	Feb-04	Mar-04	Apr-04	May-04	Jun-04	Jul-04	Aug-04	Sep-04	Total
Cultivos Herbáceos	0.00	0.86	0.34	0.42	0.21	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.36
Pastizales	0.00	1.16	0.40	0.50	0.22	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.80
Coníferas	0.00	1.09	0.40	0.50	0.22	0.60	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	2.93
Volumen de lluvia útil que llega a la paleoforma: año hidrológico 2004-2005 (hm ³)													
Uso del suelo	Oct-04	Nov-04	Dec-04	Jan-05	Feb-05	Mar-05	Apr-05	May-05	Jun-05	Jul-05	Aug-05	Sep-05	Total
Cultivos Herbáceos	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							0.00
Pastizales	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							0.00
Coníferas	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							0.00

Tabla 1. Volúmenes de recarga a partir de la precipitación en *paleoforma*.
Table 1. Volumes of recharge from precipitation in the *paleo-landform area*.

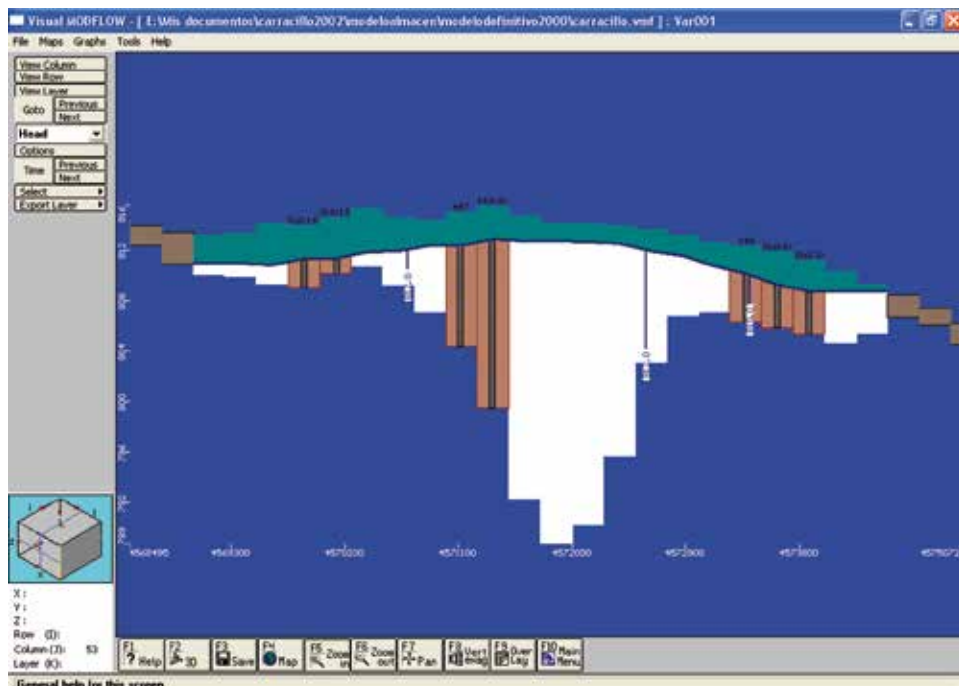


Figura 5. Sección mojada utilizada para el cálculo de la entrada por parte de la zona almacén.

Figura 5. Wet cross sectional area used for the calculation of the incomes from the storage area.

de sus columnas que define el contacto occidental de la paleoforma con la zona almacén (figura 5). En esta zona la piezometría apenas varía, pudiendo considerarse la superficie mojada en este entorno constante durante los años de estudio. Se estimó un volumen de entrada lateral de aproximadamente 0,13 hm³/mes.

Un tercer factor que influyó en el balance hídrico fue la recarga artificial realizada en la totalidad del acuífero durante los meses de enero, febrero, marzo y

abril de 2004. En total, se derivó un volumen de 5.46 hm³ lo que supuso un aporte extra al sistema. Para cuantificar la parte del volumen derivado que se infiltra, se realizaron, en cada uno de estos meses, una serie de aforos directos en los cauces por donde circulaban las aguas derivadas del río Cega (figura 6).

Tras el análisis de los datos de aforo, se obtuvieron los volúmenes mensuales de recarga al acuífero de El Carracillo en el sector de la paleoforma (tabla 2).

	Febrero 2004	Marzo 2004	Abril 2004
Caudal infiltrado (l/s) a través de derivación 1	260.51	239.22	92.32
Caudal infiltrado (l/s) a través de derivación 2	119.02	171.26	82.68
Caudal infiltrado (l/s) a través de derivación 3	138.10	81.17	108.90
Caudal infiltrado (l/s) a través de derivación 4	29.30	7.08	22.70
Caudal infiltrado (l/s) a través de derivación 5	2.18	12.87	6.73
Caudal infiltrado (l/s) total recarga artificial	549.11	511.60	313.33
Volúmen infiltrado en el mes (hm³) total recarga artificial	1.38	1.37	0.81
Caudal infiltrado (l/s) a través de arroyo marieles	0.00	23.45	9.76
Caudal infiltrado (l/s) a través de río malucas	0.40	12.98	23.22
Caudal infiltrado (l/s) a través de río pirón	--	22.62	--
Caudal infiltrado (l/s) total recarga artificial + aportes superficiales	549.51	570.65	346.31
Volúmen infiltrado en el mes (hm³) total recarga artificial+ aportes superficiales	1.38	1.53	0.90

Tabla 2. Caudales y volúmenes mensuales infiltrados en la paleoforma durante la recarga de 2004.
Tabla 2. Monthly flows and volumes infiltrated during the recharge of the paleo-landform area in 2004.

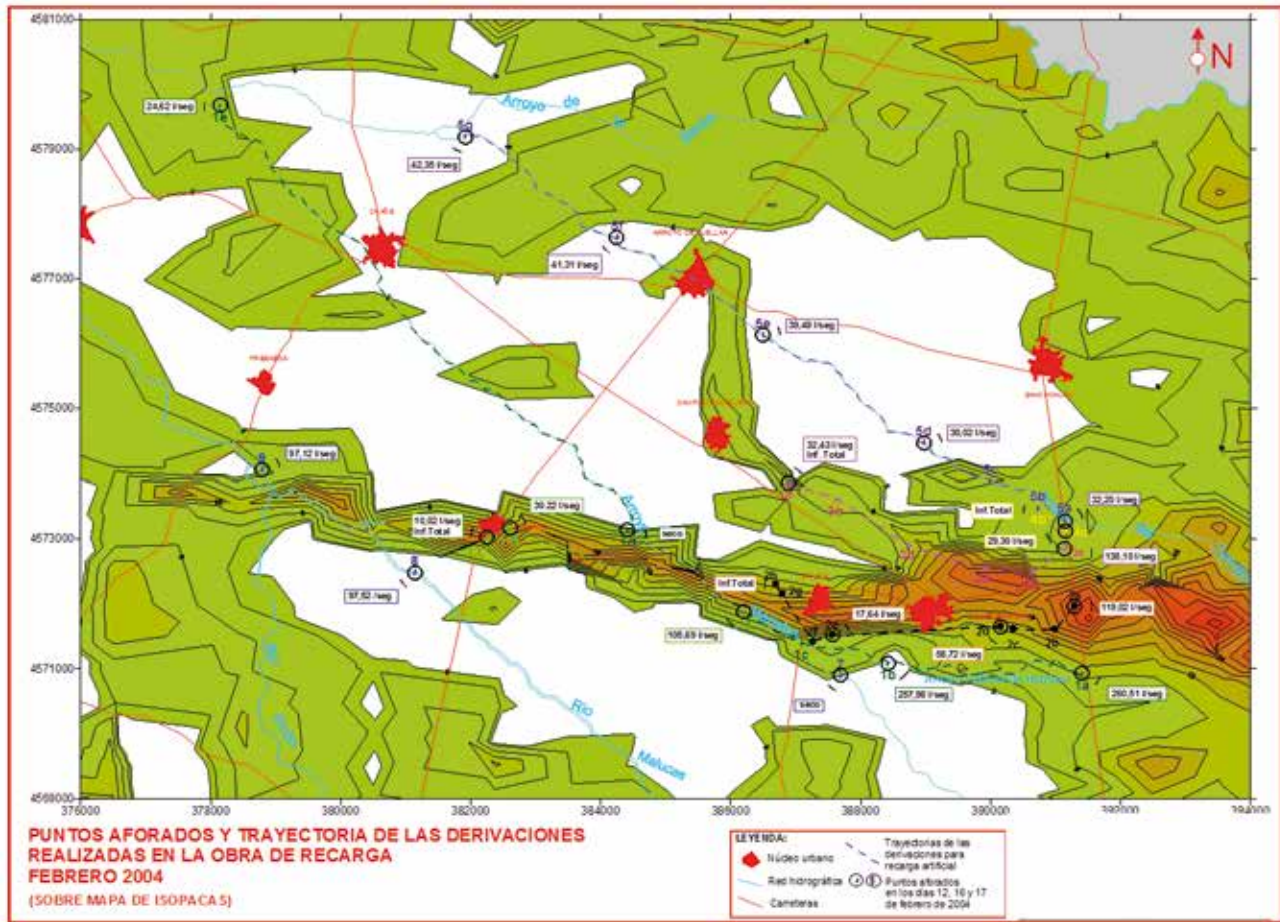


Figura 6. Puntos aforados y trayectorias de las derivaciones en febrero de 2004.
Figure 6. Points of pumping and trajectories of derivations in February 2004.

Volúmenes recargados-descargados en paleoforma (hm ³)						
Campañas piezométricas	Porosidad eficaz 15%	Lluvia útil	Recarga	Entradas laterales (0.3 hm ³ /mes)	Balance	Consumos
Febrero 2001-septiembre 2000	8.84	3.60		1.50	3.74	
Mayo 2001-febrero 2001	2.71	1.26		0.45	1.00	
Septiembre 2001-mayo 2001	-9.14			1.20		-10.34
Marzo 2002- septiembre 2001	4.21	0.58		1.50	2.13	
Junio 2002-marzo 2002	-1.05			0.90		-1.95
Septiembre 2002-junio 2002	-7.63			1.20		-8.83
Febrero 2003-septiembre 2002	10.49	3.34		1.50	5.65	
Junio 2003-febrero 2003	0.74	0.00		0.90	-0.16	
Septiembre 2003-junio 2003	-7.07			1.20		-8.27
Marzo 04-septiembre 03	10.22	1.83	2.76	1.50	4.13	
Mayo 04-marzo 04	3.74	0.52	2.18	0.90	0.14	
Septiembre 04-mayo 04	-10.69			1.20		-11.89
Marzo 05- septiembre 04	4.61	0.00		1.65	2.96	

Tabla 3. Volúmenes estimados para una porosidad eficaz del 15%.
Table 3. Volumens estimated for an effective porosity of 15%.

Una vez cuantificados los volúmenes de entrada a la *paleoforma* a partir del sumatorio de la lluvia útil, aportes laterales y recarga artificial, era necesario contrastarlos con las variaciones observadas en los niveles piezométricos y la capacidad de almacenamiento definida previamente para este sector del acuífero.

Utilizando el programa *Surfer*, se calculó el volumen de agua que suponía la variación de nivel piezométrico a partir de la porosidad eficaz obtenida en las primeras versiones del modelo matemático del año 2001 (15 %). Comparando ambos datos, los obtenidos por recargas al acuífero y los estimados por sustracción de superficies piezométricas, se comprobó que no se daba un adecuado ajuste en el balance (Tabla 3). Además, las extracciones obtenidas en el cómputo de superficies piezométricas para los meses de verano también superaban las estimadas por los elencos de regadío.

Si bien es verdad que en este balance quedaría por introducir el volumen de agua que puede infiltrarse a través de los arroyos y ríos que atraviesan la *paleoforma*, según los cálculos realizados éste no superaría en los meses sin riego el valor de 1 hm³.

Así, aún teniendo en cuenta la posible entrada por parte de los ríos, la diferencia entre los volúmenes calculados y medidos es considerable. La diferencia no sólo está en los años donde únicamente existe recarga natural, sino también en el invierno de 2004 donde se procedió a la recarga artificial. Como consecuencia, se replanteó la revisión de la porosidad eficaz en el entorno de la *paleoforma*.

Para dicho cometido se seleccionaron los sondeos a testigo continuo ubicados en esta zona (*Galán et*

al, 2001). De los 122.6 m perforados en sedimentos cuaternarios, 85.6 m corresponderían a arenas más o menos limpias y 37 m a arenas arcillosas y arcillas. A partir de estos datos se obtiene que el 69.86 % de la *paleoforma* está constituido por arenas y el 30.14 % por arenas arcillosas y arcillas.

El porcentaje arcilloso es lo suficientemente importante como para tomarlo en cuenta a la hora de estimar la porosidad eficaz del entorno de la *paleoforma*. Faltaría asignarle entonces un valor de porosidad eficaz a cada una de estas litologías. En el caso de las arenas, el valor está lo suficientemente contrastado, y se estima en 15 %. Para las arenas arcillosas y arcillas se asignó una porosidad media del 2 %. Por tanto la porosidad eficaz media en el conjunto de la formación de la *paleoforma* se reduciría al 11 % utilizando un cálculo aritmético. Sin embargo, los materiales finos suelen dominar el tipo de permeabilidad por lo que el valor aritmético debe ser tomado como valor de acotación máximo dentro de un rango de valores.

Con esta nueva porosidad eficaz, se realizó otra vez una comparación entre los volúmenes estimados para las variaciones piezométricas entre campañas en el sector de la *paleoforma* y los volúmenes obtenidos de la suma de los excedentes hídricos, recarga artificial y entradas laterales subterráneas (tabla 4).

Las diferencias obtenidas entre ambos métodos se reducen de forma considerable. El ajuste es mucho mejor que el obtenido para la porosidad del 15 %. No obstante, y ante la evidencia de que la porosidad eficaz debía ser reducida, se continuó buscando el óptimo de forma que la diferencia sea la menor posible,

Volúmenes recargados-descargados en paleoforma (hm ³)						
Campañas piezométricas	Porosidad eficaz 11 %	Lluvia útil	Recarga	Entradas laterales (0.3 hm ³ /mes)	Balance	Consumos
Febrero 2001-Septiembre 2000	6.48	3.60		1.50	1.38	
Mayo 2001-Febrero 2001	1.99	1.26		0.45	0.28	
Septiembre 2001-Mayo 2001	-6.70			1.20		-7.90
Marzo 2002- Septiembre 2001	3.09	0.58		1.50	1.01	
Junio 2002-Marzo 2002	-0.77			0.90		-1.67
Septiembre 2002-Junio 2002	-5.60			1.20		-6.80
Febrero 2003-Septiembre 2002	7.69	3.34		1.50	2.85	
Junio 2003-Febrero 2003	0.54	0.00		0.90	-0.36	
Septiembre 2003-Junio 2003	-5.18			1.20		-6.38
Marzo 04-Septiembre 03	7.49	1.83	2.76	1.50	1.40	
Mayo 04-marzo 04	2.74	0.52	2.18	0.90	-0.86	
Septiembre 04-mayo 04	-7.84			1.20		-9.04
Marzo 05- septiembre 04	3.38	0.00		1.65	1.73	

Tabla 4. Volúmenes estimados para una porosidad eficaz del 11%.

Table 4. Volumes estimated for an effective porosity of 11%.

Volúmenes recargados-descargados en paleoforma (hm ³)						
Campañas piezométricas	Porosidad eficaz 9 %	Lluvia útil	Recarga	Entradas laterales (0.3 hm ³ /mes)	Balance	Consumos
Febrero 2001-Septiembre 2000	5.30	3.60		1.50	0.20	
Mayo 2001-Febrero 2001	1.63	1.26		0.45	-0.08	
Septiembre 2001-Mayo 2001	-5.48			1.20		-6.68
Marzo 2002- Septiembre 2001	2.53	0.58		1.50	0.45	
Junio 2002-Marzo 2002	-0.63			0.90		-1.53
Septiembre 2002-Junio 2002	-4.58			1.20		-5.78
Febrero 2003-Septiembre 2002	6.29	3.34		1.50	1.45	
Junio 2003-Febrero 2003	0.44	0.00		0.90	-0.46	
Septiembre 2003-Junio 2003	-4.24			1.20		-5.44
Marzo 04-Septiembre 03	6.13	1.83	2.76	1.50	0.04	
Mayo 04-marzo 04	2.24	0.52	2.18	0.90	-1.36	
Septiembre 04-mayo 04	-6.41			1.20		-7.61
Marzo 05- septiembre 04	2.77	0.00		1.65	1.12	

Tabla 5. Volúmenes estimados para una porosidad eficaz del 9%.

Table 5. Volumes estimated for an effective porosity of 9%.

consiguiendo un buen ajuste entre ambos métodos para las épocas de llenado e igualmente un ajuste sobre las extracciones de la *paleoforma* durante el periodo de bombeos.

El dato obtenido con una porosidad eficaz del 11 % arroja extracciones por bombeo entre 6.38 y 9.04 hm³. Las extracciones de 6.38 hm³ son las obtenidas en el verano de 2003. Durante este año hidrológico las precipitaciones primaverales fueron muy abundantes por lo que el riego se redujo en gran medida y por tanto, las variaciones piezométricas en la época estival fueron las menores de todos los años de estudio.

En el proyecto de 2001, se estimaron unas extracciones de 6,5 hm³ para el año 1999-2000. Ese año fue especialmente seco y las variaciones piezométricas muy acusadas. Esto llevó a pensar que la porosidad eficaz todavía estaba ligeramente sobrevalorada.

Según las apreciaciones expuestas se buscó, ya de forma inferida, el óptimo valor de la porosidad eficaz el cual está ligeramente por debajo del dato estimado. El ajuste más fino se produce con una porosidad eficaz del 9 % (tabla 5).

Las diferencias obtenidas son ya muy pequeñas y perfectamente asumibles, si se tiene en cuenta que todavía queda un factor por incorporar en las épocas invernales: la entrada por infiltración de arroyos y ríos que atraviesan la *paleoforma*.

Las extracciones con esta porosidad eficaz durante el verano ya están entre 5.44 y 7.61 hm³, lo que se corresponde mucho más con las extracciones estimadas en el proyecto de 2001.

Resultados y discusión: cálculo de los volúmenes de agua a gestionar

A partir de los datos históricos recopilados desde el año 1999 hasta el 2005, se han calculado los volúmenes de agua que pueden ser gestionados en la *paleoforma*, clasificándolos como volumen máximo, volumen mínimo y volumen medio gestionable.

Como volumen máximo de agua gestionable se puede hablar del que podría introducirse cuando la situación del nivel piezométrico inicial fuera muy desfavorable (septiembre de 2002) y los excedentes hídricos prácticamente inexistentes (año hidrológico 2001-2002, 0.58 hm³). En este caso, se podrían introducir en la *paleoforma* 8.24 hm³.

El volumen mínimo de agua gestionable sería el que se podría introducir en un año en el que se aplicó recarga artificial en el periodo anterior (septiembre de 2004) y los excedentes hídricos son máximos como consecuencia de las lluvias acontecidas (año hidrológico 2000-2001, 4.86 hm³). En este caso, la *paleoforma* quedaría completamente recargada de forma natural, por lo que no sería necesario realizar la recarga artificial.

En los seis años de seguimiento hidrogeológico no se ha producido ninguna de estas dos situaciones, pero sí conviene tener presente que la recarga artificial puede moverse en estos márgenes.

El volumen medio gestionable puede establecerse en una situación piezométrica inicial media, como puede ser septiembre de 2003, y una recarga por parte de la precipitación también media, como es el año hidrológico 2002-2003, con 2.36 hm³ de excedente. En este caso,

la *paleoforma* podría recargarse (siempre que la recarga artificial se realice de la forma más óptima) con 3.64 hm³.

Conclusiones

A la hora de planificar los volúmenes a derivar desde el río Cega para la recarga artificial mes a mes en la *paleoforma*, se hace imprescindible el conocimiento en detalle de las características hidrogeológicas del medio, su funcionamiento hidrodinámico, así como la cuantificación de los términos del balance hídrico del sector acuífero que se pretende recargar. Una vez establecidos y parametrizados todos los factores implicados, para evitar excesos o déficits de agua en cada año hidrológico, sólo será necesario conocer dos aspectos: por un lado, la situación piezométrica del acuífero a comienzos del año hidrológico, para lo que bastaría con realizar una campaña de control piezométrico, a finales de septiembre o principios de octubre del año en cuestión, y por otro lado, conocer la lluvia útil que llega al acuífero de forma mensual. Gracias a la rápida adquisición de datos hidrológicos actualizados que permite la red SIAR y al establecimiento de la metodología expuesta en este trabajo, es posible determinar mes a mes los volúmenes que van entrando al acuífero por lluvia útil. Con esta información, es posible informar de la capacidad de almacenamiento de la *paleoforma* al final de cada mes y, por tanto, determinar los caudales que deben ser derivados desde el río Cega.

También se han establecido los valores máximos, mínimos y medios de los volúmenes de agua a gestionar mediante recarga artificial en la zona de la *paleoforma*. A este respecto, es importante mencionar el caudal concedido del río Cega para la recarga artificial. En un año medio, podrían derivarse en torno a 14 hm³. Si en la *paleoforma* los volúmenes máximos y mínimos de agua a gestionar están entre 0 y 8.24 hm³ respectivamente, existe un sobrante de agua que puede variar entre 14 y 5.76 hm³. La media de este sobrante se puede también fijar también en torno a 10 hm³.

Este exceso de agua es propuesto para ser gestionado en la parte oriental del acuífero (*zona almacén*).

Referencias

- Galán López, R., López Mendieta, F., Martínez Rubio, J., Macías Antequera, C., Galán Martínez, G. 2001. Recarga artificial del acuífero de Los Arenales en la comarca de "El Carracillo" (Segovia). 1ª Parte, Soporte físico. VII Simposio de Hidrogeología, Murcia. Tomo XXIV.
- Galán López, R., López Mendieta, F., Martínez Rubio, J., Macías Antequera, C., Galán Martínez, G. 2001. Recarga artificial del acuífero de Los Arenales en la comarca de "El Carracillo" (Segovia). 2ª Parte, Hidrología Subterránea. VII Simposio de Hidrogeología, Murcia. Tomo XXIV.
- Galán López, R., López Mendieta, F., Martínez Rubio, J., Macías Antequera, C. 2010. Los regadíos y la gestión integral de los recursos hídricos en el acuífero de Los Arenales, comarca de El Carracillo (Segovia). Jornadas técnicas de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas para Riego.
- Junta de Castilla y León 1994. Formación de un mapa de aptitud edáfica a escala 1:50.000, para regular la fertilización de los suelos con subproductos ganaderos de la provincia de Segovia.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación - Grupo TRAGSA 2001. Proyecto de investigación hidrogeológica y obras de apoyo para la definición del acuífero de los arenales en la comarca de "El Carracillo": (Segovia).
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación - Grupo TRAGSA 2002. Proyecto de Recarga del Sector Occidental del Acuífero de Los Arenales en la Comarca del Carracillo (Segovia).
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación - Grupo TRAGSA 2005. Asistencia Técnica para la gestión de los recursos hídricos en el acuífero de El Carracillo (Segovia).
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación- Grupo TRAGSA 2006. Actualización del modelo matemático de flujo subterráneo hasta octubre de 2005 (periodo de simulación de octubre de 2000 a octubre de 2005).

Recibido: mayo 2013

Revisado: julio 2013

Aceptado: agosto 2013

Publicado: junio 2014

