

Propuestas para la detección y corrección de impactos producidos por procesos colmatantes en el dispositivo de recarga artificial de la cubeta de Santiuste (Segovia)

E. Fdez. Escalante⁽¹⁾, J. M. García⁽²⁾ y M. J. Minaya⁽³⁾

(1) Tragsa I+D+i. C/ Julián Camarillo 6B. 28.037, Madrid. España.
efernan6@tragsa.es

(2) Tragsa Internacional. Av. de España 2044. Asunción, Paraguay.
jgarci36@tragsa.es

(3) Tragsatec. C/ Julián Camarillo 6A. 28.037, Madrid. España.
mjmo@tragsa.es

RESUMEN

DINA-MAR es un proyecto de I+D+i desarrollado en el Grupo Tragsa que aborda, entre otras líneas de acción, aspectos operativos de la recarga artificial a partir de estudios en zonas piloto. Durante los seis años de operatividad de los dispositivos de recarga artificial de acuíferos o *Managed Aquifer Recharge* (en adelante MAR) construidos por el Ministerio de Agricultura (MAPA) y la Junta de Castilla y León (JCL) en dos sectores del acuífero de los Arenales: La Cubeta de Santiuste y comarca del Carracillo (Segovia), se ha llevado a cabo un seguimiento simultáneo a la recarga artificial, estudiando la efectividad, en cuanto al volumen de agua infiltrado, de los dispositivos (en especial balsas y canales). Este seguimiento ha permitido diseñar e implementar mejoras encaminadas a incrementar la tasa de infiltración, reducir la entrada de aire al acuífero y minimizar la colmatación en acuíferos arenosos, progresando hacia diseños de mayor eficiencia en el marco de la gestión hídrica para el regadío. Algunas de estas mejoras son aplicables a la obra civil, otras son puramente operativas. En este artículo se exponen algunos de los impactos detectados y se justifican las mejoras llevadas a cabo. Algunas de ellas constituyen criterios técnicos novedosos aplicables a otros acuíferos análogos.

Palabras clave: DINA-MAR, gestión de la recarga de acuíferos (MAR), recarga artificial, balsas, canales, colmatación, tasa de infiltración

Proposal for the detection and correction of impacts produced by clogging processes in the cubeta de Santiuste artificial recharge facilities (Segovia, Spain)

ABSTRACT

DINA-MAR is a R&D+i project supported by Tragsa Group. The main action line, among others, is to determine operative aspects of artificial recharge by means of specific studies on pilot areas. Artificial recharge devices built at Los Arenales aquifer by the Spanish Ministry of Agriculture and Junta de Castilla y León have been monitored during the last six years, in special Santiuste basin and Carracillo area (Segovia province). In this period several parameters have been controlled during artificial recharge operations, in order to study the effectiveness of the devices in relation to seepage rate (in special infiltration ponds and channels). It has led to improved designs and works for sandy aquifers derived from experience, suitable to increase infiltration rate, and to decrease the trapped air into the aquifer and clogging effects. In this way, we are progressing towards high efficiency designs in the frame or irrigation water management. Some of these improvements are applicable on civil building works; others are operative aspects of artificial recharge. In this paper some of the detected impacts and the improvements carried out are exposed and justified. Some of them could be considered new technical criteria willing for analogous aquifers.

Key words: Artificial recharge, DINA-MAR, Managed Aquifer Recharge (MAR), infiltration ponds, channels, clogging, infiltration rate

Introducción y objetivos

DINA-MAR es un proyecto de I+D+i realizado en el Grupo Tragsa por un equipo pluridisciplinar (involucra a 12 investigadores de ocho titulaciones diferentes y siete áreas del Grupo). El proyecto cuenta con

cuatro años de andadura, y, en líneas generales, pretende identificar las zonas de España más susceptibles para la gestión de la recarga de acuíferos (que se han designado "zonas MAR"), teniendo en consideración condicionantes de diversa índole (técnicos, económicos, etc.), así como el tipo de dispositivo más

idóneo para cada zona. Objetivos adicionales son la elaboración de una metodología para detectar impactos en estas actuaciones y para estudiar la afección en las fuentes de toma (en general, ríos), impactos sobre la hidrogeología urbana, posibilidades de regeneración hídrica de zonas húmedas degradadas, etc. La tercera y principal línea de acción es introducir mejoras en el diseño de los dispositivos para aumentar su efectividad. Por último se planifica un plan de divulgación y educación ambiental (DINA-MAR, 2009). Para ello se apoya fuertemente en experimentos llevados a cabo en los dispositivos de recarga artificial.

El presente artículo pretende describir los trabajos en la tercera línea de acción: Aspectos operativos para el diseño y gestión de dispositivos de recarga artificial que les confieran alta efectividad, especialmente los relacionados con los procesos que originan la colmatación y disminuyen la tasa de infiltración. Para ello se establecen relaciones de causalidad, identificando los impactos y sugiriendo posibles acciones correctoras o paliativas.

La mayor parte de las experiencias prácticas se han desarrollado en el dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste (Segovia), donde los autores llevan trabajando 10 años.

La Cubeta de Santiuste cuenta con una superficie aproximada de 48 km² y se encuentra al oeste de la provincia de Segovia, en la margen izquierda de los ríos Voltoya y Eresma. El acuífero se caracteriza por poseer una formación arenosa cuaternaria, de hasta 55 metros de espesor (Unidad Arévalo), que rellena una cavidad compleja de un sustrato Terciario arcilloso (Facies Cuesta) o areno-arcilloso (Facies Puente Runel). Esta unidad da origen a la superficie morfológica de Coca-Arévalo, constituida por depósitos arenosos de origen fluvial, parcialmente recubierta por depósitos eólicos y áreas endorreicas, con varios sistemas lagunares ya fosilizados. La descripción detallada de las facies de los acuíferos y su funcionamiento hidrogeológico se describe con detalle en MAPA, 2005 y Fdez. Escalante, 2005.

El dispositivo de recarga artificial (en adelante AR de su acrónimo en inglés) está compuesto por canales, balsas y pozos, que se encargan de infiltrar los excedentes invernales derivados del río Voltoya, para luego usarse en el periodo estival. Comienza a partir de un pequeño embalse en el río Voltoya, desde donde parte una tubería enterrada de 10 km de longitud pendiente abajo, que termina en un depósito (cabecera del dispositivo) de 36 m³ en cuya entrada hay instalado un caudalímetro. El depósito vierte en una balsa de decantación de 14.322 m² de superficie, de la que parten los dos canales principales. El origi-

nario o "Caz Viejo", comenzó a funcionar en 2002 por el este de la Cubeta; y el "Caz Nuevo", operativo desde 2005, discurre semiparalelo al anterior y a su izquierda. ("caz" es un término agrícola empleado para este tipo de canales en esta región).

El "Caz Viejo" (en adelante Canal Este) tiene un trazado que coincide en un 20% con el cauce del antiguo arroyo de la Ermita. La traza del canal salva 30 m de desnivel, con una pendiente media de 0,28% a través de 10.667 m. El canal tiene 54 dispositivos de parada para incrementar la infiltración a través de una superficie que ronda los 33.300 m², considerando la infiltración por el fondo y por las paredes.

El "Caz Nuevo" (en adelante Canal Oeste) tiene una longitud total de 17.293 m. Está ubicado en el sector de máximos espesores del acuífero, por lo que su superficie de infiltración efectiva es prácticamente total. Se ha construido en dos etapas: La primera, hasta la confluencia con el caz Viejo, al sur de Villeguillo, que comenzó su operatividad en el ciclo de recarga artificial 2006/07, sobrepasando el doble del volumen de agua infiltrado en el acuífero en el ciclo precedente. La segunda etapa prolonga el Caz Viejo, atravesando Villeguillo por un sistema de drenaje antiguo, y va a salir en las inmediaciones del cementerio, discurriendo hacia el norte, hasta Llano de Olmedo. Este trazado estuvo en desuso en los ciclos 2005/06 y 2006/07, cuando la recarga artificial cesó en las inmediaciones de Villeguillo. En este bienio se han hecho obras de mejora. La superficie de infiltración, que era de aproximadamente 23.850 m², fue ampliada a 27.960 m², tras las obras de ampliación hacia el norte en Llano de Olmedo, llevadas a cabo por la JCyL y Tragsa en 2007.

El caudal procedente del río Voltoya ronda los 0,5 m³/s, con un periodo de concesión que se extiende desde el primero de noviembre al último día de abril, si bien esta concesión depende del carácter de cada año hidrológico.

En la figura 1 se muestra el dispositivo sobre la cartografía de isopacas del acuífero arenoso cuaternario. En él se pueden diferenciar los canales, balsas, etc., así como la ubicación de los puntos de la red de control de la piezometría (RCP), la ubicación de las estaciones de aforo secuenciales y de estudio de evolución de la tasa de infiltración.

Materiales y métodos

Los **materiales y equipos** empleados han sido:

- Infiltrómetros de doble anillo, balsas piloto y ensayos *Lugeon* y *Lambe*, así como permeámetro tria-

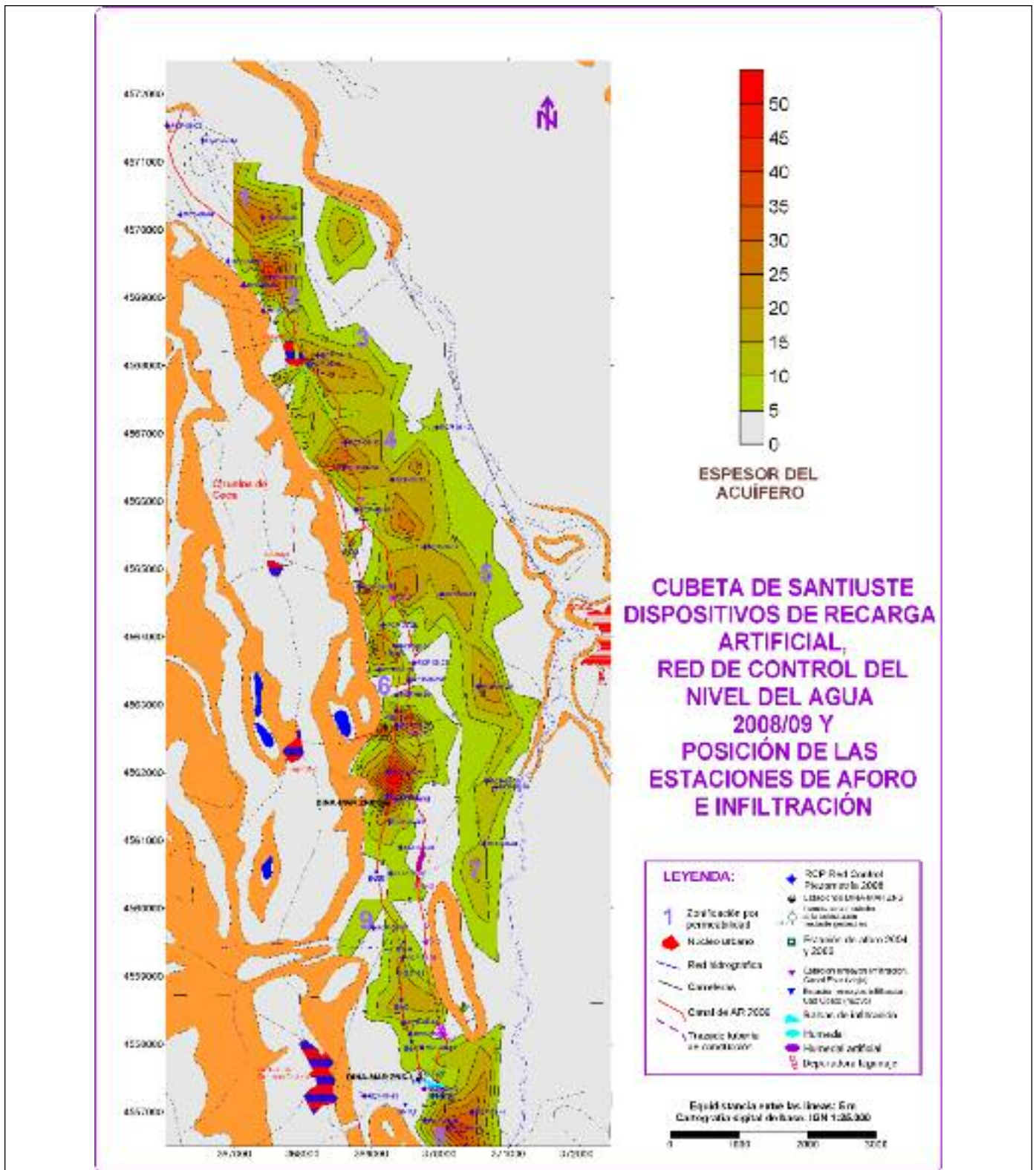


Figura 1. Cartografía con el trazado del canal de recarga artificial y la ubicación de las estaciones de aforo. El mapa presenta además la posición de los ensayos de infiltración realizados a lo largo de los años 2004-2008, de los puntos de la red de control de la piezometría, de las estaciones DINA-MAR ZNS y otros elementos singulares. Escala gráfica.

Figure 1. Path of the Santiuste basin's artificial recharge device on isothickness mapping. The map also includes infiltration test's position for the period 2004-2008, water level monitoring points, DINA-MAR ZNS stations and some other singular elements. Graphic scale.

xial en laboratorio y técnicas indirectas (ensayos de bombeo en pozos, ensayos de trazadores y curvas de *Manning* sobre los resultados de las granulometrías).

- Humidímetros, tensiómetros y termómetros conectados a registradores en continuo integrados en las dos estaciones de telecontrol designadas DINA-MAR ZNS. Han sido construidas en las inmediaciones del canal de recarga artificial, con objeto de obtener una determinación precisa de los parámetros hidrogeológicos entre el canal y la instrumentación. Operativas desde mayo de 2008, cada estación consta de un tensiómetro y dos humidímetros con sensores térmicos, de modo que se registran en continuo 5 parámetros. Las profundidades de los humidímetros son de 0,5 en ambas y 2 y 1,5 metros respectivamente para el más profundo. Los tensiómetros están ubicados a 1 metro de profundidad. El registro permite obtener datos para evaluar la infiltración natural real, a efectos de balances hídricos, y disociar el agua infiltrada por la lluvia y por los dispositivos de recarga artificial. La ubicación de las estaciones DINA-MAR ZNS se presenta en la Tabla 1 y su aspecto y configuración en la figura 2.
- El estudio de la variación de agua almacenada en el acuífero de la Cubeta de Santiuste se realiza a partir de los datos obtenidos en las campañas de medidas de la Red de Control de la Piezometría (RCP), constituida por 54 puntos de agua (figura 1).
- La evolución del caudal a lo largo del canal se ha calculado mediante aforos con micromolinetes de hélice en estaciones acondicionadas.

La **metodología** empleada para la adquisición de los datos ha consistido en:

- Para la determinación de parámetros hidráulicos en balsas de infiltración, canales y sondeos se han realizado de manera eventual los siguientes ensayos entre 1999 y 2009:
 - Ensayos de infiltración realizados en fosas, canales y balsas.
 - Ensayos de bombeo.
 - Ensayos tipo *Lefranc* de carga variable.

- Ensayos con trazadores.
- Ensayos de permeabilidad en laboratorio a partir del análisis granulométrico de muestras de perforaciones por el método de las curvas de *Breeding*.
- Ensayos con permeámetro triaxial sobre muestras de perforaciones.

La ubicación de los ensayos y los resultados se encuentran en MAPA, 2005; Fdez. Escalante, 2005 y DINA-MAR, 2009, y han sido sintetizados en la tabla 2.

- Ejecución de ensayos con infiltrómetro de doble anillo en zonas comunes para ver su evolución a lo largo del tiempo. Entre 1999 y 2006 se han hecho ensayos eventuales, y desde 2007 hasta la actualidad se llevan a cabo campañas de medidas en estaciones fijas. La posición de los ensayos realizados se muestra en la cartografía de la figura 1. Los ensayos han tenido una duración entre una y seis horas, hasta conseguir la estabilización. Los resultados de las interpretaciones figuran en la tabla 3.

- La medida de parámetros en la Zona No Saturada (ZNS) en continuo desde el inicio del último ciclo de la campaña de AR hasta su término ha permitido mejorar la caracterización hidrodinámica del acuífero, al menos en torno a las estaciones de estudio, y afinar en la determinación de las permeabilidades horizontal y vertical. Para ello se conocen las distancias del canal al humidímetro más profundo de la estación ZNS-1 (38 m) y al pozo 49 de la red de control (102 m). Asimismo se ha visto la fecha y hora en que el bulbo de humidificación ha alcanzado los sensores, lo que ha permitido aplicar directamente cálculos darcinianos.

Los sensores están dispuestos de modo transversal al canal, con objeto de detectar y cuantificar el avance del bulbo de humidificación y conocer su morfología. La recarga empezó el 1/10/2008. El humidímetro ubicado a 2 metros en ZNS-1 entró en saturación el 25/12/2008. Asimismo se apreció la llegada del bulbo al pozo 49 el 14 de marzo.

- El volumen de entrada al dispositivo derivado del

| ESTACIÓN | COORDENADAS | PARCELA SIGPAC |
|----------------|------------------------|-----------------------|
| DINA-MAR ZNS-1 | X: 369694 / Y: 4557512 | 40:221:0:0:1:6244 |
| DINA-MAR ZNS-2 | X: 369246 / Y: 4561559 | 40:65: 265:0:7:5376:2 |

Tabla 1. Ubicación de las estaciones DINA-MAR ZNS en Segovia.
Table 1. DINA-MAR ZNS stations' s position. Segovia province.

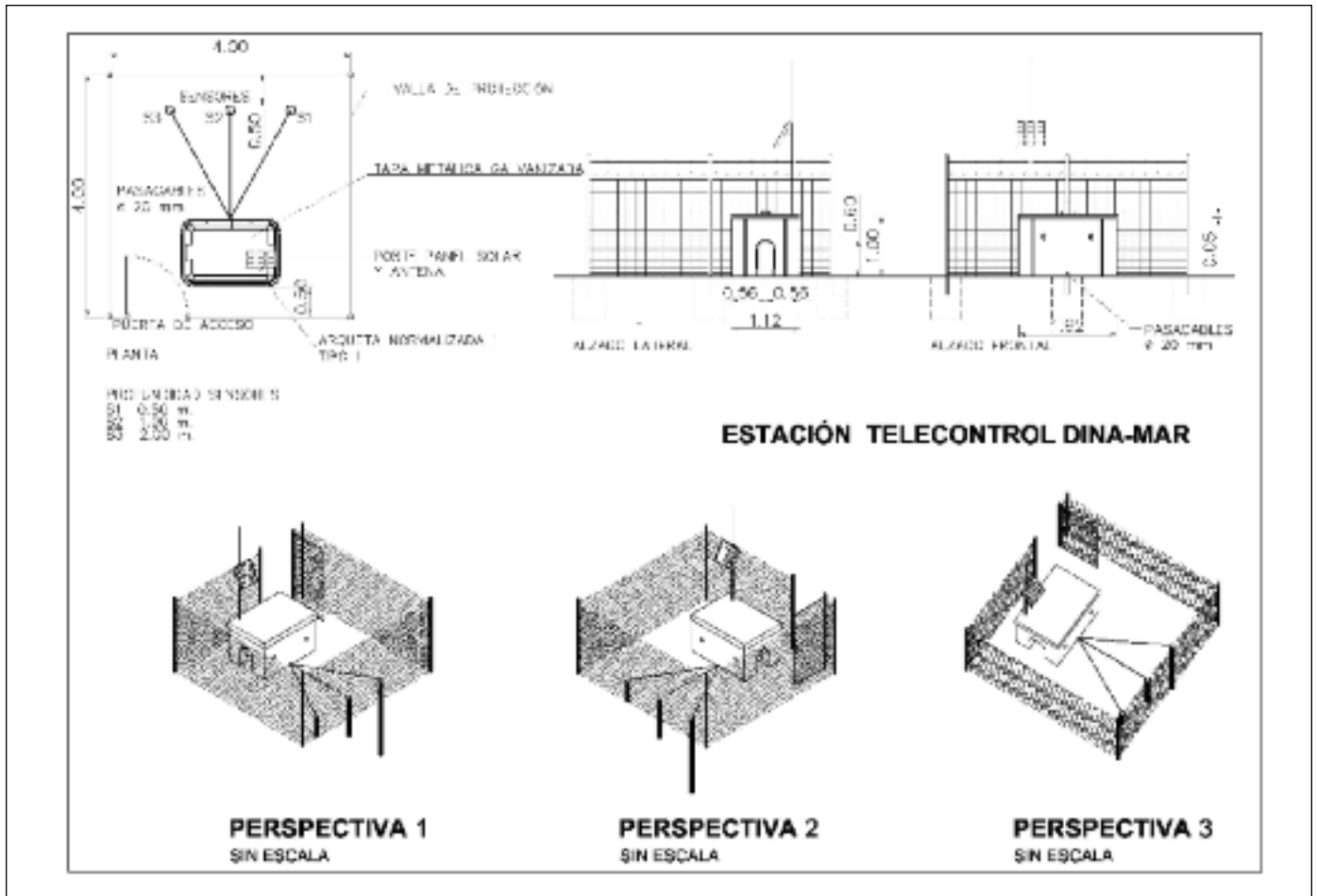


Figura 2. Configuración de las estaciones DINA-MAR ZNS y sensores instalados.
 Figure 2. DINA-MAR ZNS stations and monitoring installed sensors.

río Voltoya ha sido cuantificado directamente por el caudalímetro totalizador intercalado en la conducción, que ha registrado además el inicio y final de cada ciclo de recarga artificial. Se han tomado medidas intermedias de forma manual, hasta su instrumentación en 2009.

- El estudio de la variación de agua almacenada en el acuífero se está realizando mediante el método WTF o *Water Table Fluctuation* (Schict & Walton, 1961), adaptado para acuíferos arenosos (Healy & Cook, 2002), con los datos obtenidos en las campañas de medición (al menos semestrales) de los 54 puntos de agua de la RCP (en Fdez. Escalante, 2005). Los resultados de aplicar el método WTF se encuentran en la tabla 4, columnas 8 y 9, donde aparece la diferencia volumétrica cuantificada en el acuífero inmediatamente antes del inicio y después del final de cada ciclo, así como el porcentaje que representa esta variación con respecto al

caudal “vertido” a la balsa de decantación (la fracción restante retorna al sistema, se integra en la evapotranspiración, es derivada al río a través de los aliviaderos, percola al acuífero profundo, etc.).

- La disociación entre el agua infiltrada procedente de la lluvia y de la recarga artificial se ha llevado a cabo mediante el modelo HELP (Gogolev y Ostrander, 2000), que ha permitido elaborar balances hídricos parciales dentro del sistema. Los resultados del modelo han sido contrastados con los obtenidos en los humidímetros de las estaciones DINA-MAR ZNS, a efecto de balance. Estos datos han sido contrastados con el registro meteorológico preciso y completo para el último trienio de la estación meteorológica SG-02 de Nava de la Asunción (tabla 4, columna 2, P. total), disponible en www.inforiego.es. Según este modelo, la tasa de infiltración natural en la *Cubeta* es de 25,09 a 25,11 % de la precipitación total para el trienio

| Punto ensayo | Coord. X | Coord. Y | K _p (mm/h) |
|--------------|----------|----------|-----------------------|
| 17bis | 367419 | 4570177 | 2458 |
| 44C | 368686 | 4567906 | 83 |
| 61bis | 369306 | 4566315 | 2083 |
| 68bis | 369787 | 4565325 | 2458 |
| 78C | 368958 | 4564189 | 333 |
| 76bis | 370037 | 4564627 | 1500 |
| 100BIS | 369337 | 4562450 | 833 |
| 161D | 369475 | 4559082 | 333 |
| 131bis | 369662 | 4560253 | 2125 |
| 202 | 370474 | 4556999 | 2208 |
| 113bis | 370648 | 4560956 | 333 |
| 29C | 367529 | 4569305 | 125 |
| 172BIS | 369979 | 4558559 | 625 |
| 78BIS | 371224 | 4564445 | 0 |
| 102E | 370689 | 4561876 | 187 |
| 70BIS | 368629 | 4565382 | 1666 |
| 109 | 369268 | 4561050 | 669 |
| 175bis | 369339 | 4558514 | 465 |
| 211 | 370148 | 4556600 | 1050 |
| FOSA 1 | 369631 | 4559355 | 253 |
| FOSA 2 | 369174 | 4559718 | 152 |
| FOSA 3 | 369216 | 4560256 | 289 |
| FOSA 4 | 369465 | 4561965 | 1258 |
| FOSA 5 | 370740 | 4563084 | 196 |
| CANAL 1 | 369624 | 4562736 | 36 |
| CANAL 2 | 369931 | 4560582 | 34 |
| BALSA SGOP 1 | 369947 | 4557758 | 250 |
| BALSA SGOP 2 | 368979 | 4557934 | 417 |
| P1 | 368629 | 4565382 | 180 |
| P2 | 369694 | 4563335 | 821 |
| P4 | 369377 | 4560682 | 1675 |
| P5 | 370816 | 4561789 | 3537 |

Tabla 2. Compendio de los parámetros hidráulicos obtenidos en la "Cubeta".

Table 2. Hydrogeologic parameters obtained at the "Cubeta".

1999-2002. Para un cálculo de 15 años el resultado es del 24,78 %, y de 24,56 % para 35 años.

Con los datos de AR del sexenio se ha elaborado la tabla 4, que resume, respectivamente, el año hidrológico, la precipitación acumulada durante cada período de concesión, las fechas de inicio y final de cada ciclo, los días de operatividad total (excluyendo incidencias), el volumen total derivado del río Voltoya para la recarga artificial (AR), el caudal medio circulante a lo largo del canal (caudal/longitud), el volumen infiltrado en el acuífero deducido por la aplicación del método WTF, el porcentaje con respecto al caudal derivado y, por último, el ascenso medio del nivel freático en cada ciclo de recarga artificial.

- La evolución del caudal circulante por los canales de recarga artificial se ha calculado mediante campañas de aforos diferenciales, en general una por anualidad, en ocho estaciones a lo largo de cada canal (figura y tabla 5), deduciendo qué tramos tienen altas tasas de infiltración y cuales son "ineficaces". Se han seleccionado resultados de una campaña realizada el 16 de marzo de 2004 y otros dos años después (11 de marzo de 2006), ambas en el canal Este, con objeto de estudiar la evolución de la tasa de infiltración en cada tramo (tabla 5).

Análisis de resultados

Antes de entrar en materia, conviene recalcar que los resultados de las campañas para evaluar parámetros hidrogeológicos en el acuífero presentan una gran dispersión, tanto en los métodos usados para su interpretación como en los puntos de ejecución. Por este motivo, aunque se hayan tenido en consideración los datos y ensayos bibliográficos y los de etapas iniciales de caracterización del acuífero (tabla 2), los ensayos más tenidos en cuenta corresponden a los realizados en el último trienio. El motivo es por haber sido efectuados en puntos comunes, con objeto de evaluar la variación en la tasa de infiltración y buscar las causas con incidencia en este proceso.

Analizando los distintos impactos negativos que han sido detectados en las zonas piloto del acuífero de los Arenales durante los seis primeros años de operatividad, cabe destacar, como impacto más destacable, la colmatación de los dispositivos.

Aunque no sea objeto de este artículo analizar químicamente los procesos colmatantes (tarea postergada para etapas posteriores del proyecto a partir de las 50 probetas muestreadas en distintos períodos), sino más bien estudiar su influencia en la tasa de infiltración en base a proponer medidas paliativas y actuaciones de mejora, cabe adelantar que la observación de las muestras con lupa binocular y los primeros análisis desprenden que en este dispositivo convergen varias tipologías de colmatación. Cabe destacar procesos de colmatación física, bien motivada por partículas en suspensión en el agua de recarga artificial o bien generada en el seno del acuífero por fuerzas hidrodinámicas o hidroquímicas (Pavelic et al, 1998); y química, por disolución y precipitación de minerales, con frecuencia catalizados por microbios o algas al extraer CO₂ disuelto en su actividad fotosintética (Bouwer, 2002). A estos hay que añadir la biocolmatación bacteriana, la generación de gas y entrapamiento en el acuífero (Olsthoorn, 1982), así

| ESTACION | Coordenadas UTM X / Y | 2007 | | 2008 | |
|---------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| | | Duración del Ensayo (h) | Tasa de Infiltración (mm/h) | Duración del Ensayo (h) | Tasa de Infiltración (mm/h) |
| IN-0 Arenas | 370030 4557343 | 4.15 | 2500 | 1.73 | 95 |
| IN-0 Arcillas | 370030 4557343 | 4.08 | 100 | 1 | 90 |
| IN-1 | 369709 4557552 | 3 | 130 | 1.43 | 22 |
| IN-2 | 369591 4558033 | 2.03 | 250 | | |
| IN-3 | 369440 4558646 | 2 | 410 | | |
| IN-4 | 369479 4559499 | 3 | 1200 | | |
| IN-5 | 369069 4560539 | 2.3 | 27 | 2 | 20 |
| IN-6 | 369082 4560529 | nd | nd | | |
| IN-7 | 369361 4562908 | nd | nd | | |
| IN-8 | 369359 4563856 | 3.08 | 1300 | | |
| IN-9 | 368695 4565342 | 2.33 | 250 | | |
| IN-10 | 369502 4557107 | 0.75 | 65 | | |
| IN-11 | 368101 4568009 | 1.33 | 950 | 2.61 | 125 |
| | | | | | |
| IV-1 | 370016 4558087 | 2.28 | 200 | 2 | 220 |
| IV-2 | 369774 4559504 | 2 | 90 | | |
| IV-3 | 369665 4560328 | 1,5 | 150 | | |
| IV-4 | 369614 4561614 | 1 | 80 | 1 | 150 |
| IV-5 | 369627 4562577 | 1 | 5 | 1.5 | 140 |
| IV-6 | 369547 4563167 | nd | nd | | |
| IV-7 | 369351 4564574 | 1 | 90 | | |
| IV-8 | 368811 4566008 | nd | nd | | |

Tabla 3. Determinaciones de la tasa de infiltración con infiltrómetro de doble anillo.
 Tabla 3. Results of the infiltration rate obtained from double ring infiltration tests.

| Vol. infiltrado | P total ciclo (mm) | Fecha inicio ciclo | Fecha final ciclo | días efect. | Q deriv (hm ³) | Qm canal (l/s) | Vol. inf. Tot. (hm ³) | % vol inf/Q derivado | Oscilación media n.f. (m) |
|-----------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------|----------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------|
| 2002/03 | | 05/12/2002 | 01/05/2003 | 148 | 3.5 | 278 | 1.30 | 37.14 | 2.3 |
| 2003/04 | | 10/10/2003 | 01/04/2004 | 175 | 2.25 | 149 | 1.80 | 80.00 | 2.1 |
| 2004/05 | | 01/10/2004 | 01/05/2005 | 212 | 1.26 | 68 | 0.97 | 76.98 | n/a |
| 2005/06 | 305,4 | 15/11/2005 | 01/04/2006 | 137 | 5.11 | 372 | 3.56 | 69.67 | 3.36 |
| 2006/07 | 331 | 01/10/2006 | 01/05/2007 | 212 | 12,68 | 692.37 | 12.19 | 96.13 | 3.57 |
| 2007/08 | 203,4 | 30/05/2008 | 06/06/2008 | 8 | 0,526 | 794 | 0.46 | 87.45* | n/a* |

Tabla 4. Resumen de los seis ciclos de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste. Datos y cálculos propios del proyecto de I+D+i DINA-MAR. El sexto ciclo fue precedido de un periodo de intensas precipitaciones, incluso simultáneas, lo que ha dificultado disociar cada fracción.

Table 4. Summary of the six cycles of artificial recharge in Santiuste Basin. Data from R&D DINA-MAR project. *The sixth stage was preceded by a intense rainfall period, even simultaneous, what has made difficult to dissociate precipitation and seepage.

| N | X | Y | Dist (m) | l (m) | 16/03/2004 | | | | 11/03/2006 | | | |
|----------|--------|---------|----------|-------|------------|-----------|------------------|-------------------------|------------|-----------|------------------|-------------------------|
| | | | | | Q (l/s) | % Q (l/s) | ΔQ (l/s) | I (l/s/m ²) | Q (l/s) | % Q (l/s) | ΔQ (l/s) | I (l/s/m ²) |
| E 2004-1 | 370013 | 4557343 | 0 | | 243 | 100 | | | 551 | 100 | | |
| E 2004-2 | 370020 | 4558189 | 1011 | 1011 | 193 | 79,42 | 20,58 | 0,0127 | 424,8 | 77,1 | 22,9 | 0,0126 |
| E 2004-3 | 369680 | 4560341 | 2419 | 1408 | 170 | 69,95 | 9,47 | 0,0042 | 434,7 | 78,9 | -1,8 | -0,0007 |
| E 2004-4 | 369622 | 4562578 | 3262 | 843 | 164 | 67,48 | 2,47 | 0,0018 | 392,9 | 71,3 | 7,6 | 0,0050 |
| E 2004-5 | 369547 | 4563190 | 4593 | 1331 | 155 | 63,78 | 3,7 | 0,0017 | 257,9 | 46,8 | 24,5 | 0,0102 |
| E 2004-6 | 369342 | 4564562 | 5641 | 1048 | 102 | 41,97 | 21,81 | 0,0130 | 247,4 | 44,9 | 1,9 | 0,0010 |
| E 2004-7 | 368883 | 4566020 | 6264 | 623 | 70 | 28,8 | 13,17 | 0,0132 | 176,3 | 32 | 12,9 | 0,0115 |
| E 2004-8 | 368809 | 4564981 | 7007 | 743 | 0 | 0 | 28,8 | 0,0242 | 160,3 | 29,1 | 2,9 | 0,0022 |
| E 2006-9 | 368511 | 4566096 | 8162 | 1155 | | | | | 0 | 0 | 29,1 | 0,0140 |

Tabla 5. Resultados de las campañas de aforos diferenciales de marzo de 2004 y 2006.
Table 5. Results of the sequential flow rate measure campaigns. 2004 and 2006, March.

como la compactación o compresión de la capa superficial de los canales de recarga artificial por el peso del propio agua de AR (Custodio, 1986).

Otros impactos y riesgos dignos de mención son el "efecto *Lisse*" (Krul y Liefrinck, 1946; Bouwer, 1999 y 2002), efecto producido por la sobrepresión del aire que penetra en los poros del acuífero, de modo que las "burbujas" atrapadas llegan a ejercer una presión hidrostática centrífuga; la oxigenación de las aguas de recarga artificial, etc.

Para minimizar estos impactos se han estudiado medidas operativas encaminadas a tres objetivos básicos: Minimizar impactos ambientales, proponer mejoras para el dispositivo de AR y extraer normas prácticas extrapolables a sistemas análogos. Los aspectos operativos más investigados en la zona de estudio son:

- Mejoras en la caracterización hidrodinámica del acuífero.
- Estudios para reducir el efecto de la colmatación (*clogging*).
- Perfiles del canal a partir de la medición de la red de control de la piezometría (RCP) y correlación con los datos de las campañas de aforos diferenciales.
- Influencia del periodo y caudal de recarga artificial en la tasa de infiltración y su manejo para aumentar la efectividad de los dispositivos (Los estudios se están llevando a cabo en canales y balsas).
- Actuaciones en la morfología de los dispositivos y del medio receptor (balsas y canales).

A continuación se presentan los aspectos operativos ensayados para la corrección de los impactos evaluados:

a) Mejoras en la caracterización hidrodinámica del acuífero

Consultando las reseñas previas, los valores de K_h medios obtenidos por procedimientos clásicos en las inmediaciones del sector de la estación DINAMAR ZNS 1 se presentan en la tabla 6.

Conocidos los datos precisos entre el canal de recarga artificial y la estación DINAMAR ZNS 1, así como el tiempo que ha requerido el bulbo de recarga artificial hasta saturar el humidímetro desde el canal, la permeabilidad media calculada para este sector ha sido 183 mm/h (K_h) y 13,3 mm/h (K_v). Estas determinaciones son muy inferiores a las obtenidas en sectores cercanos del acuífero por otras metodologías, con valores de K_h entre 625 y 1041 mm/h y de K_v en torno a 20,8 mm/h (MAPA, 2005).

El avance del bulbo, por tanto, presenta una velocidad de entre 16,6 y 20,8 mm/h en este sector, y la transmisividad resultante oscila entre 1.200 y 1.400 m²/día. Repitiendo los cálculos entre el canal y el pozo n° 49, los parámetros son más cercanos al valor mayor del intervalo.

De todas las metodologías aplicadas para la determinación de parámetros hidráulicos en las inmediaciones de la zona de ensayo, y asumiendo que los nuevos parámetros han sido obtenidos en una situación bien controlada, los ensayos cuyos valores se han aproximado más a las determinaciones de K_h y K_v han sido los ensayos de infiltración en balsas (en torno a 20,8 y 2,08 mm/h respectivamente), tanto con ensayos de corta duración (seis horas) como de larga (cuatro días). También son muy similares los parámetros obtenidos por ensa-

| Zona del Acuífero | Permeabilidad K_h (mm/h) |
|------------------------------------|----------------------------|
| Extremo sur Cubeta (8) | 1.083-1.417 |
| Santiuste de San Juan Bautista (9) | 625-1.042 |

Tabla 6. Valores de K_h medios obtenidos por procedimientos clásicos en las inmediaciones del sector de la estación DINA-MAR ZNS 1 (MAPA, 2005).

Table 6. Horizontal permeability average values obtained by "classical techniques" close to DINA-MAR ZNS 1 location (MAPA, 2005).

yos de bombeo interpretados por el método de Newman. Los restantes procedimientos de determinación distan en hasta el triple, como por ejemplo sucede con las curvas de Bredding, con valores cercanos a 625 mm/h. Todos estos datos han permitido llevar a cabo una sectorización del acuífero (figura 1).

b) Estudios para reducir el efecto de la colmatación (clogging)

Las líneas de acción iniciadas se basan en el muestreo y análisis de los procesos colmatantes y estudiar la relación entre las tipologías detectadas y las variaciones en la tasa de infiltración, como iniciativa para esclarecer la relación causa-efecto y cuantificarla en la medida de lo posible.

Hasta la fecha se han realizado del orden de 30 ensayos de infiltración en sectores donde se han muestreado suelos para estudiar la naturaleza de los procesos colmatantes. Estas muestras del

terreno se encuentran congeladas en probetas en espera de su análisis geoquímico, mineralógico y biológico. Las muestras han sido visualizadas en lupa binocular, detectando la presencia de materiales colmatantes adheridos a la matriz de las arenas constituyendo tanto colmatación mecánica como química. Estos procesos lógicamente influyen en las tasas de infiltración cuantificadas (tabla 3).

Las combinaciones entre ambas tipologías es lo más habitual. Aunque no se han analizado hasta la fecha, según referencias bibliográficas, a la colmatación mecánica y química se unen un amplio elenco de vectores biológicos: Esporas, algas y hongos (Massmann et al, 2002) (figura 3). De acuerdo con otras reseñas, gran parte de estos vectores son eliminados mediante cloración (Pérez-Paricio, 2007), si bien queda un residuo de la interacción con alto poder obstructor.

Los ensayos de campo indican que la filtración a través de filtros de gravilla y arena han reducido considerablemente la colmatación mediante el pretratamiento de las aguas de recarga artificial, axioma tenido en cuenta para el diseño de los nuevos dispositivos.

Se han detectado sectores del acuífero con precipitación de costras carbonatadas en la superficie del canal de recarga artificial. En el punto IN-11 (inmediaciones de Villeguillo) se observó la formación de una costra dura sobre el fondo del canal durante la realización de trabajos de campo en octubre de 2008. Esta costra, de poco grosor y color blanquecino, correspondía a una capa de carbonatos que, presentes en el agua durante el periodo de AR, precipitan en el fondo del canal reduciendo su capacidad de infiltración (figuras 4). También se ha detectado la acumulación de carbonatos en el fondo del canal Este en el punto IV-5, junto a la carretera de Coca a Villagonzalo, donde hay una divisoria hidrogeológica. Este precipitado "cemento" las arenas y materia orgánica existentes en el fondo del canal.



Figura 3. Procesos colmatantes bajo el fondo del canal de recarga artificial (perfil del suelo).

Figure 3. Clogging processes in the bottom of the artificial recharge (AR) channel (soil profile).



Figuras 4 a) y b). Precipitados de carbonato en el fondo del canal "oeste" (punto IN-11).
 Figures 4 a) y b). Carbonate precipitation in the bottom of the artificial recharge West channel (IN-11 testing point).

c) *Perfiles del canal a partir de la medición de la red de control de la piezometría (RCP) y correlación con los datos de las campañas de aforos diferenciales*
 Durante los dos primeros ciclos de operatividad se

apreció que los caudales infiltrados eran inferiores a los previstos, a pesar de que el canal había sido trazado por un cauce fluvial precedente (Arroyo de la Ermita), con objeto de garantizar su fluencia por gravedad. De este modo, en ocasiones no discu-

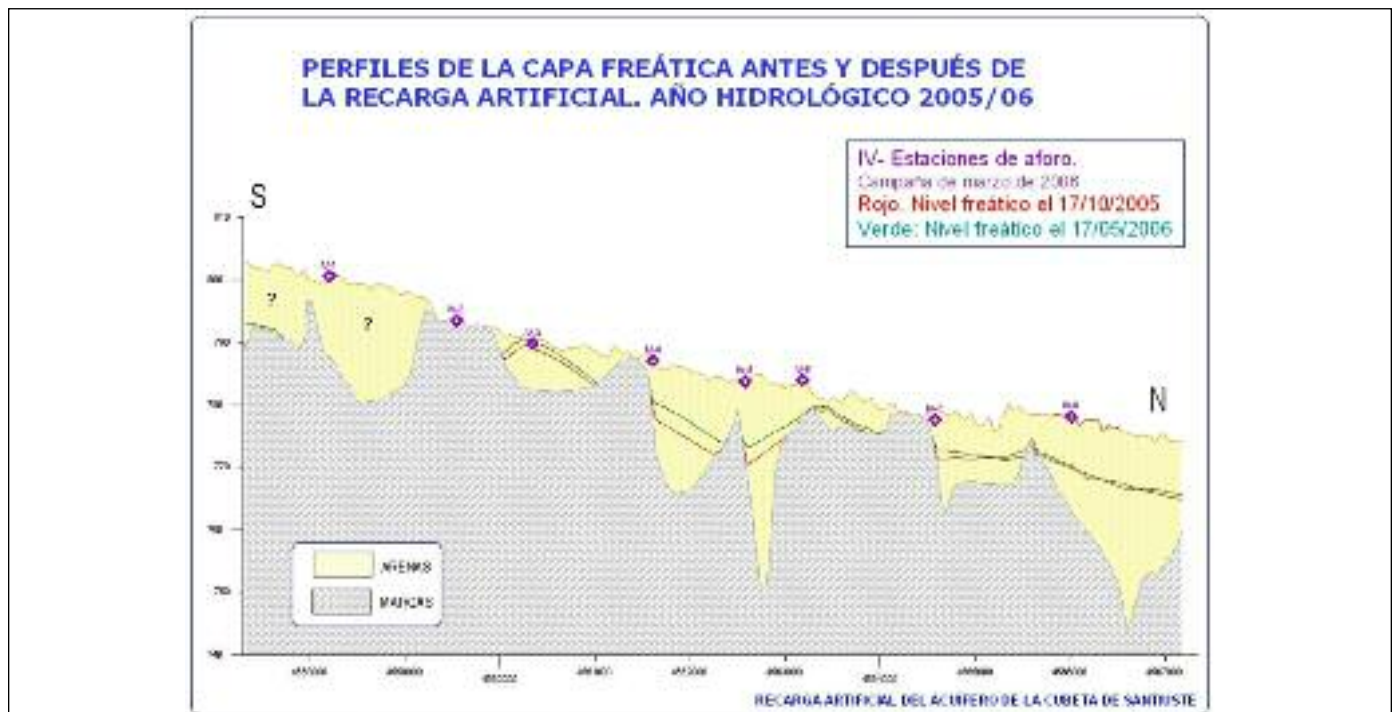


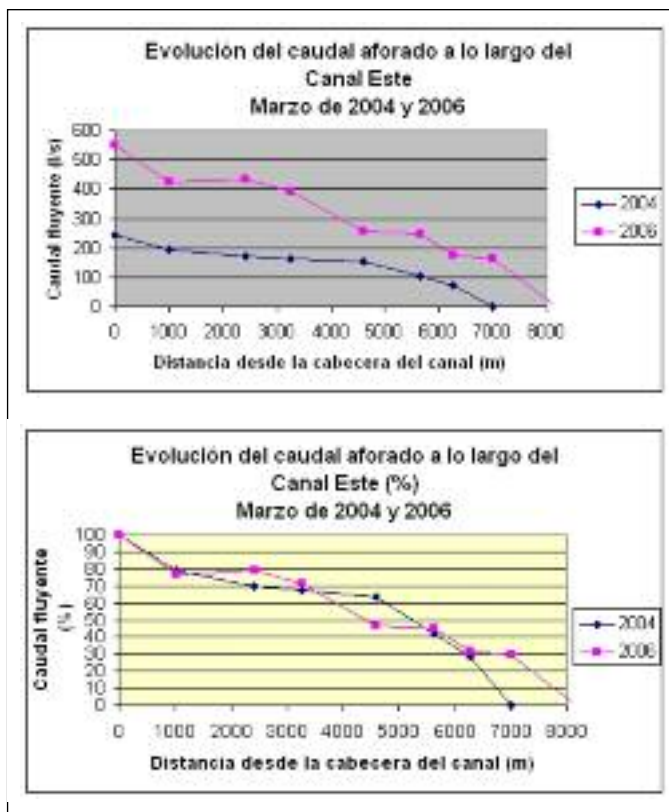
Figura 5. Perfil a lo largo del canal Este de recarga artificial, posición de la capa freática antes y después de la recarga artificial de 2005/06, posición de las estaciones de aforo y espesor del acuífero cuaternario.
 Figure 5. Hydrogeologic profile along AR channel, position of groundwater surface prior and after 2005/06 artificial recharge period, location of sequential flow rate measure stations and variations in the thickness of the Quaternary aquifer.

rría por las zonas del acuífero de mayor espesor. En otras discurría sobre un sustrato de alto contenido arcilloso.

Para estudiar las mejoras posibles, tanto para corregir los impactos efecto de la colmatación sobre el canal como para estudiar mejoras estructurales, se determinaron los tramos de baja efectividad; bien por efecto de la colmatación (por discurrir sobre facies impermeables) o bien por zonas con el nivel freático a una distancia de la superficie del terreno inferior a la "profundidad de alerta" [profundidad máxima del nivel freático a partir de la cual la recarga artificial conlleva riesgo de inundaciones. Esta profundidad está valorada en acuíferos similares en dos metros (Christen *et al.*, 2000)].

Para ello se realizaron perfiles de tomografía y de prospección geofísica (SEV) a lo largo del canal, para complementar los datos obtenidos en las campañas de aforos diferenciales. El perfil a lo largo del canal "Este", tras mejorar el grado de conocimiento del acuífero, se presenta en la figura 5. En ella se aprecian varias "paleocubetas en cascada" (Fdez. Escalante, 2005), con umbrales intermedios en los que la infiltración del agua en el canal es mínima. En el perfil aparece la posición de la capa freática antes y después de un ciclo de recarga artificial. La oscilación máxima del nivel freático se produce en las "cubetas" intermedias (en las iniciales hubo problemas de toma de datos). En las más lejanas la escasez del caudal que alcanza ese sector del acuífero conlleva volúmenes de recarga menores, aspecto operativo a mejorar en ciclos posteriores de recarga artificial facilitando el flujo (controlando la oclusión en los dispositivos de parada situados al inicio del canal). Las campañas de aforos diferenciales fueron llevadas a cabo en estaciones similares y con una fecha similar (mediados de marzo de 2004 y 2006) (el factor que no se pudo controlar fue el caudal de entrada, prácticamente el doble en la segunda campaña que en la primera). Estos datos se encuentran en la tabla 5. Las gráficas de las figuras 6a y 6b relacionan la distancia a la cabecera del dispositivo con el caudal circulante en l/s, (gráfica 6a) y en porcentaje con respecto al caudal inicial en la cabecera del canal, (gráfica 6b).

Confrontando ambas gráficas, se aprecia que en el tramo inicial del canal los porcentajes infiltrados son similares (a pesar de que la comparativa tiene un caudal fluente del doble en 2006). En el siguiente tramo las gráficas son prácticamente horizontales, lo que denota que el canal discurre por una zona con escasa capacidad de infiltración.



Figuras 6 a) y b). Evolución del caudal circulante por el canal Este (Viejo) de recarga artificial el 16/03/2004 y el 11/03/2006 en l/s y como porcentaje respecto al caudal inicial total. Datos en tabla 5. *Figures 6 a) and b). Flow rate evolution along artificial recharge "East channel" (Old). Data collected on 2004, March 16th & 2006 march 11th, in l/s and as percentage from the total flow rate. Data from table 5.*

El porcentaje infiltrado es mayor en la campaña de 2006 debido a que el caudal era cercano al doble. En las inmediaciones de la divisoria hidrogeológica (entre los puntos 4 y 5 del perfil 5) el porcentaje infiltrado es menor. En esta zona confluyen las aguas de escorrentía del AVE (punto 5). Desde la divisoria hasta el final del tramo inundado, las curvas guardan un fuerte paralelismo, a pesar de la significativa diferencia de caudal.

Como resultado fueron detectados tres tramos de canal con muy baja capacidad de infiltración, que, en general, son coincidentes con zonas del acuífero en las que las facies Cuestas (de comportamiento impermeable) se encuentran a escasa profundidad. Su longitud total "inefectiva" fue estimada en 3.027 m (tabla 7).

La comparativa entre los caudales infiltrados en las dos campañas de aforos diferenciales permite

| Tramo inefectivo | N | X | Y | Distancia desde cabecera |
|------------------|---|--------|---------|--------------------------|
| SUP INEF 1 | 1 | 369787 | 4559357 | 2.239 |
| | 2 | 369706 | 4561419 | 4.373 |
| SUP INEF 2 | 3 | 369563 | 4563484 | 6.582 |
| | 4 | 369544 | 4564129 | 7.254 |
| SUP INEF 3 | 5 | 369065 | 4565484 | 8.771 |
| | 6 | 368911 | 4565631 | 8.889 |

Tabla 7. Coordenadas de los extremos de los tramos de infiltración inefectiva a lo largo del canal de recarga artificial y distancia con respecto a la cabecera.

Table 7. Starting and end points' coordinates of the ineffective seepage sections along the AR channel and their distance from the headwaters at the beginning of the device.

atisbar que el efecto de la colmatación se manifiesta de manera desigual, aunque patente, a juzgar por el descenso de los porcentajes del caudal infiltrado en los tramos estudiados (tabla 5 y figura 6), hasta que a una distancia cercana a 7.000 y 8.000 m respectivamente se había infiltrado la totalidad registrando caudales de cero. Porcentualmente, la tasa de infiltración a lo largo del canal Este es inferior en la segunda campaña (a pesar de que el caudal circulante era aproximadamente el doble).

En cuanto a las tasas de infiltración a lo largo del canal, a partir de los resultados de los ensayos de infiltración en canales realizados en 2003 y 2004 (tabla 2), la tasa media a lo largo del ciclo de AR oscilaba entre 314 y 1100 mm/año (Fdez. Escalante, 2005). De acuerdo con los datos bibliográficos; Kv se estimaba en 1.095 mm/año (IRYDA, 1990; MAPA, 1999). Según otras fuentes, oscilaba entre 2.200 y 3.600 mm/año (MOPTMA, 1994; MAPA, 2005). Los datos tomados en el canal (tabla 3) confirman una tasa de infiltración más próxima a los límites inferiores de los intervalos o bien un descenso progresivo de la permeabilidad en el fondo del canal a lo largo del tiempo.

Como consecuencia, la mejora propuesta fue construir un canal adicional que conectara los distintos depocentros (zonas de máximo espesor del acuífero), con un trazado apoyado en estudios de microtopografía, para permitir fluir el agua por gravedad. Además la colmatación debía minimizarse desde el principio mediante el pretratamiento del agua de recarga artificial, por lo que a la construcción del nuevo canal la acompañó la de la balsa de infiltración en cabecera y la intercalación de filtros.

d) Influencia del periodo y caudal de recarga artificial en la tasa de infiltración y pautas operativas para aumentar la efectividad del dispositivo

PERÍODO:

La evolución de la tasa de infiltración en un punto del canal Este de Santiuste a lo largo de un ciclo de recarga artificial (2004 y 2005) fue controlada mediante la ejecución de ocho ensayos de infiltración en un tramo del canal especialmente confinado y acondicionado (tabla 8 y figura 7). La gráfica de la evolución de este parámetro presenta una morfología que se asemeja a la curva "tipo" definida en Blaxejewski, 1979.

En dicha gráfica se aprecia una tendencia creciente y constante de la tasa de infiltración, hasta alcanzar un máximo en torno al mes de iniciarse la recarga artificial y hasta la caída térmica de los primeros días de diciembre. El hecho de que junto con el agua quede atrapado aire en los poros del acuífero, unido a las bajas temperaturas, podrían ser las causas del descenso durante aproximadamente una quincena.

El resto del ciclo de recarga artificial presenta una tendencia ligeramente ascendente durante el resto del invierno (los ciclos de helada parecen provocar un retardo en el ascenso en la tasa de infiltración). Llegado un punto ligeramente después de la mitad del periodo (febrero-marzo), el acuífero ha atrapado importantes volúmenes de aire (hasta un 35% según datos bibliográficos, en Stuyfzand, 2002). Este aire atrapado no ha sido cuantificado en este laboratorio experimental, si bien se ha apreciado su presencia e influencia negativa en la recarga artificial, a tenor de las variaciones registradas en los tensiómetros instalados en las estaciones DINA-MAR ZNS, descritas en el apartado prece-



Figura 7 y tabla 8. Evolución de la tasa de infiltración a lo largo del ciclo de recarga artificial 2004/05. Canal Este.
 Figure 7 & table 8. Seepage rate evolution Evolución de la tasa de infiltración a lo largo del ciclo de recarga artificial 2004/05. Canal Este.

dente, cuyo análisis detallado queda postergado para etapas posteriores del proyecto de investigación.

Al acercarse la primavera, la curva presenta una morfología más o menos constante, el aire va abandonando los poros a través de la zona no saturada, donde se encuentra con el flujo descendente de la recarga artificial. El encuentro entre

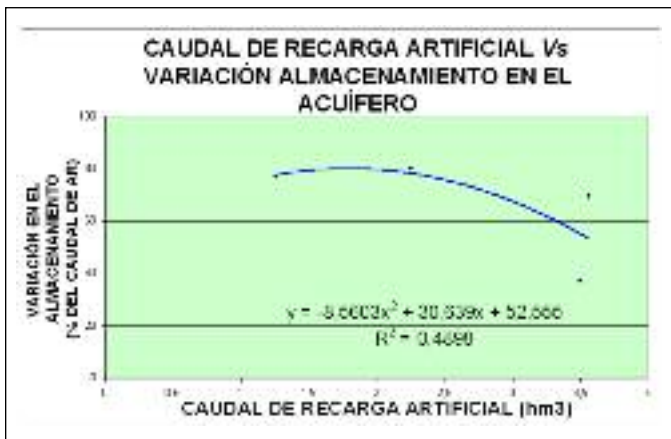


Figura 8. Relación entre el caudal de recarga artificial (caudales extraídos del río Voltoya) frente a la variación del almacenamiento cuantificada mediante el método WTF durante los cuatro primeros años de operatividad del dispositivo en el canal Este (Viejo). Datos en tabla 4, columnas 6 y 9.
 Figure 8. Relation between artificial recharge volumes taken from Voltoya river and aquifer storage increments measured by means of Water Table Fluctuation (WTF) method for initial four years period in the East channel (Old). Data located in table 4, columns 6th & 9th.

vectores de sentido contrario (desaireación y liberación del aire atrapado en el acuífero hacia la atmósfera frente a la incorporación de agua en sentido descendente) aparentemente provoca pequeñas oscilaciones en la curva, a pesar de su apariencia constante. El resultado final es una disminución de la tasa de infiltración, que previsiblemente será acumulativa en sucesivos ciclos de recarga artificial.

Los aspectos operativos que se desprenden del estudio de esta curva van encaminados al control manual de la válvula de entrada al dispositivo dependiendo de los ciclos de helada (existe un registro meteorológico continuo en la estación SG-02 de Nava de la Asunción, distante menos de 4 km y accesible por Internet en tiempo real, en www.inforiego.es). El control de la válvula lo llevan a cabo las comunidades de regantes de Santiuste y Carracillo.

CAUDAL DE RECARGA ARTIFICIAL (AR)

Los caudales derivados del río Voltoya para la AR frente a la variación del volumen almacenado en el acuífero para el mismo escenario y para los cuatro primeros años de operatividad (hasta la entrada en funcionamiento del nuevo canal) quedan sintetizados en la gráfica 8.

Observando la gráfica, se aprecia que los valores más altos de caudal fluyente por el canal Este de AR corresponden a variaciones del almacenamiento, en general, más bajas. Cabe destacar además que el volumen porcentual infiltrado ha disminuido en los tres últimos ciclos de operatividad, hecho atribuible a la influencia de la colmatación en la tasa de recarga. El dato correspondiente al primer ciclo resulta un tanto "anómalo", lo que se atribuye a ajustes en el canal hasta el trabajo "en óptimo". Los datos empleados son escasos, si bien, los obtenidos en los últimos ciclos no pueden ser incorporados en el proceso de cálculo, al haber variado sustancialmente el dispositivo tras la construcción y puesta en marcha del canal "Oeste", de mayor longitud y efectividad.

La ecuación de la curva polinomial interpolada es:

$$y = -8.5603x^2 + 30.639x + 52.555$$

El valor máximo obtenido al derivar la ecuación e igualarla a cero es 1,765, es decir, el porcentaje de infiltración más alto queda situado cerca del valor medio de los volúmenes de recarga artificial ensayados en el primer cuatrienio de operatividad exclusiva del canal Este.

Otro ensayo paralelo se ha llevado a cabo, con-

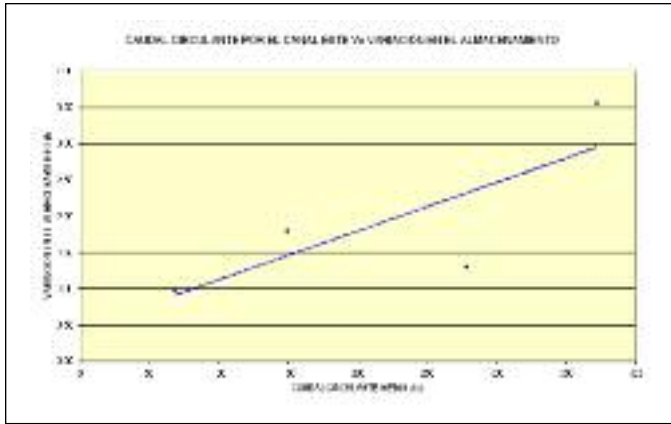


Figura 9. Relación entre el caudal circulante medio por el canal de recarga artificial Este y la variación en el almacenamiento para los primeros cuatro primeros ciclos de operatividad en la Cubeta de Santiuste. Datos en tabla 4, columnas 6 y 7.

Figure 9. Relation between mean artificial recharge flow rate in the East channel and aquifer storage increases for initial four years' period in Santiuste basin. Data located in table 4, columns 6 & 7.

frontando el caudal medio circulante por el canal Este de recarga artificial en los mismos ciclos (la duración de ellos nunca ha sido similar) con la variación en el almacenamiento (gráfica 9).

Los resultados no presentan una tendencia clara y la relación de proporcionalidad entre el caudal y la infiltración resulta dudosa, especialmente por tra-



Figura 10. Aspecto de la cabecera del canal con un caudal de entrada superior a 750 l/s (Santiuste, 2 de junio de 2008).
Figure 10. Aspect of the headwaters of the canal with a flow rate of entry major than 750 l/s (Santiuste, June 2th, 2008).

tar valores medios y haber ejecutado los ensayos en años de condiciones climáticas muy diversas. No obstante se aprecia que, a mayor caudal circulante, mayor volumen infiltrado, pero a caudales "bajos" existe un máximo en torno a 150-200 l/s.

e) *Actuaciones en la morfología de los dispositivos y del medio receptor (balsas y canales).*

Se han llevado a cabo actuaciones experimentales, en general por la técnica de ensayo y error, en balsas y canales.

BALSAS

Para mejorar la efectividad de las balsas en cuanto a permitir la mayor tasa de infiltración posible, se está aumentando la superficie de contacto del



Figuras 11 a) y b). Caballones arados con distinta anchura en el fondo de una balsa de decantación e infiltración (cabecera del dispositivo de la Cubeta de Santiuste).

Figures 11 a) y b). Furrows plugged with different width in the bottom of an artificial recharge decantation and infiltration pond (headwaters site of Santiuste basin AR device).

medio receptor mediante el arado de caballones. Además de acrecentar la superficie de contacto con el agua de recarga artificial, los caballones permiten el depósito de finos por gravedad en las zonas más deprimidas (surcos o concavidades del fondo) independientemente de su naturaleza, permaneciendo las crestas o convexidades más elevadas relativamente libres de finos.

Con objeto de cuantificar las diferencias entre un fondo plano o arado, se han realizado en torno a 12 ensayos de infiltración en la balsa de decantación de la Cubeta de Santiuste (tablas 3, estaciones IN-0 y 1 y tabla 9). Algunos resultados han sido contrastados con otras técnicas directas o indirectas, en general con la evolución de los datos de humedad medidos en las ya descritas estaciones DINA-MAR ZNS.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que, para el lugar y circunstancias de las pruebas, la presencia de caballones incrementa la tasa de infiltración con respecto a las balsas de fondo plano, con tasas mayores en ensayos realizados sobre la cresta de los montículos que en el fondo de los surcos.

En 2008 se han iniciado ensayos para averiguar qué distancia entre los surcos es la más apropiada para obtener los valores más altos de infiltración. Para ello se han hecho caballones en la balsa de decantación inicial con una "longitud de onda" que oscila entre los 60 y 100 cm. Confrontando los primeros resultados (tabla 9) con los precedentes (tabla 3, estaciones IN-0 e IV-1), los datos presentan ascensos del orden de 90 y 220 mm/h a valores del orden de 420/232 mm/h y 350/250 mm/h (cresta/surco, respectivamente). Además en el mismo caballón, la tasa es más alta en la cresta



Figura 12. Ensayos de infiltración mediante infiltrómetro de doble anillo en la superficie convexa y cóncava de los caballones labrados en el fondo de la balsa de decantación y AR que hay en la cabecera del dispositivo de Santiuste.

Figure 12. Infiltration test by means of double ring infiltrometer in the convex and concave surface of a furrow plowed at the bottom of the decantation pond and AR located in the headwaters of the AR Santiuste device.

que en los surcos, y los valores más altos se han registrado con valores intermedios en cuanto a la distancia entre surcos, en concreto en el punto "balsa 3", con distancia entre los surcos de 80 cm (figura 12).

CANALES

Las principales líneas de acción para incrementar la tasa de infiltración y el volumen total infiltrado en el fondo y paredes de los canales se han centrado en la propia morfología del canal. De mane-

| ESTACION | Coordenadas UTM | | Campaña 2009 | | | Características del ensayo | |
|----------|-----------------|---------|---------------------------|-----------------------------|------------|----------------------------|----------------------|
| | X | Y | Duración del Ensayo (min) | Tasa de Infiltración (mm/h) | Fecha | Emplazamiento | Sustrato superficial |
| BALSA 1 | 369832 | 4557443 | 100 | 78 | 23/06/2009 | Cresta 0,8 m | arena |
| BALSA 2 | 369839 | 4557436 | 100 | 82 | 23/06/2009 | Valle surco 0,6 m | arena arcillosa |
| BALSA 3 | 369821 | 4557448 | 63 | 420 | 23/06/2009 | Cresta 0,8 m | arena |
| BALSA 4 | 369803 | 4557426 | 80 | 232 | 23/06/2009 | Valle surco 0,8 m | arena arcillosa |
| BALSA 5 | | | nd | 350 | 23/06/2009 | Cresta 1,0 m | arena |
| BALSA 6 | | | nd | 250 | 23/06/2009 | Valle surco 1,0 m | arena arcillosa |

Tabla 9. Resultados de los ensayos infiltración en la balsa de cabecera.

Table 9. Results of infiltrations tests in the headwaters infiltration pond.

| TRAMO | X | Y |
|----------------|--------|---------|
| Tramo 1 inicio | 369417 | 4559040 |
| Tramo 1 final | 369417 | 4559045 |
| Tramo 2 inicio | 369714 | 4557566 |
| Tramo 2 final | 369713 | 4557573 |

Tabla 10. Coordenadas de los tramos experimentales del canal seleccionados para el muestreo de procesos colmatantes.
 Table 10. Coordinates of testing canal fragments selected to collect clogging samples.

ra adicional en la regulación del caudal y en el filtraje de finos en el agua de recarga.

Desde 2008 se está ensayando en tramos de canal con un caballón longitudinal. En un sector del surco se ha instalado un geotextil (figuras 13). La posición de los tramos experimentales seleccionados es como se indica en la tabla 10.

Los resultados de los ensayos de infiltración tras cesar la recarga artificial se adjuntan en la tabla 11. En general se aprecia que la tasa es más alta en ensayos de corta duración y más baja en ensayos más largos, hecho que induce a pensar en la concentración de finos a cierta profundidad por debajo del canal. De acuerdo con las gráficas de los ensayos de infiltración, la profundidad donde se han detectado ralentizaciones en la tasa corresponde a una franja situada entre 40 y 60 cm de profundidad.

En cuanto al mantenimiento, en los dos últimos veranos se ha labrado el fondo del canal en tramos experimentales, penetrando unos 40 cm sin tratamiento químico alguno. En consecuencia, los ensayos de infiltración (estaciones IV-1, IV-4 e IV-5 de la tabla 5) han presentado incrementos importantes en su tasa respecto a los resultados de los ensayos del año anterior, si bien el orden de magnitud es muy variable. Las causas de tan amplia variabilidad abren una nueva línea de investigación.

Recomendaciones y conclusiones

A tenor de todo lo expuesto, los aspectos operativos y técnicas a implementar que se proponen son:

a) *Mejoras en la caracterización hidrodinámica del acuífero*

Con los datos recopilados y las nuevas aportaciones se ha llevado a cabo una sectorización de la Cubeta en zonas de permeabilidad constatada, cuya ubicación y valores de la K_h se han integrado en la cartografía de la figura 1 y en la tabla 12.

Los parámetros hidrogeológicos obtenidos en estudios previos distan de los obtenidos en situaciones bien controladas en hasta un triple en permeabilidad horizontal y doble en vertical. Este hecho podría acarrear serias consecuencias en dispositivos puntuales de infiltración o inyección, si bien no influye tanto en dispositivos lineales tipo canal, ya que aunque la tasa de infiltración sea



Figuras 13 a) y b). Instalación de geotextiles en el fondo del canal de recarga artificial de la cubeta de Santiuste el 07-11-08.
 Figures 13 a) & b). Geotextils installation in the bottom of the AR channel at Santiuste basin on 2008 November 7th.

| ESTACION | Coordenadas UTM | | 2009 | | | Características del ensayo | |
|-------------|-----------------|---------|---------------------------|-----------------------------|------------|----------------------------|----------------------|
| | X | Y | Duración del Ensayo (min) | Tasa de Infiltración (mm/h) | Fecha | Emplazamiento | Sustrato superficial |
| CANAL GT-1i | 369417 | 4559044 | 46 | 401 | 24/06/2009 | No geotextil | arena |
| CANAL GT-1f | 369417 | 4559045 | nd | nd | 24/06/2009 | Sobre geotextil | arcilla |
| CANAL GT-2i | 369714 | 4557572 | 86 | 108 | 24/06/2009 | Sobre geotextil | arcilla |
| CANAL GT-2f | 369713 | 4557576 | 70 | 160 | 24/06/2009 | No geotextil | arena |

Tabla 11. Ensayos de infiltración sobre y junto a los tramos con geotextiles instalados en el canal.

Table 11. Infiltration tests above and just near those channel fragments which count on installed geotextils.

| Zona del Acuífero | K_h (mm/h) |
|---|--------------|
| Sector septentrional (1) | 1.833-2.163 |
| Sector septentrional (Villeguillo) (2) | 250-583 |
| Área cultivo fresón (3) | 833-1.250 |
| Pinar Nuevo de Ciruelos (4) | 2.083-2.416 |
| Inmediaciones de Coca. Ramal este (5) | 1.166-1.583 |
| Ramal oeste. Sector central (6) | 833-1.166 |
| Sector meridional. Cuerno de la Revilla (7) | 1.666-2.083 |
| Extremo sur Cubeta (8) | 1.083-1.416 |
| Santiuste de San Juan Bautista (9) | 21-208 |

Tabla 12. Valores indicativos de la permeabilidad calculada en distintos sectores de la Cubeta. La posición de estos sectores se presenta en la figura 1.

Table 12. Permeability estimated values for different sectors of Santiuste basin. The location can be consulted in the figure 1.

inferior a lo esperado en un sector determinado, otros sectores compensan en la operatividad los "errores" en la fase de estudios y proyectos (siempre y cuando el canal no funcione a máxima capacidad).

Este hecho constituye una ventaja adicional de los dispositivos tipo canal frente a otros "puntuales", como pozos o sondeos de inyección, que si su ubicación es incorrecta puede acarrear más problemas de gestión que si el remanente se distribuye por otros sectores del acuífero incrementando sus reservas, como ocurre en los canales.

b) Estudios para reducir el efecto de la colmatación (clogging)

A tenor de los resultados relativos a la mejora de la tasa de infiltración y descenso de la colmatación

mediante el pretratamiento de las aguas de recarga artificial, básicamente por filtrado, se ha propuesto un dispositivo genérico para reducir la colmatación. Consiste en la intercalación de tuberías filtrantes en zanjas rellenas de gravilla ubicadas en las zonas donde el canal atraviesa pinares y zonas de paso. Estos se encuentran en etapa experimental en el acuífero de los Arenales (figura 14).

c) Perfiles del canal a partir de la medición de la red de control de la piezometría (RCP) y correlación con los datos de las campañas de aforos diferenciales

Las carencias en el canal inicial fueron estudiadas en base a profundizar más en el conocimiento de la morfología y funcionamiento del acuífero y en contrastar los resultados obtenidos por distintas técnicas. En este caso fue la prospección geofísica la técnica que permitió conocer mejor la variación de los espesores del acuífero a lo largo del trazado del canal, así como los resultados de las campañas de aforos diferenciales, que permitieron conocer qué tramos del canal eran más efectivos y cuáles funcionaban como meras tuberías de conducción. Una vez posicionados los tramos del canal "de infiltración inefectiva", las principales mejoras aplicadas al dispositivo en aras de incrementar su efectividad han sido mejoras en el trazado del dispositivo (construcción de un canal complementario), en sus características constructivas (mayor profundidad y taludes más tendidos) y aspectos operativos (pretratamiento del agua de recarga artificial desde el principio de su vida útil) con objeto de retardar la aparición de procesos colmantes en el nuevo canal.

Se planificaron así mismo labores de limpieza y mantenimiento en ambos canales, especialmente en el canal "Este" (Viejo).

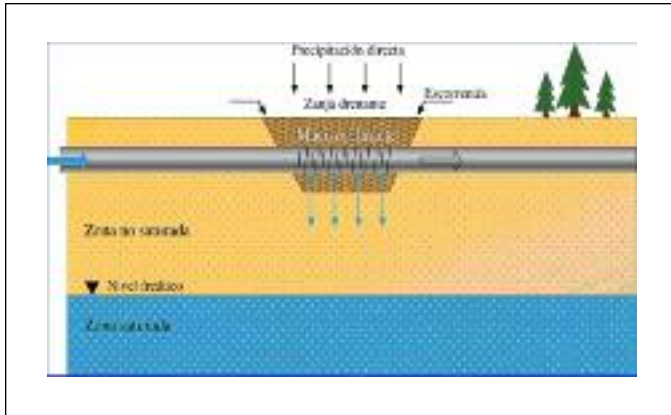


Figura 14. Dispositivo genérico para la recarga artificial desde una tubería ranurada enterrada en dispositivo tipo zanja drenante. Tomado de Fdez. Escalante, 2009.

Figure 14. Generic device for artificial recharge from a slotted pipe buried in a drainage ditch device. Taken from Fdez. Escalante, 2009.

d) *Influencia del periodo y caudal de recarga artificial en la tasa de infiltración y su manejo para aumentar la efectividad de los dispositivos*

En cuanto a la evolución de la tasa de infiltración a lo largo del período de recarga y tras constatarse el impacto negativo que provoca el aire que queda atrapado en los poros (durante un período variable), se está ensayando a disminuir el caudal de entrada al dispositivo durante los ciclos de helada (cierres manuales de la válvula a cargo del personal de cada Comunidad de Regantes). De este modo se favorece la desaireación durante los días con una tasa de infiltración menor a través del suelo congelado. Al mismo tiempo se minimiza la precipitación de carbonatos, de alto poder obstructor, en determinados sectores del acuífero, especialmente aquellos con ambientes reductores. La entrada de aire se puede reducir evitando el efecto *cascading* en las aguas de recarga artificial cuando sobrepasan los dispositivos de “parada” (prefabricados de hormigón intercalados en el canal a modo de represas). Se reduce así la disolución y la incorporación de partículas gaseosas al agua de AR. Para ello, los ensayos llevados a cabo hasta la fecha se basan en la implantación de sistemas de vasos comunicantes por debajo de las “paradas”. Otra alternativa ensayada ha sido separar la *parada* del suelo, en lugar de permitir que el agua represada salte por encima de ella. De este modo se evita el efecto “cascada” y el batido de las aguas por efecto de su caída libre por encima de las compuertas, acción que incrementa la concentración de gases disueltos.

En cuanto a la regulación del caudal, medida adicional a reducir los finos en el agua de recarga artificial y a disminuir la entrada de aire al acuífero, se aprecia que la recarga más efectiva se produce bien a caudales muy altos o bien a caudales reducidos (del orden de 150 a 200 l/s de caudal circulante medio por el canal). Caudales mayores incrementan la oxigenación del agua y traen consigo mayor cantidad de finos en suspensión, disminuyendo la tasa de infiltración.

e) *Actuaciones en la morfología de los dispositivos y del medio receptor (balsas y canales)*

Los caballones en el fondo de las balsas de infiltración han incrementado la tasa de infiltración en todos los ensayos realizados con respecto a los ensayos en balsas de fondo plano. La distancia entre las crestas que ha dado valores más altos ha sido en torno a 80 cm (las tasas obtenidas en un único ciclo de operatividad han sido mayores que en las mediciones realizadas a 60 y 100 cm), alcanzando valores cercanos al doble.

En las operaciones de mantenimiento hay que incidir especialmente en mantener la limpieza de los surcos, tanto en los caballones de las balsas como en el caballón único longitudinal en la parte central del canal. Se plantea además instalar una/s lámina/s de geotextil/es alargada/s de baja permeabilidad que permita/n su reemplazo. Este tipo de ensayos se están realizando en la actualidad. Aparentemente deberán ser estudiados para cada caso concreto, habida cuenta de la elevada variabilidad de los resultados. La experiencia realizada ha desprendido tasas de infiltración de 160 mm/h sin geotextil y 108 mm/h con él. La cuestión que suscita es si tan moderada diferencia en la tasa de infiltración compensa los costes de instalación y de extracción del geotextil (con finos depositados en su superficie) durante las labores de mantenimiento.

Los análisis de las curvas de los ensayos de infiltración indican que existe una franja, situada entre 50 y 60 cm de profundidad, donde se han detectado descensos en la K_v . De este modo, el tratamiento mecánico durante las labores de conservación debería ser más penetrativo que el realizado hasta ahora (aumentando la franja removilizada de 40 a hasta 60 cm de profundidad).

Estos aspectos operativos están siendo aplicados en los dispositivos, cada vez más mejorados. No obstante, el proceso de mejora nunca parece quedar concluido y se prolonga en el tiempo hacia etapas posteriores del proyecto de I+D+i.

Como **conclusiones generales** cabe destacar los siguientes aspectos:

El seguimiento del dispositivo de AR de la Cubeta de Santiuste cuenta con seis años de bagaje y sucesivas obras de ampliación, contando con tramos del canal cuya operatividad varía entre uno y seis años. El Carracillo cuenta ya con tres años de operatividad y décadas de ensayos, también con sucesivas obras de mejora. Esto posibilita realizar ensayos en tramos de canal que llevan operando de uno a seis años en un mismo dispositivo, y consecuentemente presentan distintos rangos de colmatación.

A partir de la descripción y análisis de las distintas tipologías de impactos negativos y problemas encontrados en los dispositivos y experiencias de AR en las zonas piloto, se proponen varios aspectos operativos a aplicar en las operaciones de recarga artificial:

- Es preciso minimizar la colmatación mediante el pretratamiento de las aguas de recarga artificial y el mantenimiento de los dispositivos.
- La tendencia descendente de la tasa de infiltración se ha reducido mediante la aplicación de técnicas de regulación del caudal, filtrado de finos y reducción del aire (pretratamiento) en el agua de AR. Resulta recomendable evitar batir las aguas y recargar a velocidades lentas. Los sistemas de vasos comunicantes y los tramos de canal enterrados con tubería filtrante están dando buenos resultados.
- El control manual de la válvula de entrada a los canales que llevan a cabo los regantes, apoyados por un asesoramiento técnico continuo, está arrojando buenos resultados. De este modo se está minimizando el volumen de recarga artificial durante ciclos de helada, se evita que entren aguas de alta turbidez del río de toma tras fuertes precipitaciones en el dispositivo de AR, etc.
- Los caballones en el fondo de las balsas y canales aumentan la tasa de infiltración hasta el doble con respecto a balsas de fondo plano. A los aspectos de diseño hay que añadir otros de previsión de operaciones de limpieza y mantenimiento.
- Se hace recomendable el seguimiento de la evolución del acuífero y de la efectividad de las actuaciones, sea cual sea la fuente de financiación.

En ambos casos los nuevos canales han representado una mejora sustancial con respecto a los viejos, tanto por basarse más en criterios hidrogeológicos como por haber aplicado mejoras basadas en investigaciones y en pruebas de ensayo y error. El aprendizaje en este sexenio permitirá diseñar

nuevos ramales para el canal, nuevas mejoras y dispositivos de mayor efectividad que los originales.

En general se aprecia un incremento en la tasa de infiltración tras la aplicación de este tipo de medidas en zonas concretas, lo que, con ciertas limitaciones, resultaría extrapolable a escenarios análogos.

Los prototipos genéricos propuestos requieren un grado de desarrollo de ingeniería posterior que permitan implementar diseños que permitan objetivos tales como: Minimizar las pérdidas (evapotranspiración, colmatación, etc.), facilitar las labores de descolmatación, reducir los costes en el transporte y almacenamiento, permitir funcionar en el punto óptimo de recarga o tasa de infiltración más efectiva, incluso en situaciones climatológicas adversas (congelación del suelo, tormentas o avenidas). Además su vida útil deberá ser suficientemente alta para obtener una alta rentabilidad y los costes de construcción y mantenimiento no deben ser elevados.

Agradecimientos

A Ramón Galán, director de las obras de MAR en Santiuste y Carracillo por parte de la Secretaría General de Desarrollo Rural del MARM. El seguimiento del sistema se lleva a cabo en el marco del proyecto de I+D+i DINA-MAR 30/13.053, financiado por la SEPI y el Grupo Tragsa.

Referencias

- Blaxejewski, M. 1979. Gases in the ground and their effect during artificial recharge of groundwater. *Int. Symp. On Artificial Groundwater Recharge*. Dortmund. Vol IV, paper VI. 4. DVWK, Bull. 14. Verlag Paul Parey. Hamburg-Berlin, pp. 59-70.
- Bouwer, H. 1999. Artificial recharge of groundwater: Systems, design, and management. In: Mays LW (ed.) *Hydraulic design handbook*. McGraw-Hill, New York, pp 24.1-24.44
- Bouwer, H. 2002. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hidrogeology Journal*, volume 10, nº 2, abril 2002.
- Christen, E.W, Prasad, A & Khan, S. (2000). "Using piezometric data to determine area-wide annual net recharge: Analysis for the Coleambally Irrigation Area." Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (e.a. CSIRO) Land and Water Griffith NSW 2680. Technical Report 39/00, July 2000. 17 pp. Australia.
- Custodio, E. (1986). "Recarga artificial de acuíferos." *Boletín de Informaciones y Estudios*, nº 45. Servicio

- Geológico, Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU). Madrid. 148 pg.
- DINA-MAR, 2009. Artificial recharge of aquifer's potential in Spain. Ponencia presentada en el 5º Istanbul World Water Forum, spanish pavillion, 2009 march 21th. Grupo Tragsa. Disponible en <http://www.dina-mar.es/Default.aspx?n=67>.
- Fernández Escalante, A.E. 2005. Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia). Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- Fernández Escalante, A.E. 2009. Técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (S.A.T.) aplicadas a la gestión de la recarga artificial. 2ª Edición. Serie Hidrogeología Hoy. Grafinat.
- Gale, I. 2005. "Strategies for MAR in semi-arid areas". UNESCO-IAH.
- Gogolev, M. & Ostrander, M. 2000. "Estimating groundwater recharge with Visual HELP model" Proceedings of the IAH 2000 Congress in South Africa, Nov. 2000.
- Healy, R. & Cook, P. 2002. "Using groundwater levels to estimate recharge." *Hydrogeology Journal* Vol 10, nº 1. Feb 2002. AIH-Springer.
- IRYDA. 1990. "Proyecto de Asistencia Técnica para el Estudio Hidrogeológico de la Cubeta de Santiuste (Segovia)." Documento técnico no publicado. IRYDA-ITGE., 1990.
- Krul, WF & Lieftrinck, FA. 1946. "Recent groundwater investigations in the Netherlands." Monograph on the progress of research in Holland. Elsevier, New York, 78 pp.
- MAPA. 1999. "Estudio hidrogeológico complementario para la recarga artificial en la cubeta de Santiuste (Segovia)." Informe técnico no publicado. Secretaría Gral. de Desarrollo Rural-TRAGSATEC. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- MAPA. 2005. Asistencia técnica para el seguimiento y modelización de la recarga artificial en la cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia). Dirección General de Desarrollo Rural-TRAGSATEC (no publicado).
- Massmann, G., Pekdeger, A. & Merz, C. 2002. "Geochemical processes during riverbank filtration in a polder region bordering the river Oder, Germany." *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH.
- MOPTMA. 1994. "Informe sobre la posibilidad de recarga artificial en la Cubeta de Santiuste (Segovia)". No publicado disponible para consulta en la biblioteca del MARM.
- Murillo, J.M., de la Orden, J.A., Armayor, J.L. y Castaño, S. 1999. "La recarga artificial de acuíferos". IGME, Diputación provincial de Alicante.
- Olsthoorn, T.N. 1982. "The clogging of recharge wells, main subjects." *KIWA-communications* 72, Working group on recharge wells (Rijswijk, The Netherlands), 136 pp.
- Pavelic, P., Dillon, P.J., Barry, K, Herczeg, A, Rattray, K, Hekmeijer, P & Gerges, N. 1998. "Well clogging effects determined from mass balances and hydraulic response at a stormwater ASR site." *Third Int. Symp. on Artificial Recharge of Groundwater (TISAR)*. 21-25 September 1998. In: J.H. Peters et al., Balkema, Amsterdam, the Netherlands. pp. 61-66.
- Pérez-Paricio, A. 2007. "Managed aquifer recharge (groundwater artificial recharge) operation tools" 1st Workshop Reclaim Water-Gabardine, Barcelona, Spain 2007.
- Schicht, R.J. & Walton W.C. 1961. "Hydrologic budgets for three small watersheds in Illinois." *Illinois State Water Surv Rep Invest* 40, 40 p.
- Stuyfzand, P.J. 2002. "Quantifying the hydrogeochemical impact and sustainability of artificial recharge systems." *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*, Dillon, P.J. (ed). Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH, The Netherlands.
- DINA-MAR, Gestión de la recarga artificial de acuíferos. Grupo Tragsa, Madrid, 08/2009, <http://www.dina-mar.es>. <http://www.inforiego.es>. 08/2009.

Recibido: junio 2009

Revisado: septiembre 2009

Aceptado: septiembre 2009

Publicado: octubre 2009