

CINCO AÑOS DE RECARGA ARTIFICIAL EN EL ACUÍFERO DE LA CUBETA DE SANTIUSTE (SEGOVIA)

FERNÁNDEZ ESCALANTE, A. Enrique. GRUPO TRAGSA I+D+i, MADRID
MINAYA OVEJERO, M^a Jesús. TRAGSATEC, MADRID

PALABRAS CLAVE

Recarga artificial de acuíferos, MAR, DINA-MAR, Santiuste, Unidad Hidrogeológica 02-17, hidrogeología.

RESUMEN

Se ha llevado a cabo el seguimiento durante los cinco años de funcionamiento del dispositivo de recarga artificial de acuíferos o *Managed Aquifer Recharge* (en adelante MAR) construido por el Ministerio de Agricultura (MAPA) y la Junta de Castilla y León (JCL) en la Cubeta de Santiuste (Segovia). En este periodo se han ido ejecutando mejoras derivadas de la experiencia con objeto de incrementar la tasa de infiltración y obtener una eficiencia mayor en el esquema tradicional de gestión hídrica para el regadío. Algunas de estas mejoras son puramente constructivas, mientras que otras se han centrado en la aplicación y adaptación a las circunstancias del territorio de técnicas de tratamiento de Suelo y Acuífero (SATs). En este artículo se exponen los resultados del seguimiento así como la justificación de las mejoras llevadas a cabo.

1. INTRODUCCIÓN

La *cubeta de Santiuste de San Juan Bautista* es una zona con intensa utilización de aguas subterráneas para la agricultura de regadío, que constituye la principal fuente de ingresos de sus habitantes. La progresiva explotación de los recursos hídricos subterráneos y la necesidad de atender una demanda suficiente para salvaguardar la producción de las cosechas provocó un descenso acusado de los niveles del agua en las últimas décadas (en torno al 50-60% de su espesor saturado inicial, IRYDA, 1990), lo que propició la realización de una serie de estudios y obras promovidos por el M.A.P.A. y la JCL y ejecutadas por el Grupo Tragsa para la recarga artificial del acuífero mediante canales, balsas y pozos con los excedentes hídricos derivados del río Voltoya durante la época invernal y su posterior empleo en el periodo estival.

Las actuaciones iniciales van siendo mejoradas sobre la marcha, a medida que emanan conclusiones de las experiencias de años precedentes. De este modo todavía se están efectuando obras de ampliación y mejora en el dispositivo.

2. CONTEXTO GEOLÓGICO

La Cubeta de Santiuste es un acuífero bastante bien conocido gracias a las actuaciones llevadas a cabo por el MAPA y actividades de I+D. Se encuentra en el sector oeste de la provincia de Segovia y sureste de la provincia de Valladolid, y está comprendida entre los términos municipales de Llano de Olmedo, Villeguillo, Coca y Santiuste de San Juan Bautista. Ubicada en la margen izquierda de los ríos Voltoya y Eresma, cuenta con una superficie aproximada de 42 km² (Figura 1).



Figura 1. Entorno de la zona de estudio sobre la cartografía 5L del SGE.

Se trata de una superficie poligénica, caracterizada por la existencia de una formación arenosa cuaternaria (Unidad Arévalo), que rellena una cavidad compleja de un sustrato Terciario arcilloso (Facies Cuesta) o areno-arcilloso (Facies Puente Runel).

Los materiales de edad miocena presentan una potencia total cercana a 70 m y presenta los dos tipos de facies mencionadas. Afloran en los bordes de la superficie del páramo y en los escarpes de los ríos Eresma y Voltoya.

Los mayores espesores cuaternarios se dan en la unidad Arévalo, alcanzando potencias incluso superiores a 55 m. Esta unidad da origen a la superficie morfológica de Coca-Arévalo, constituida por depósitos arenosos de origen fluvial, parcialmente recubierta por depósitos eólicos y de áreas endorreicas, con varios sistemas lagunares ya fosilizados, lo que lleva a cuestionar el término de “cubeta” ante la elevada poligenia del sistema.

La descripción detallada de las facies de los acuíferos y su funcionamiento hidrogeológico se describe con detalle en MAPA, 2005 y Fdez. Escalante, 2005, por

tanto nos limitaremos a presentar una actualización de la cartografía geológica de la *Cubeta*, que supone una modificación de la cartografía MAGNA, hojas 428 (16-17), Olmedo; 429 (16-18), Cuéllar; 455 (16-18), Arévalo, y 456 (16-19), Nava de la Asunción. Con objeto de realzar aquellas características del paisaje condicionadas por la geología, se ha realizado un bloque diagrama con el Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio. A este se ha sobrepuesto la capa ráster georreferenciada del nuevo mapa geológico (Figura 2).

Los principales relieves coinciden en gran medida con los afloramientos de facies terciarias, así como la presencia de depósitos de piedemonte en la margen oeste del arroyo de la Ermita. Además hay varios sistemas de terrazas fluviales sobrepuestos en las márgenes de los ríos Voltoya y Eresma, con distribución asimétrica y mayor desarrollo en la margen izquierda de los cauces.

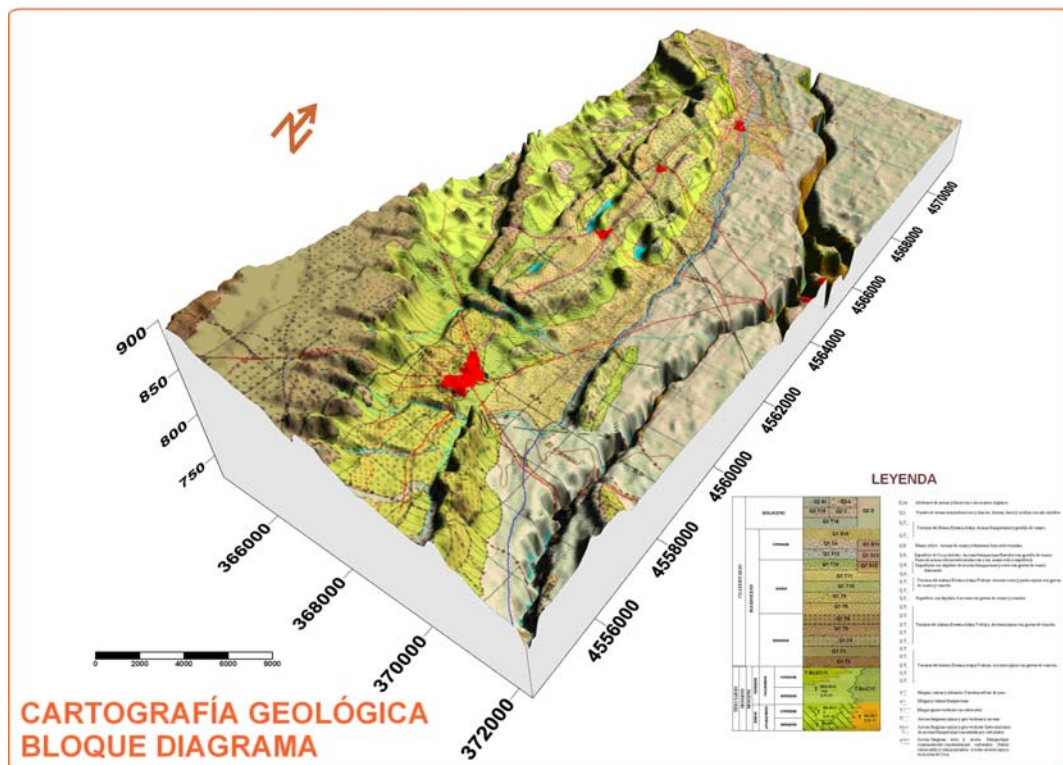


Figura 2. Bloque diagrama del MDT de la zona de estudio con una capa ráster sobrepuesta correspondiente al mapa geológico revisado.

3. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO DE RECARGA ARTIFICIAL

El dispositivo está basado en la construcción de un pequeño embalse en el río Voltoya, a una cota de 814 msnm. Desde aquí hay una tubería enterrada con varias válvulas intercalas de 10 km. de longitud pendiente abajo, que termina en un depósito de 36 m³ a cuya entrada hay instalado un caudalímetro. Este depósito constituye la cabecera del dispositivo (figuras 3). A continuación hay una balsa de decantación de 14.322 m² de superficie, de la que parten los dos canales principales, el originario o “Caz Viejo”, que comenzó a funcionar en 2002 por el este

de la Cubeta; y el “Caz Nuevo”, operativo desde 2005, que discurre semiparalelo al anterior y a su izquierda, por la zona de mayor espesor del acuífero, (“caz” es la terminología regional empleada para este tipo de canales).

El “Caz Viejo” parte de la balsa de decantación adyacente al depósito. 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, contruidos con cuatro módulos prefabricados 2 x 1'5 x 1 sobre solera de hormigón H-125, dos de ellos son abiertos con tejadera de 2 x 1 m (parada) y los otros 2 cerrados de pasarela de manipulación y protección contra la erosión de la lámina vertiente.

La superficie de infiltración del Caz Viejo ronda los 33,300 m², considerando la infiltración por el fondo y por las paredes.

Para los cruces con caminos y accesos a fincas se construyeron obras de paso, constituidas por 8 módulos cerrados colocadas sobre solera de hormigón con anchura total del paso de 4 m.

La nueva disponibilidad de agua ha traído consigo un nuevo incremento de las áreas en regadío, y el uso de un cierto volumen del agua de recarga artificial para fines medioambientales, sin el cual los humedales del sistema seguirían en un proceso de degeneración progresiva. De este modo, en verano de 2005 se han realizado obras para la recuperación de la laguna de la Iglesia, mediante una derivación del dispositivo de recarga artificial principal hacia el sector oeste del acuífero. La obra realizada consiste en una derivación del caz principal del que surge una tubería de 80 mm Ø y 747 m de longitud, desde el canal hasta la laguna, enterrada por el margen derecho de la carretera que une Coca con Villagonzalo. Entre noviembre de 2005 y mayo de 2006 el humedal recibió el vertido directo de 11.600 m³ de agua del dispositivo de AR, lo que representa el 0,13 % del total derivado del río Voltoya para recarga artificial. En la actualidad está previsto prolongar el dispositivo a la laguna de las Eras.

El Nuevo Caz discurre semiparalelo al anterior y tiene una longitud total de 17.293 m. Está ubicado en el sector de máximos espesores de las hoyas fosilizadas que constituyen la Cubeta, 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 ha comenzado 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, que, atravesando Villeguillo por un sistema de drenaje antiguo, 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 m tras las obras de ampliación hacia el norte en Llano de Olmedo, llevadas a cabo por la JCL en 2007.

Se ha construido una vía de servicio paralela a ambos canales de 4 m de anchura y elevada 50 cm con respecto al terreno, como barrera ante posibles inundaciones.

El caudal procedente del río Voltoya ronda los $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$ 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 del año hidrológico.

La altura de la lámina de agua en el interior del canal oscila entre 50 y 100 cm, con un promedio de 80 cm. A lo largo de 2004 fueron construidas cuatro balsas de infiltración, la de cabecera de decantación y las de la depuradora; en 2005 dos más con fines medioambientales.



Figuras 3 a) y b)- Cabecera del dispositivo de AR y balsa de decantación de la que parten ambos canales.

En la figura 4 se muestra el dispositivo sobre la cartografía de isopacas del acuífero arenoso cuaternario. En él se pueden diferenciar los canales, balsas, etc.

4. OBJETIVOS

Los principales objetivos son el estudio de la evolución de la recarga artificial, especialmente en cuanto a evolución de la tasa de infiltración y del volumen de agua infiltrado a lo largo de un lustro de actividad, con objeto de cuestionar la idoneidad de las distintas actuaciones realizadas [bien sean estructurales o mediante técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SAT)], de cara a planificar futuras actuaciones de mejora.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales empleados son aquellos tendentes a la adquisición de datos, en concreto la determinación de la permeabilidad y de la tasa de infiltración *in situ* (infiltrómetro de doble anillo, balsas piloto y ensayos *Lugeon* y *Lambe*), así como permeámetro triaxial en laboratorio. El estudio de la Zona No Saturada (ZNS) se está llevando a cabo mediante humidímetros y tensiómetros conectados a registradores en continuo.

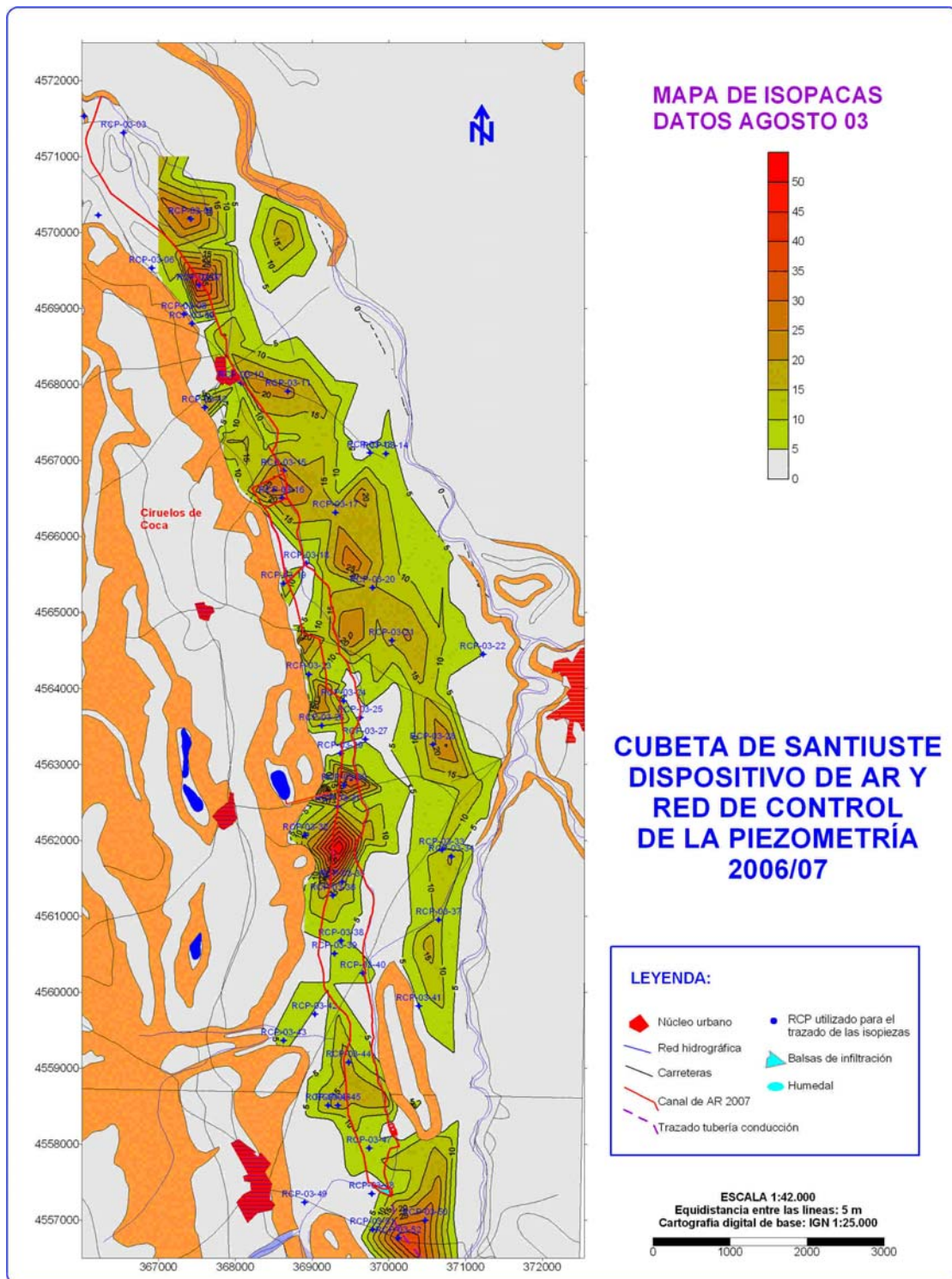


Figura 4. Trazado del dispositivo de recarga artificial de la Cubeta de Santiuste.

El estudio de la variación de agua almacenada en el acuífero se está realizando mediante el método WTF o *Water Table Fluctuation*, a partir de la medición de la Red de Control de la Piezometría (RCP), constituida por 54 puntos de agua, y el tratamiento de esta información mediante operaciones de álgebra de mapas entre

las mallas de la superficie del terreno, las capas freáticas y el techo del acuitardo basal incorporadas a un SIG.

La evolución del caudal a lo largo del canal se ha calculado mediante la realización de aforos secuenciales a lo largo del mismo. Se han llevado a cabo varias campañas en ocho estaciones a lo largo del primer canal y ocho en el segundo, deduciendo qué tramos tienen altas tasas de infiltración y cuales son “inefectivos”.

La disociación entre el agua infiltrada procedente de la lluvia y de la recarga artificial se lleva a cabo estudiando la humedad en la ZNS, mediante el modelo HELP (*Hidrological Evaluation Landfill Performance*) y elaborando balances hídricos parciales dentro del sistema.

4. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

A continuación se describen las operaciones de recarga artificial en los cinco años de operatividad del dispositivo, lustro durante el cual se han realizado sucesivas obras de mejora y ampliaciones.

El seguimiento de la evolución de la recarga artificial durante los dos primeros ciclos fue llevado a cabo por el Tragsatec por encargo del MAPA (en MAPA, 2005), lo que posibilita disponer de todos los datos precisos para su reinterpretación.

El tercer ciclo fue seguido por el autor, quien tomó los datos precisos para que no se perdiera la cadencia iniciada en 1999, ya que ningún organismo público estuvo llevando a cabo actividades durante este ciclo.

Los ciclos cuarto y quinto han sido seguidos y tomadas medidas en el marco del I+D+i DINA-MAR. Ha sido un bienio en el que la gestión fue transferida a la Comunidad de Regantes de Santiuste, y de no ser por el proyecto de investigación, no se habrían tomado más datos que el caudal derivado del río Voltoya.

Todos los datos puntuales pueden ser hallados en las referencias bibliográficas, de modo que en este texto nos limitaremos al cumplimiento de los objetivos.

En la tabla 1 se sintetizan los principales cálculos llevados a cabo en estos cinco ciclos de seguimiento. La tabla resume, respectivamente, el año hidrológico, la precipitación total en ese período en el área según *Inforiego*, las fechas de inicio y final de la concesión, los días de operatividad total (excluyendo incidencias), el volumen total derivado del río Voltoya, el caudal medio circulante a lo largo del canal (caudal/ longitud), el volumen infiltrado en el acuífero deducido de la aplicación del método WTF, el porcentaje con respecto al caudal derivado y, por último, la oscilación media (ascenso) del nivel freático medio del acuífero como consecuencia de cada ciclo de recarga artificial (AR) con respecto al nivel de llenado precedente.

Vol. infiltrado	P Tot (mm)	Inicio ciclo	Final ciclo	días efect.	Q deriv	Qm canal	Vol. inf. Tot.	% vol inf/Q	Oscilación media n.e.
-----------------	------------	--------------	-------------	-------------	---------	----------	----------------	-------------	-----------------------

					(hm ³)	(l/s)	(hm ³)		(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

Tabla 1. Oscilación del nivel freático como consecuencia de los distintos ciclos de recarga artificial.

5. DISCUSIÓN

Para determinar la evolución del caudal circulante a lo largo de cada canal se han llevado a cabo campañas de aforos secuenciales. Los resultados de la campaña de marzo de 2004, con un grado de colmatación bajo, se presentan en la tabla 2.

NOMBRE	PARAJE	X	Y	Dist caz (m)	Q (l/s)	Dif. Q inf tramo (l/s)	Qi (l/s/m ²)
EA-01	Cabecera	369686	4557696	0	591.52		
EA-02	Transformador	369566	4558102	270	544.12	47.4	0.11
EA-03	Salvadora	369490	4559485	695.16	453.16	90.96	0.14
EA-04	Linde	369069	4560534	2115.69	462.31	-9.15	0.00
EA-05	Dehesa Tetuán	369234	4561553	3286.37	438.26	24.05	0.01
EA-06	Castrillo	369371	4562979	4321.22	289.93	148.33	0.09
EA-07	Ave	369282	4563923	5756.24	291.47	-1.54	0.00
EA-08	Cº Carretas	368809	4564981	7007.97	179.39	112.08	0.06
EA-09	La Gulla	368511	4566096	8162.1	0	179.39	0.10

Tabla 2. Resultados de la campaña de aforos secuenciales llevada a cabo en marzo de 2004.

La evolución del caudal circulante y consecuentemente de la infiltración a lo largo del canal se puede apreciar en la gráfica 5.

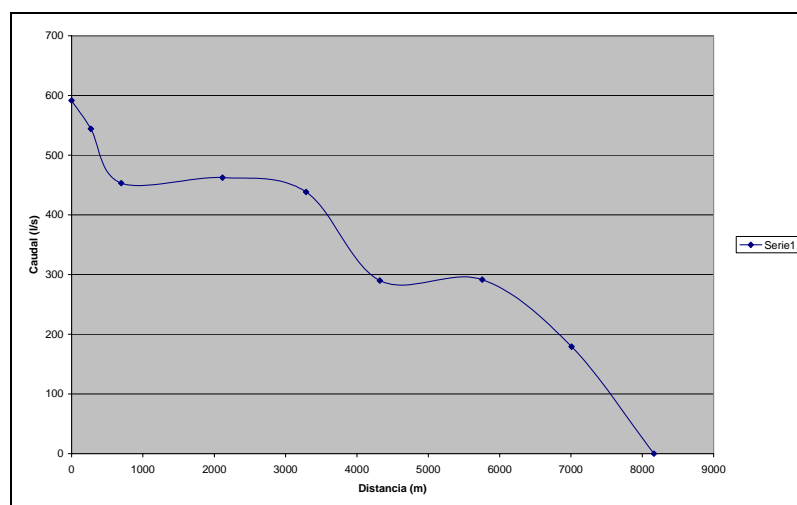


Figura 5. Evolución del caudal de agua que circula por el canal de recarga artificial

Las tendencias de la gráfica resultan indicativas de la variación de las tasas de infiltración. El aumento de caudal se debe a la recogida de la escorrentía de la vía del tren de alta velocidad Madrid-Valladolid (punto 7).

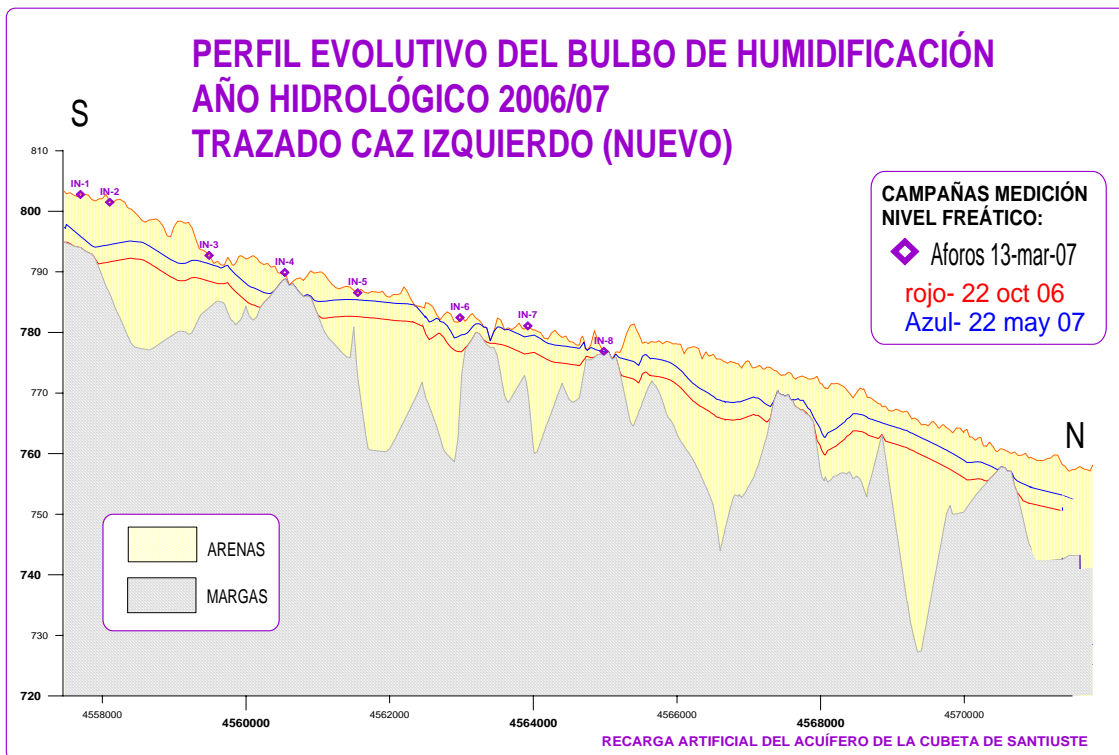
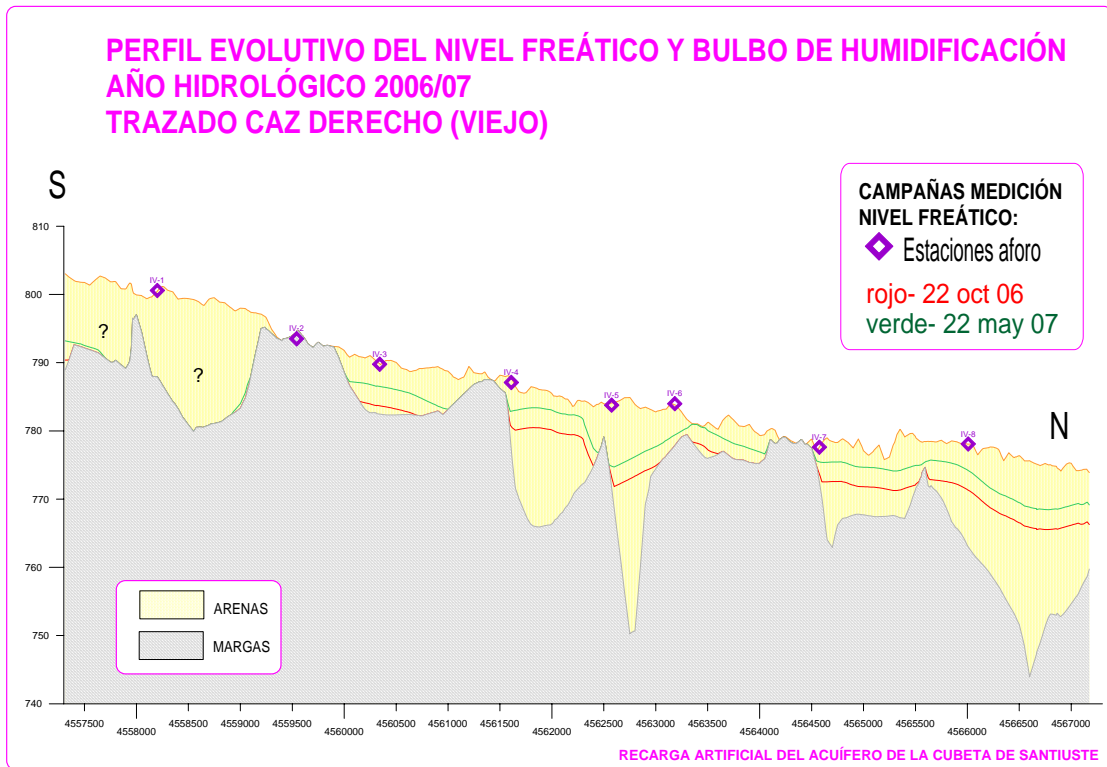
Además se han realizado dos perfiles a lo largo de los canales de recarga artificial, con expresión del espesor del acuífero en cada tramo y la posición de los niveles freáticos para las campañas de medida disponibles. Las siguientes figuras ilustran este aspecto para el ciclo de 2004 (figura 6, datos en tabla 2) y último ciclo de AR, 2006/07 (figuras 7).



Figura 6. Perfil hidrogeológico del caz de recarga artificial con la ubicación de los puntos donde se han realizado los aforos secuenciales en fecha 21/01/04 (azul) y 16/03/04 (morado).

Las principales mejoras que ha tenido el dispositivo en aras de incrementar su efectividad se basan en medidas estructurales (construcción de un nuevo canal) y técnicas de Tratamiento de Suelo y Acuífero (SAT).

Las primeras surgieron como consecuencia de los escasos caudales infiltrados en los primeros ciclos, dado que una parte del mismo, al haberse trazado por un cauce fluvial precedente, no discurría por zonas del acuífero de cierto espesor. Para justificar la nueva obra se calculó la “longitud de infiltración efectiva”, es decir, la longitud total de los tramos del caz que discurren sobre afloramientos permeables con espesor de arenas desaturadas susceptibles de almacenar agua. Esta longitud fue estimada en 7.640 m, mientras los 3.027 m restantes discurren 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”.



Figuras 7 a) y b). Perfil de la superficie del terreno elaborada a partir del MDT a lo largo de cada canal y del espesor del acuífero, con expresión de la posición del nivel freático.

En nuevo canal fue proyectado y construido conectando los distintos depocentros del acuífero, con un trazado apoyado en estudios de microtopografía para permitir fluir el agua por gravedad.

El trazado efectivo del caz viejo presenta una capacidad de infiltración variable en el espacio y en el tiempo. De acuerdo con los ensayos de infiltración en canales y balsas realizados en 2003 y 2004, la tasa de infiltración o permeabilidad media a lo largo del ciclo de recarga oscila entre 0,86 y 3 m/día. De acuerdo con los datos bibliográficos; Kv se estimaba en 3 m/día (IRYDA, 1990; MAPA, 1999a). Según otras fuentes oscila entre 6 y 10 m/día (MOPTMA, 1994).

La tasa de infiltración media, sin disociar la fracción procedente del agua de lluvia, para los últimos cuatro años ha sido del 80,70 %, con un valor mínimo de 69,67% en el ciclo 2005/06 (año hidrológico de carácter seco), y máximo del 96,13 % (húmedo).

A este respecto cabe destacar cómo ha ido disminuyendo la tasa de infiltración media total en el caz “viejo” a lo largo de cuatro ciclos, constatando la alta influencia de la colmatación en la tasa de recarga, según se desprende del siguiente gráfico (figura 8). Téngase en cuenta que el último valor corresponde a la entrada en funcionamiento del caz nuevo (izquierdo).

El trazado del canal “nuevo” parece tener alta efectividad en la mayor parte de su recorrido, si bien solo ha habido un primer año de seguimiento.

Las posibilidades de mejora de los canales mediante técnicas SAT aplicadas hasta la fecha se basan en la regulación del caudal de entrada dependiendo de los ciclos de helada, la instalación de lechos calcáreos para corregir la acidez en ciertos tramos e impedir la generación de costras calcáreas que disminuyen la tasa de infiltración, el empleo de vegetación en verano que con sus raíces afecta la capa de procesos colmatantes mediante métodos biológicos, etc. En Fdez. Escalante, 2005, se propone una batería de técnicas SAT compleja.

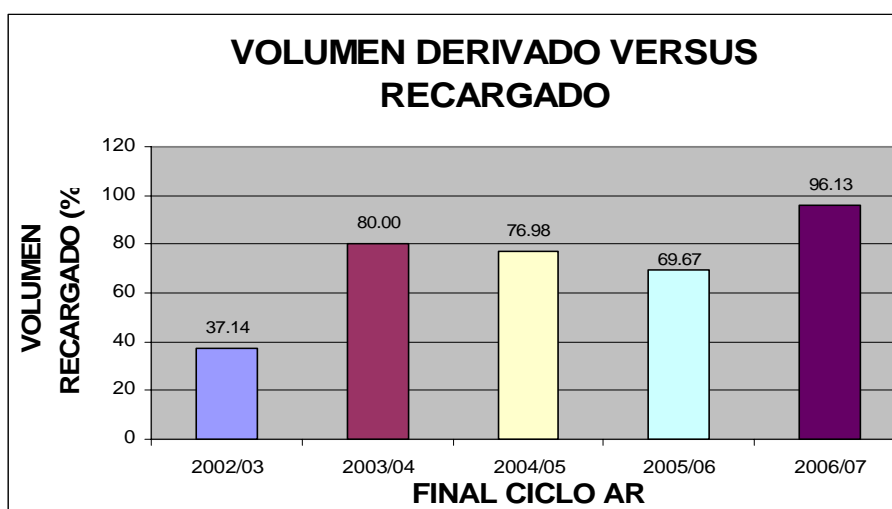


Figura 8. Evolución de la tasa de infiltración medio o ratio entre el volumen de agua derivado e infiltrado a lo largo de los cinco ciclos de AR en la Cubeta de Santiuste.

En cuanto al coste del agua, se han calculado los ratios de inversión para las balsas y presas construidas por el Grupo Tragsa en el último bienio y comparadas con los costes del agua de AR en cuanto a ratio de inversión se refiere, es decir, coste de construir el dispositivo partido por volumen de agua almacenado. El tratamiento estadístico ha arrojado los siguientes ratios medios de inversión:

- Ratio balsas: 9,75 €/m³ de capacidad.
- Ratio presas: 0,80 €/m³ de capacidad.
- Ratio dispositivo AR superficial (canales): 0,21 €/m³ de capacidad.

De este modo el agua de AR puede ser considerada “barata” frente a otros esquemas de gestión hídrica.

6. CONCLUSIONES

El seguimiento del dispositivo de AR de la Cubeta de Santiuste cuenta con cinco años de bagaje (desde sus inicios), por lo que resulta recomendable proseguir con este tipo de medidas sea cual sea el ámbito de financiación.

El nuevo canal ha representado una mejora sustancial con respecto al viejo, al estar más apoyado en criterios hidrogeológicos y en los resultados de los primeros años de “ensayo y error”. El aprendizaje en este lustro permite diseñar nuevos dispositivos con mayor efectividad desde sus comienzos.

La colmatación de nuevo se consolida como el principal inconveniente e impacto en los dispositivos de AR, con incidencia directa e inmediata en la tasa de infiltración. De ahí la necesidad de estudiar técnicas y medidas para combatirla. Gran parte de ellas se apoyan en técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (SAT). Cabe destacar:

- Pretratamiento adecuado de las aguas de AR y/o empleo de aguas de buena calidad para este fin
- Recargar a velocidades lentas, evitando el batido de las aguas, el *cascading*, etc.
- Minimizar la oxigenación de las aguas y corrosión de las estructuras, controlando ambientes oxidantes, recargando con aguas a temperaturas mayores que las aguas del acuífero, etc.

El estudio del coste económico, considerando ratios de inversión frente a presas y balsas, permiten decir que el agua de AR, al menos en este caso, puede ser considerada “barata” frente a otros esquemas de gestión hídrica.

7. AGRADECIMIENTOS

A Ramón Galán, director de obra por parte de la Secretaría General de Desarrollo Rural del MAPA. El seguimiento del sistema se lleva a cabo en el marco del proyecto de I+D+i DINA-MAR, financiado por el Grupo Tragsa con código 00/13.053.

8. BIBLIOGRAFÍA

- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E., & LÓPEZ, J. (2002). "*Hydrogeological studies preceding artificial recharge of Los Arenales aquifer, Duero basin (Spain)*". 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.
- 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. Enero de 2005.
- GALÁN, R, FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E. Y MARTÍNEZ, J. (2001). "Contribuciones al estudio hidrogeológico para la recarga artificial del acuífero de la cubeta de Santiuste. (Segovia)." VII Simposio de Hidrogeología, AEH, Murcia.
- MAPA. (1999a) "*Estudio hidrogeológico complementario para la recarga artificial en la Cubeta de Santiuste (Segovia)*". Dirección General de Desarrollo Rural.
- MAPA. (1999b). "*Proyecto de recarga del acuífero de la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (Segovia)*." IRYDA-TRAGSA.
- 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).