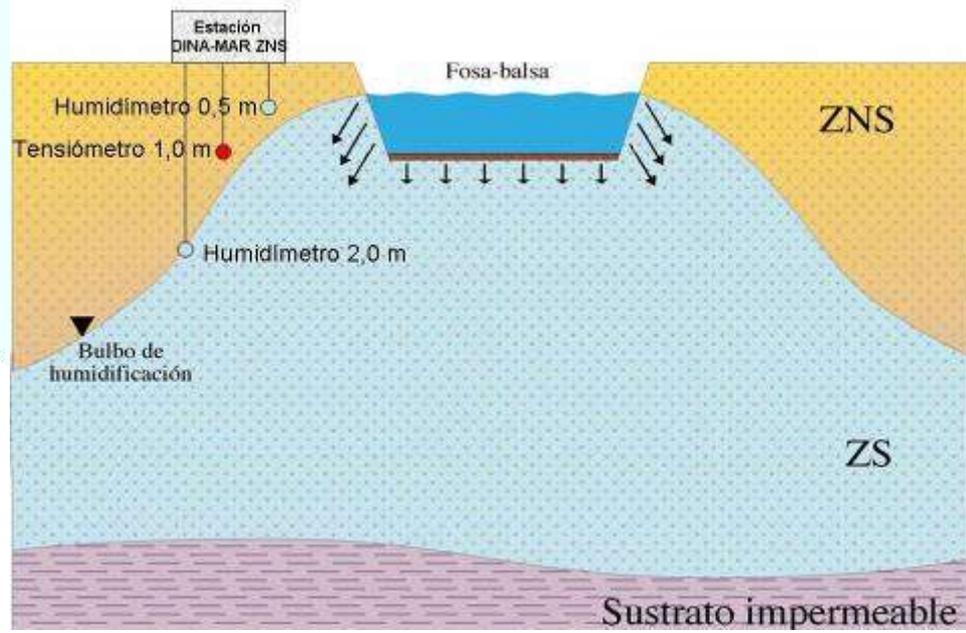
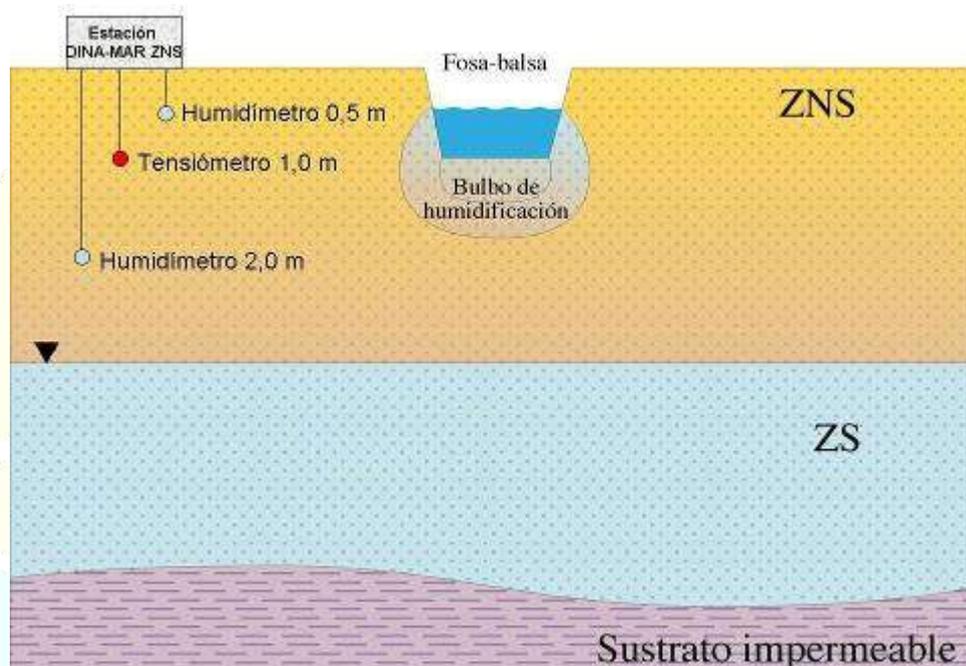


CRITERIOS TÉCNICOS PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN DE LA RECARGA MEDIANTE TÉCNICAS SAT.

EJEMPLOS EN LOS “LABORATORIOS EXPERIMENTALES” DEL ACUÍFERO DE LOS ARENALES (CUBETA DE SANTIUSTE Y COMARCA DEL CARRACILLO)

Por FERNÁNDEZ ESCALANTE, Enrique (IP)

Mecanismo hidrodinámico de la AR



Green and Ampt, 1911

La infiltración a través de un suelo saturado en agua está determinada por la ecuación de Green-and-Ampt (*Green and Ampt, 1911*), que es una adaptación de la ecuación de Darcy para suelos saturados. Su expresión es:

$$V_i = K \frac{H_w + L_f + h_{we}}{L_f}$$

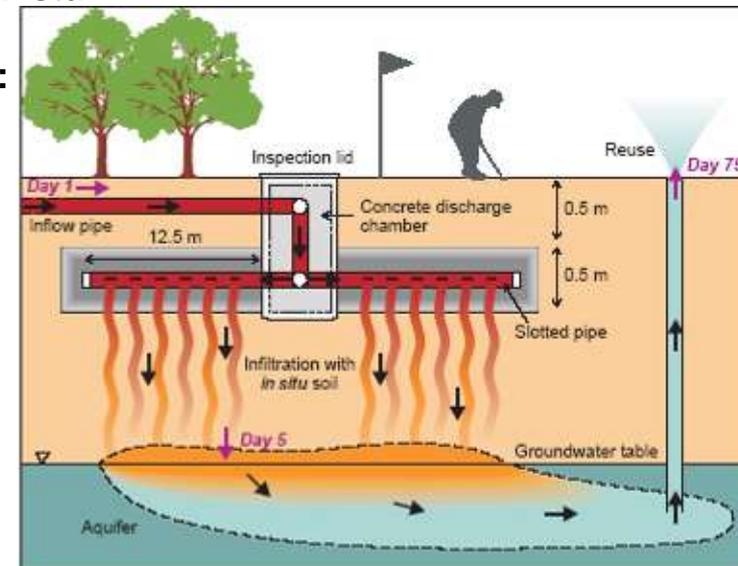
Donde:

- V_i es la tasa de infiltración.
- K es la conductividad hidráulica de la zona humedecida.
- H_w es la profundidad del agua con respecto al suelo.
- L_f es la profundidad del frente del bulbo de humidificación.
- h_{we} es la capacidad de succión capilar o presión negativa en el frente del bulbo de humidificación.

La ecuación no considera el aire disuelto, por lo que el resultado queda subestimado, si bien el parámetro h_{we} puede ser modificado para un cálculo más realista.

Para ello *Bouwer et al, 1999*, proponen los siguientes valores: (por experiencias realizadas en infiltrómetros).

- Arenas gruesas: -5
- Arenas de grano medio: -10
- Arenas de grano medio fino: -15
- Arenas y limos- limos arenosos: -25
- Limos: -35
- Arcillas estratificadas: -35
- Arcillas dispersas: -100



TÉCNICAS SAT *(Soil & Aquifer Treatment)*

Identificación de impactos y afecciones Vs

soluciones técnicas (Técnicas SAT)

SATs:

1. Mayor impacto: La **colmatación** (*clogging*)
2. Reducción entrada de **aire** en dispositivos de AR
3. Actuaciones en la **morfología** del medio receptor
4. Influencia del **periodo y caudal** de recarga artificial en la tasa de infiltración y efectividad del dispositivo

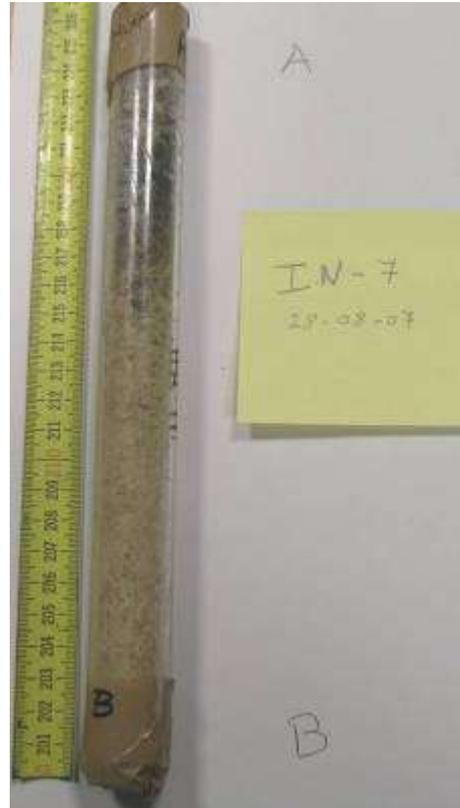


SATs en Santiuste



- 7 años de operatividad
- 27 km de canal
- 5 balsas de infiltración
- 3 humedales artificiales
- 3 pozos de infiltración

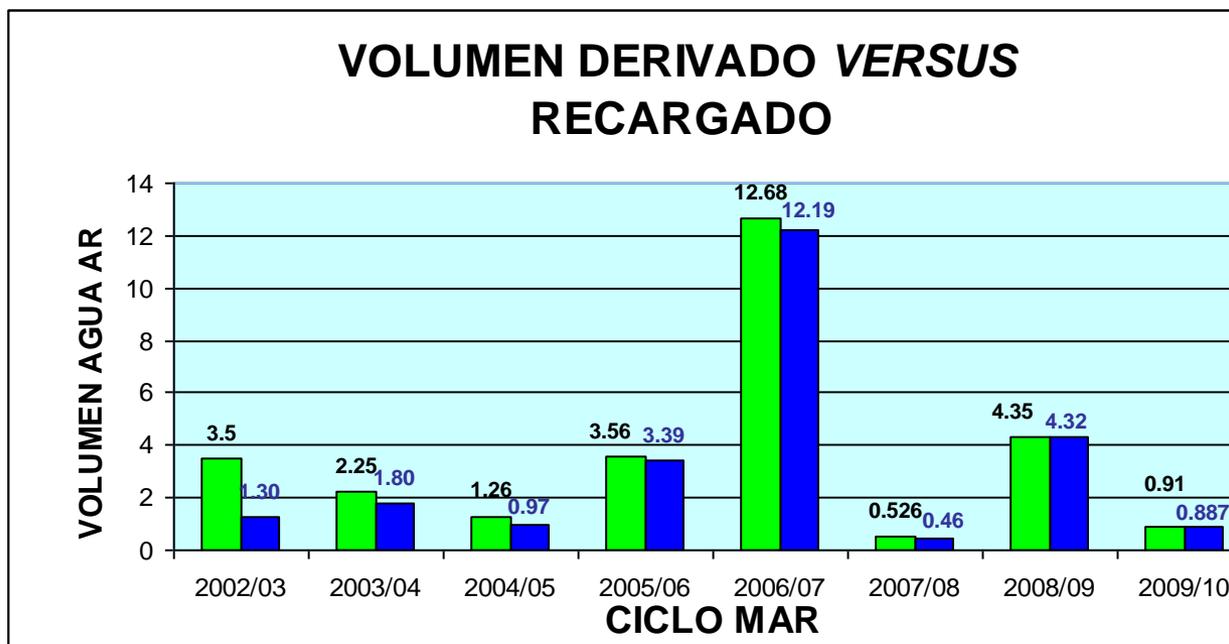
Mayor impacto AR: La colmatación (*clogging*)



**PERFILES DE COLMATACIÓN CON TRES HORIZONTES BIEN DIFERENCIADOS
>> REDUCCIÓN TASA DE INFILTRACIÓN**

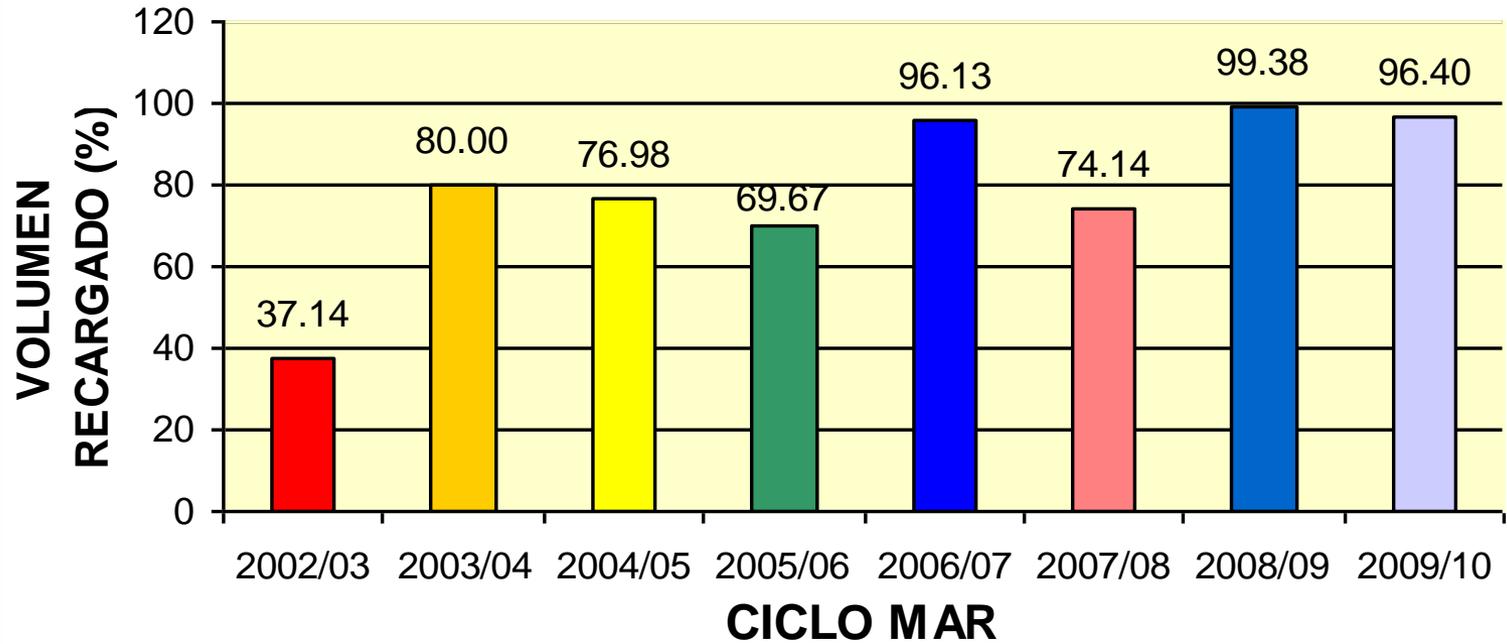
ZONAS PILOTO. LA AR EN LA CUBETA DE SANTIUSTE (SEGOVIA), OCHO AÑOS DE ACTIVIDAD

Vol. infiltrado	P total ciclo (mm)	Fecha inicio ciclo	Fecha final ciclo	Días de func.	Q deriv (hm ³)	Qm canal (l/s)	Vol. inf. Tot. (hm ³)	% vol inf/Q derivado	Oscilación media n.f. (m)
2002/03	291.4	05/12/2002	01/05/2003	148	3.5	278	1.30	37.14	2.3
2003/04	n/a	10/10/2003	01/04/2004	175	2.25	149	1.80	80.00	2.1
2004/05	n/a	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*
2008/09	85	01/11/2008	30/04/2009	181	4.35	278.5	0.89	99.38	3.11
2009/10	89,2	17/02/2010	31/03/2010	43	0.91	249.0	0.224	96.40	0.4**

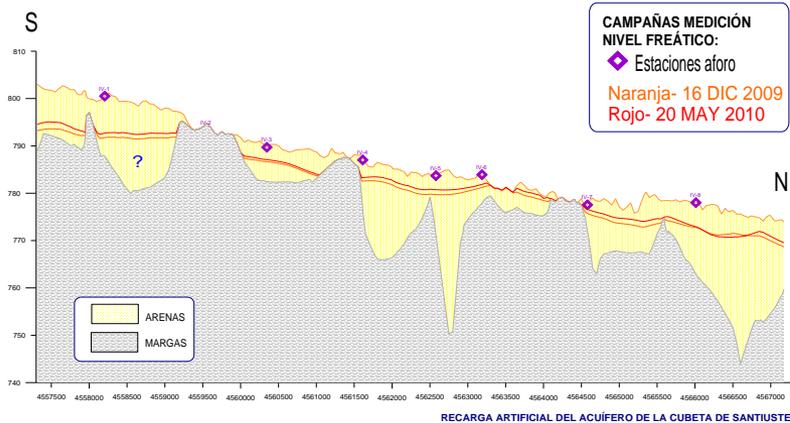


POSIBILIDADES DE MEJORA BASADAS EN TÉCNICAS SAT

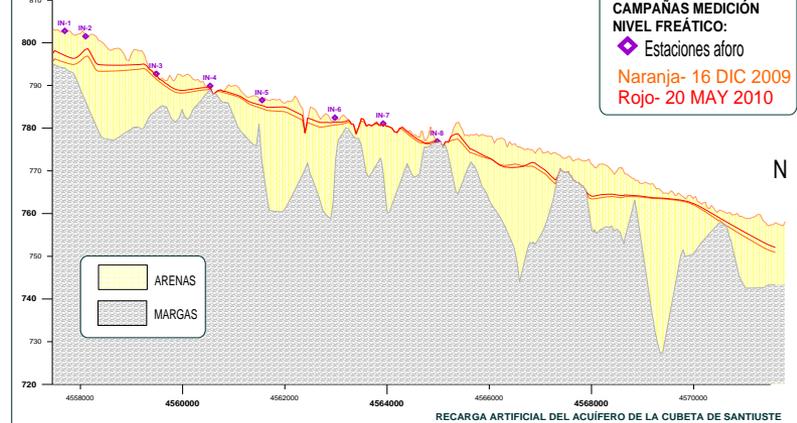
VOLUMEN DERIVADO VERSUS RECARGADO



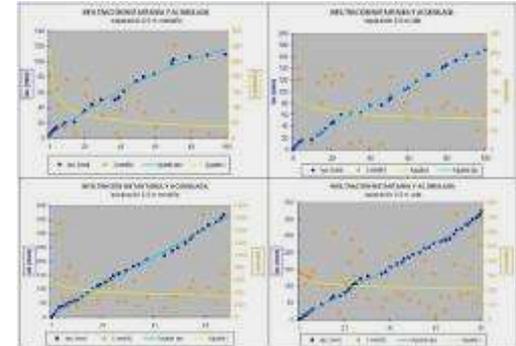
PERFIL EVOLUTIVO DEL NIVEL FREÁTICO Y BULBO DE HUMIDIFICACIÓN
AÑO HIDROLÓGICO 2009/10
TRAZADO DEL CANAL ESTE (VIEJO)



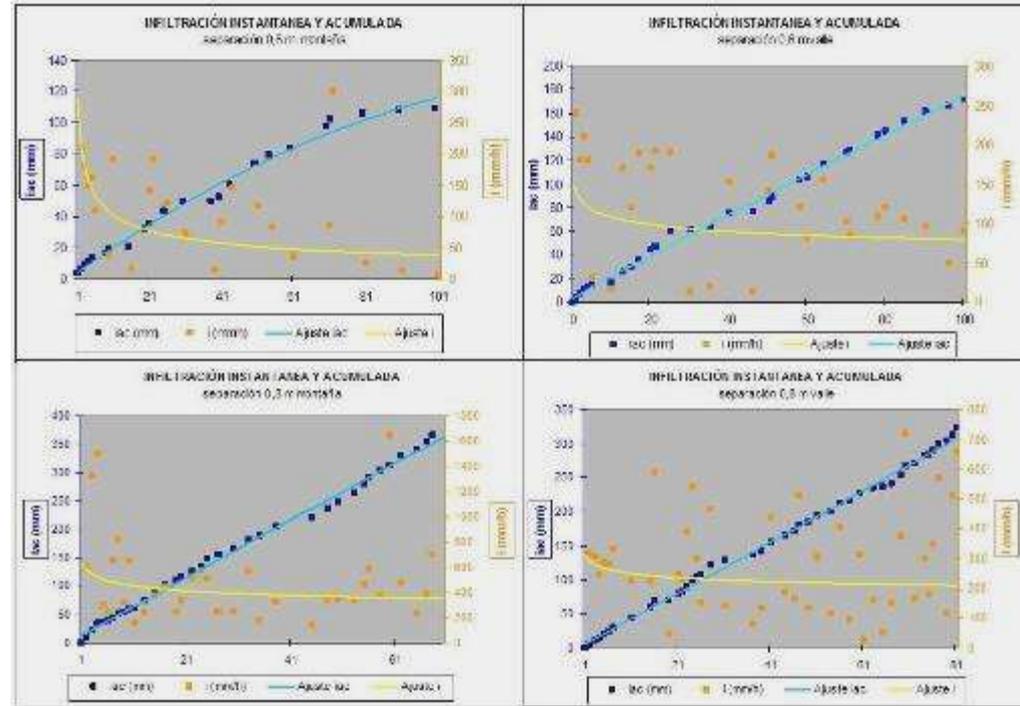
PERFIL EVOLUTIVO DEL BULBO DE HUMIDIFICACIÓN
AÑO HIDROLÓGICO 2009/10
TRAZADO DEL CANAL OESTE (NUEVO)



SATs en las balsas de recarga artificial (AR)



- **Caballones** arados con diferente anchura en el fondo de la balsa de decantación e infiltración + ensayos de permeabilidad en la zona CX y CV de los caballones y en perfiles de colmatación.
- Para la distancia entre crestas de **60 cm**: los descensos en la tasa de infiltración sobrepasan la mitad en crestas y menos en los surcos (datos de 2008 y 2009).
- Con **80 cm**, las tasas aumentaron más de cuatro veces en la cresta y ligeramente por encima en el valle, **con descensos mayores en crestas que en surcos**. Un año después van de 90 y 220 mm/h (cresta/surco, respectivamente) a valores del orden de 420/232 mm/h.
- Con **1,0 m** de separación, los resultados son **parecidos** a los registrados en 2007 en las **crestas** y bastante **menores** en los **surcos**.

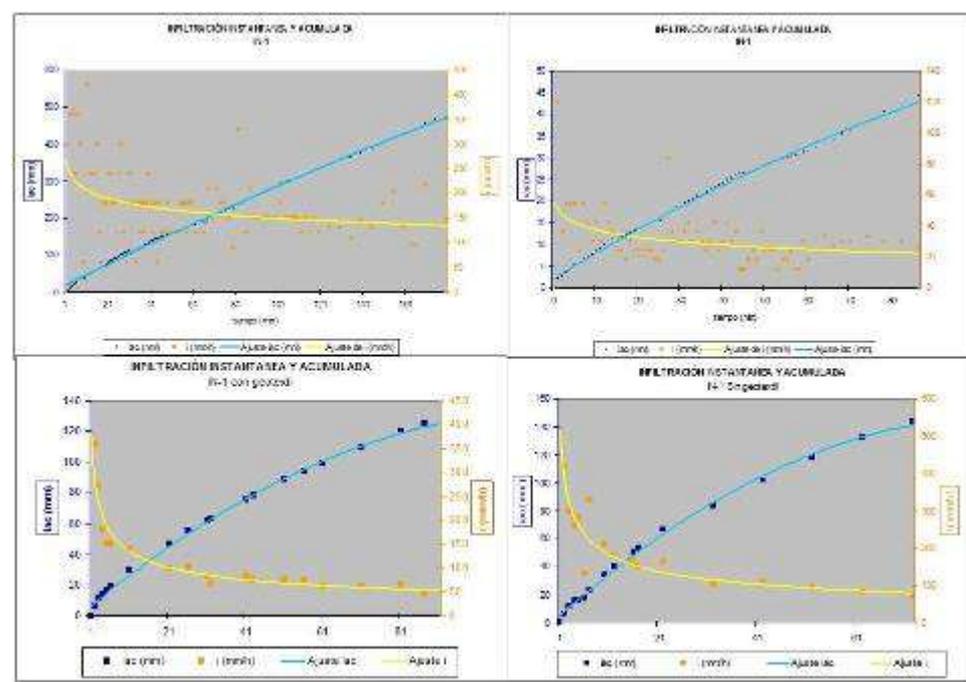


- Conforme a los resultados, para el lugar y circunstancias de las pruebas, los **caballones incrementan la tasa de infiltración** con respecto a las balsas de fondo plano, con valores mayores en la cresta de los montículos que en el fondo de los surcos, excepto para 80 cm de anchura.
- Si bien no se puede establecer una tendencia definida, dado el escaso número de ensayos, se observa que los **surcos espaciados 80 cm se comportan mejor en general**. No obstante estos resultados no son concluyentes.
- Como buena práctica, resulta recomendable la apertura de **surcos mediante arado de discos**, más respetuoso con el medio que el arado de vertedera.

SATs en canales de recarga artificial (AR)



- Líneas de acción: la propia morfología del canal, la regulación del caudal y en el filtraje de finos en el agua de AR.
- Desde 2008 se están ensayando dos tramos de canal con un caballón longitudinal equipados con un geotextil en cinco metros de longitud para la retención efectiva de finos.
- Entre las campañas de **2007 y 2008 se observó una drástica caída de la tasa de infiltración**, que pudo ser debida a múltiples factores, como el exceso de sedimentos en el agua de recarga.
- En 2009 las tasas fueron de nuevo ascendentes, con valores similares a los obtenidos en 2007.



Análisis de resultados:

- La tasa de infiltración suele ser más alta en ensayos de corta duración, si bien esta distancia se reduce en ensayos más largos, hecho que induce a pensar en la **concentración de finos a cierta profundidad por debajo del canal.**
- Además y aunque es conveniente incrementar el número de pruebas para obtener conclusiones fiables, **la tendencia de la infiltración presenta una pendiente más alta en las últimas pruebas**, donde la curva de infiltración (en tono claro) permite deducir que los **sedimentos han avanzado en el perfil del suelo, acumulándose** en horizontes de menor conductividad hidráulica, **primero en las inmediaciones de la superficie y luego en la franja de 40 a 60 cm**, resultados a tener en cuenta al planificar el mantenimiento.

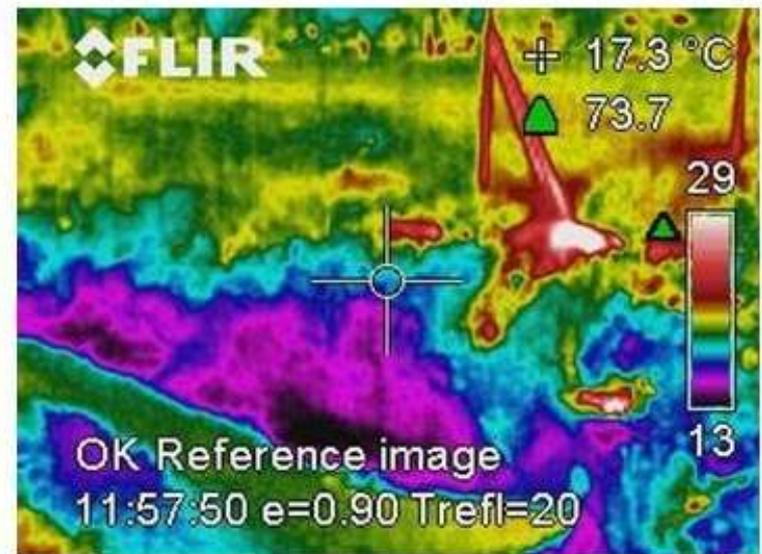
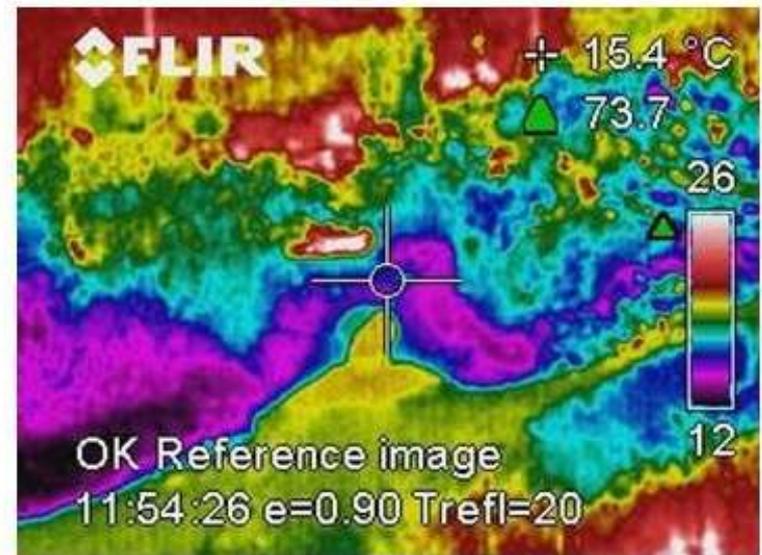
Termografías aplicadas a las técnicas SAT

- Línea de acción iniciada en **mayo de 2010**.
- Permite detectar, mediante la **distribución de la temperatura en las balsas, canales y perfiles** realizados en su fondo, zonas preferenciales de generación de **colmatación**, especialmente en caballones y fondo de los canales.





- Las **variaciones térmicas** en los surcos se deben, bien a diferencias de altura, de vegetación, o a la aparición en superficie de **procesos orgánicos y físicos**, con tonalidad más oscura en general y mayor absorción de calor.
- En las **paredes** de los canales se detectan tonalidades diferente. En el fondo se puede diferenciar, además, los tramos donde hay **geotextiles** enterrados (tonos más fríos) y **aquellos sin equipar**, (concentran procesos colmatantes alrededor).



- Las aguas de depuradora que pasan al canal de AR tienen una composición diferente y una temperatura. La termografía ayuda a estudiar los procesos de miscibilidad, islas de frío...

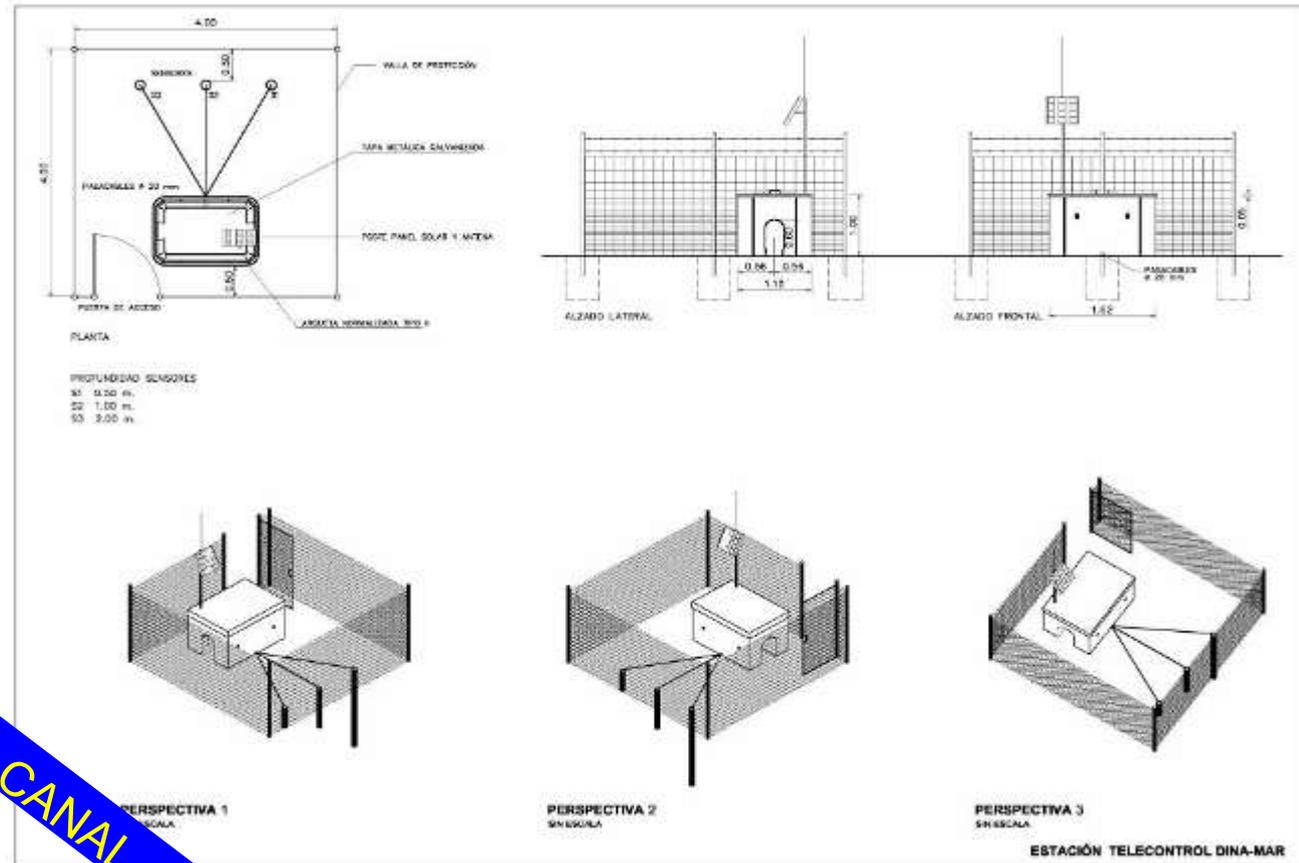
ESTUDIO ZNS. ESTACIONES *DINA-MAR ZNS*



- **Morfología** del **bulbo** de humidificación
- **Disociación** recarga natural y artificial (**balance**)
- Influencia del **bulbo** en las **variaciones** de la **ZNS**: tensión capilar, succión y humedad (**SATs**).
- Cuantificación **tasa de avance (H y V)**
- **Influencia de la capilaridad en el flujo darciniano** (*tensión superficial, densidad del agua, viscosidad del fluido, gravedad, humedad, estructura del suelo, prof. n.f., T^a del suelo, cultivo, pendiente, etc.*)
- **Estimación** aire atrapado en el acuífero y del **efecto Lisse**

Cada estación consta de tres sensores:

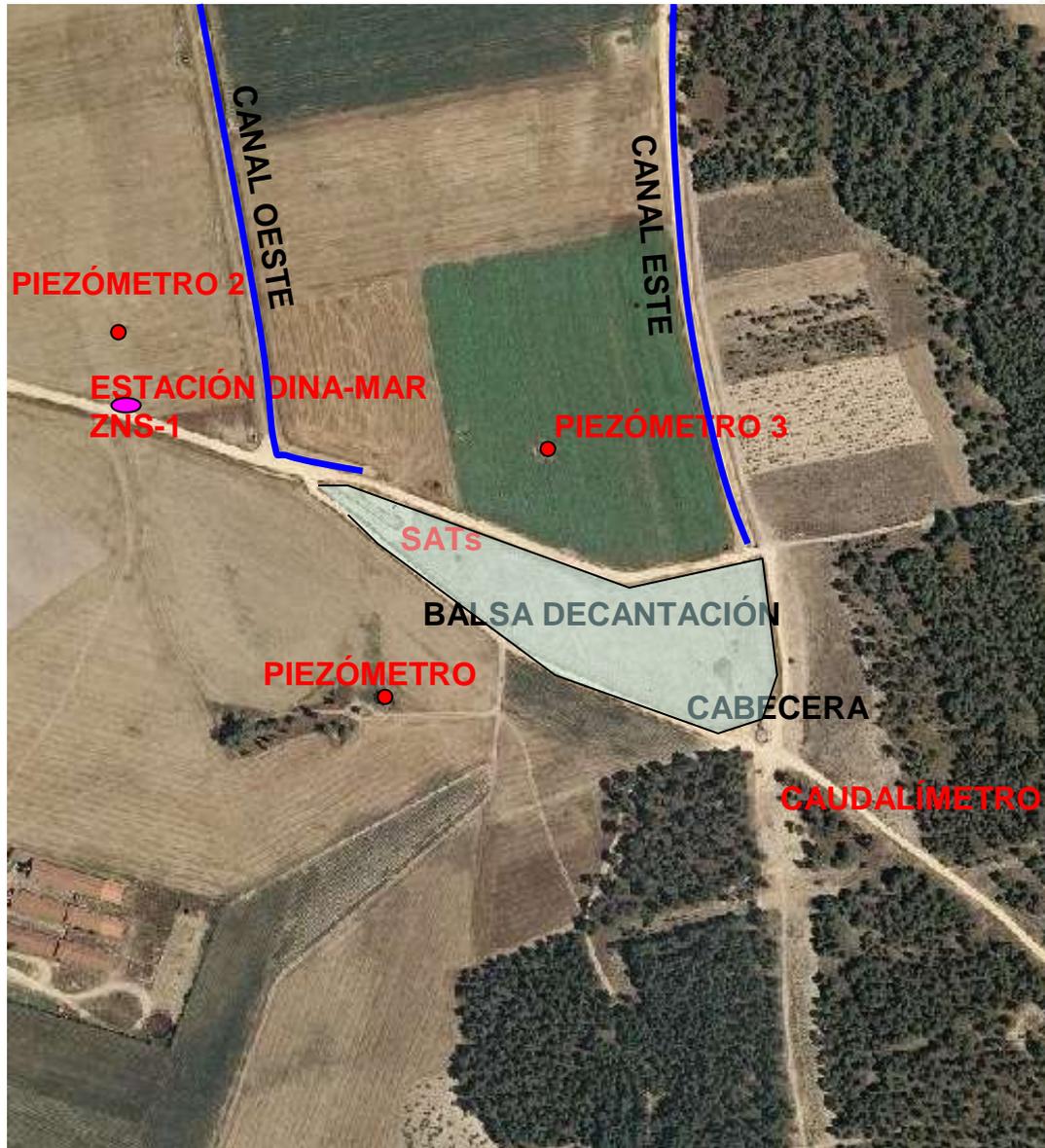
- Dos **humidímetros-termómetros SDEC**, que además del porcentaje de humedad miden la temperatura, ubicados a 0,5 y 2 m de profundidad.
- Un **tensiómetro Bourdon** entre los dos humidímetros, a 1,05 m.

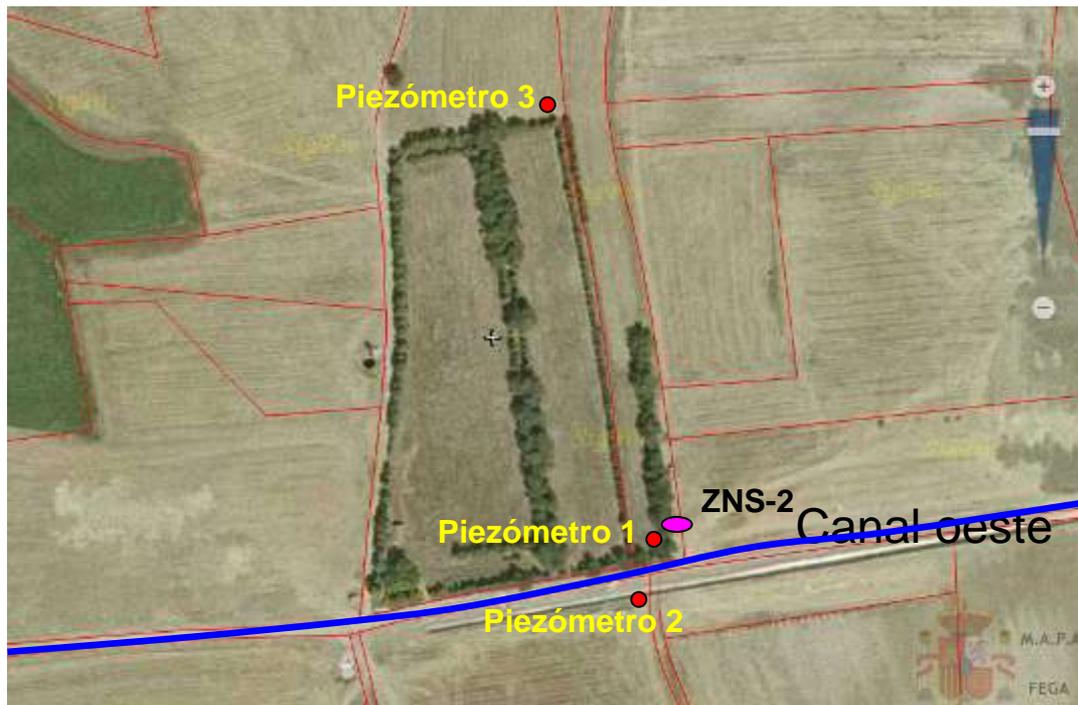


CANAL

Sensores dispuestos de modo **transversal al canal**, con objeto de **conocer mejor la morfología del bulbo de humidificación**

Contexto D-M ZNS-1

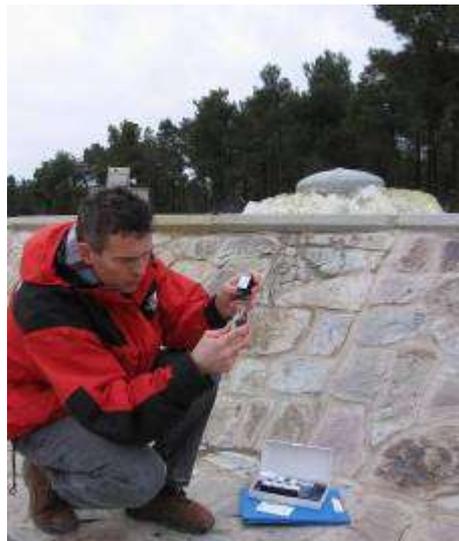
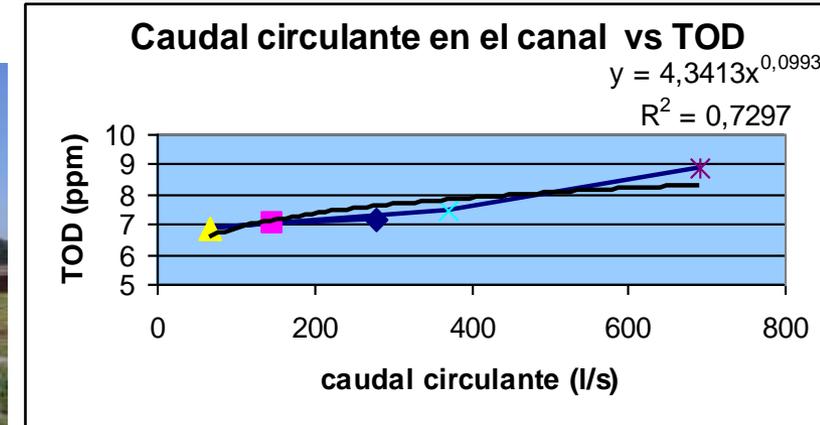
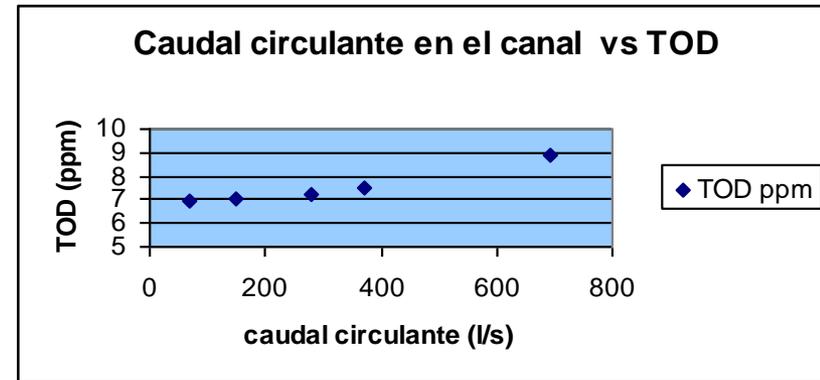




Reducción entrada de aire en dispositivos de AR

Caudal circulante Vs TOD

Q deriv (hm ³)	Qm caz (l/s)	Vol. inf. Tot.	TOD ppm
3,5	278	1,30	7,2
2,25	149	1,80	7,0
1,26	68	0,97	6,9
5,11	372	3,56	7,5
12,68	692	12,19	8,9



Recarga más efectiva (TOD) a pequeños caudales

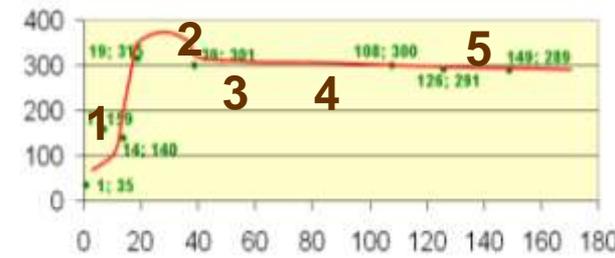
Estudios de la influencia del periodo y caudal de recarga artificial en la tasa de infiltración y de su manejo para aumentar la efectividad de los canales y balsas

Periodo

La evolución de la tasa de infiltración en un punto del canal Este de Santiuste a lo largo del ciclo de gestión de la recarga (2004-05) fue controlada mediante la ejecución de ocho ensayos de infiltración en un tramo del canal especialmente confinado y acondicionado.

Esta gráfica presenta una morfología acorde con la *curva “tipo” de Blaxejewski, 1979.*

Interpretación



- 1- Tendencia creciente y constante de la tasa de infiltración, hasta alcanzar un máximo en torno al mes.
- 2- Con la caída térmica de diciembre, la saturación, el aire entrampado en los poros del acuífero y las bajas temperaturas motivan el descenso durante, aproximadamente, una quincena.
- 3- El resto del ciclo de recarga artificial presenta una tendencia ligeramente descendente durante el resto del invierno (los ciclos de helada parecen provocar un retardo en el ascenso en la tasa de infiltración).
- 4- Al final de febrero el acuífero ha entrampado importantes volúmenes de aire (hasta un 35% conforme a las referencias bibliográficas, en *Stuyfzand*, 2002), que puede ir acompañado de efecto Lisse (*Krul & Liefrinck*, 1946). Este aire atrapado se está estimando a tenor de las variaciones registradas en los tensiómetros de las estaciones DINA-MAR ZNS (el aire llega al 25 % al final del tercer mes de AR).
- 5- Con la primavera aumenta la desaireación y la tasa de infiltración apenas disminuye.

Los aspectos operativos derivados de este estudio van encaminados al control manual de la válvula de entrada (en función del caudal circulante y durante los ciclos de helada), control que llevan a cabo las comunidades de regantes con asesoramiento de DINA-MAR.

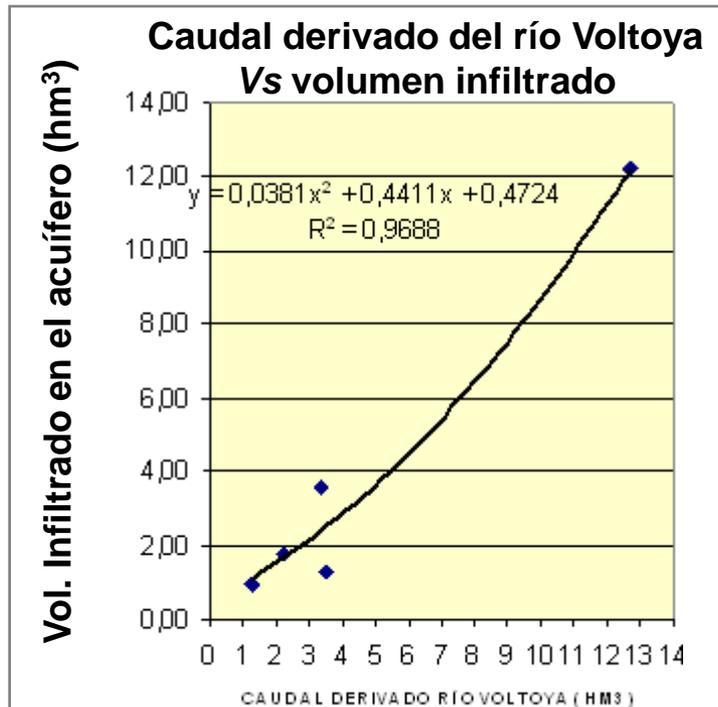
**NECESIDAD MINIMIZAR TENDENCIA DESCENDENTE (SATS) >>
Regulación caudal e incidencia en los finos y aire del agua de AR.**

Influencia del **caudal** de “recarga artificial”

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**



A mayor caudal circulante, mayor volumen infiltrado;
pero a caudales “bajos” existe un **máximo en torno a 177 l/s.**

AR MÁS EFECTIVA A CAUDALES REDUCIDOS (150-200 l/s)

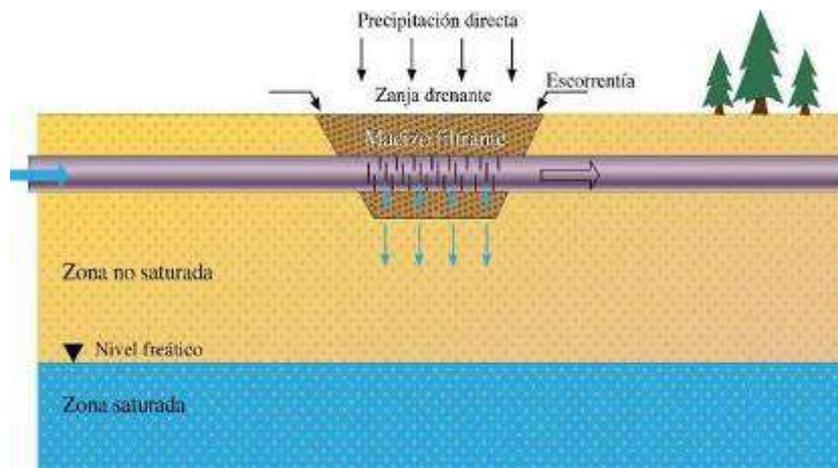
SATs en Carracillo

- 40,7 km de canal
- 3 balsas de infiltración
- 1 RBF
- 1 humedal artificial





Corrección de la acidez del agua



Buena eficiencia de los tramos de canal "enterrados"

SATs en Ciudad Real



ALTA OXIGENACIÓN: COLMATACIÓN BIOLÓGICA



DIMENSIONAMIENTO DE LOS CANALES DE RECARGA ARTIFICIAL:

- Morfología trapezoidal de **1,00 m. de base, 1,50 m de altura, 4,0 m de anchura en coronación y taludes 1/1.**
- A lo largo del mismo se construyeron las **obras de parada** en hormigón armado, y provistas de tajadera de 1 m de altura para **calado máximo de 1 m y mínimo en cola de tramo de 0,50 m** en situación estática.
- Tomando como valor de cálculo un **calado medio de 0,75 m**, se obtiene un valor del **perímetro mojado de 3,12 m.**



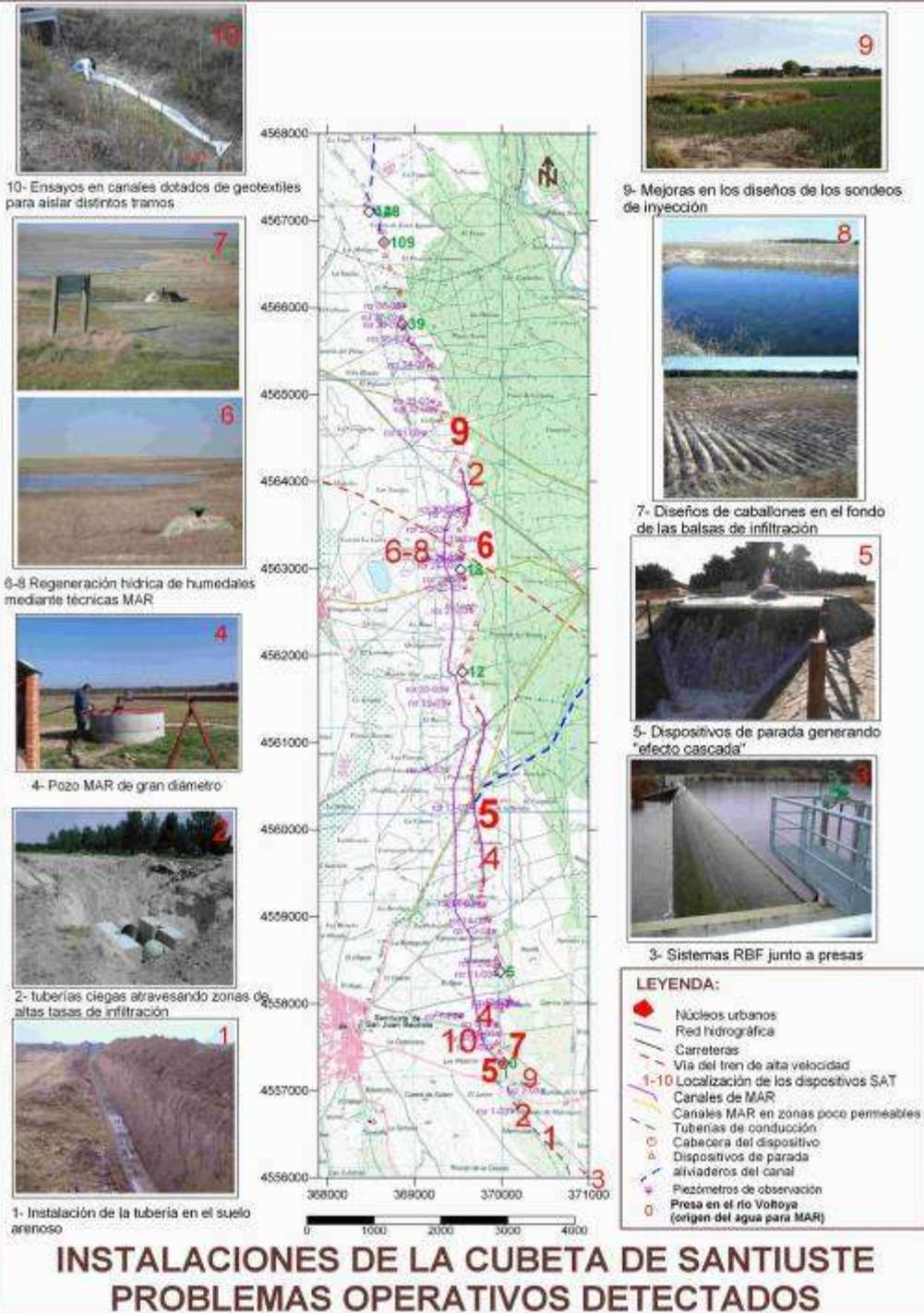
CRITERIOS DE DISEÑO DE LAS BALSAS:

- La balsa debe localizarse en **materiales apropiados** para favorecer la infiltración.
- Conveniencia de **divisorias hidrogeológicas**??.
- La altura que alcanza el **domo de agua por debajo** depende, en gran medida, de la geometría de la balsa, y puede **maximizarse** empleando **formas cuadradas o circulares** en lugar de balsas estrechas y alargadas.
- Hay que tener en cuenta la situación del **nivel freático** y su **variación** anual en el diseño.
- Importante evitar actuaciones que reduzcan la conductividad hidráulica: **compactación de tierras, creación de canales preferentes**, etc.
- Obra de entrada con **disipador de energía del flujo**. Ejemplo: surtidor situado en la parte inferior de la balsa con una tubería de entrada de polietileno PN 6 de **400 mm** para un caudal de **160 l/s**.
- Sistema de **desagüe**, para situaciones eventuales de avenida.
- **Taludes 2H/1V**. Talud interior de la balsa cubierto con **escollera entre 30 y 60 cm**.
- Altura máxima del **terraplén respecto al fondo de la balsa de 2,00 m**, con una altura de lámina de agua máxima de 1,50 m, resguardo de 0,50 m bajo la coronación.
- **Rampa** con una pendiente de **0,10 m/m** como **acceso** al fondo para **mantenimiento**.

BINOMIOS: IMPACTO-SOLUCIÓN

Estudio de los **impactos** de mayor magnitud e intensidad y **diseños inadecuados** que afectan a los dispositivos de gestión de la recarga (mar)

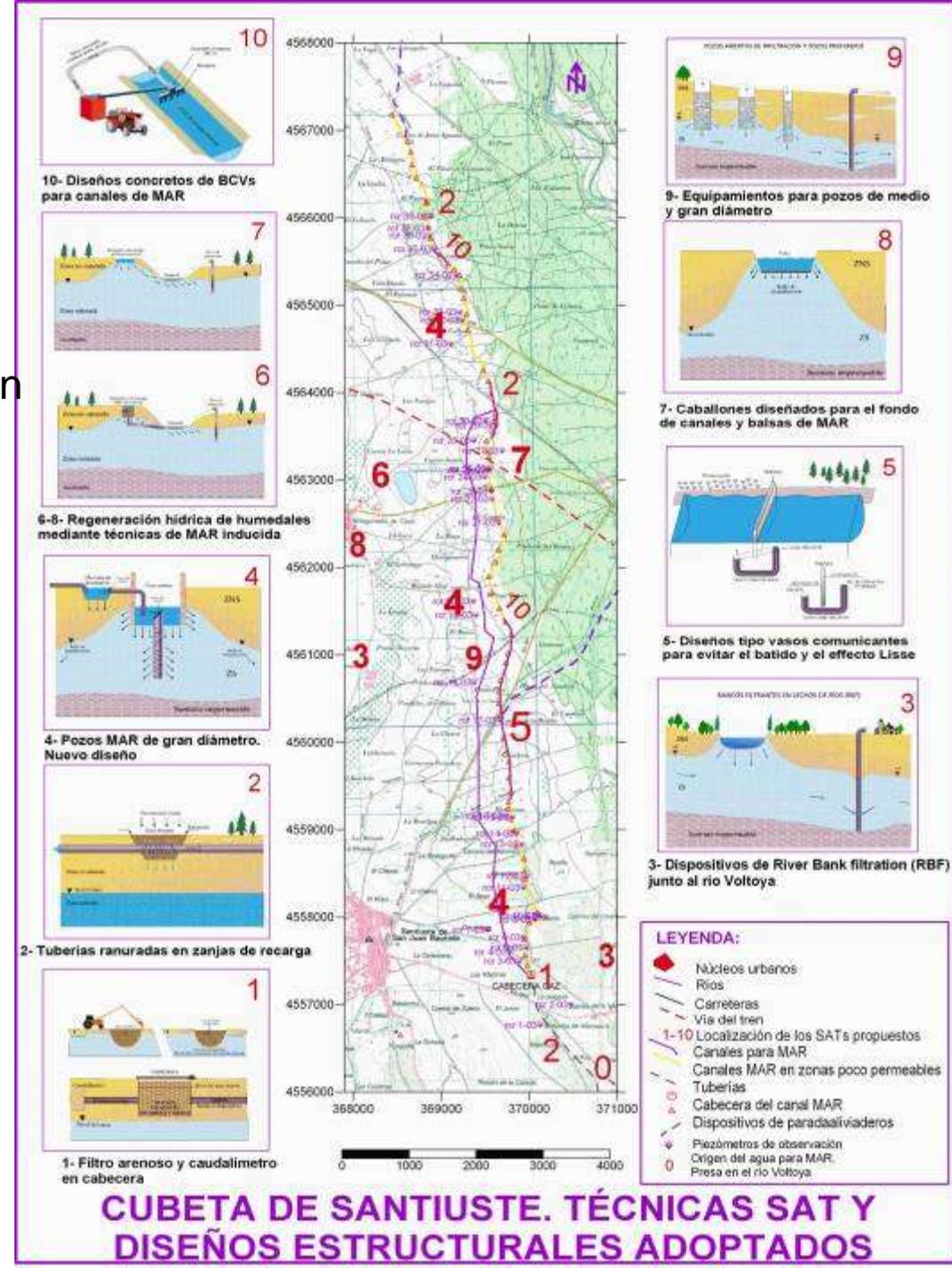
Ejemplos y posición en la Cubeta de Santiuste



PROPUESTAS DE DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE TRATAMIENTO DE SUELO Y ACUÍFERO (SATS) Y DISEÑOS ESTRUCTURALES

Propuestas:

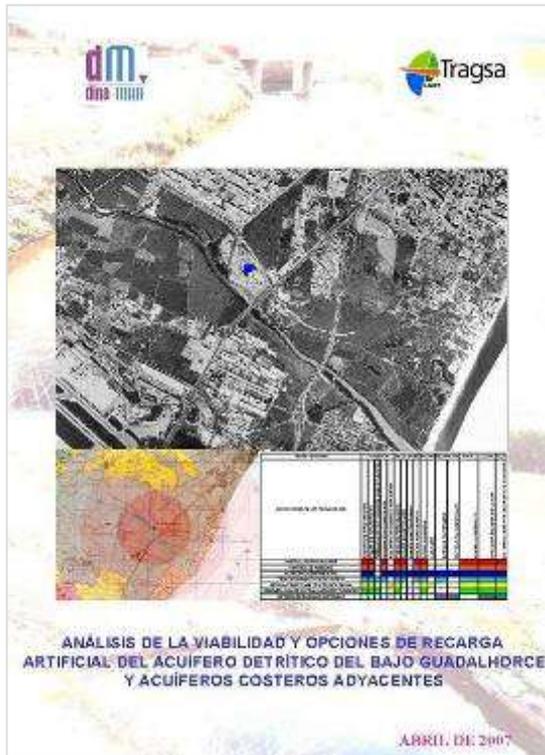
- 1-2. **Tramos filtrantes intercalados** en tuberías en zonas con escasa disponibilidad de terreno superficial.
- 3- **Nuevos sistemas RBF** cercanos a los embalses de toma.
- 4- **Diseños mejorados para pozos MAR** de gran diámetro.
- 5- Dispositivos para **reducir la concentración de aire disuelto** en el agua de recarga.
- 6-7- Regeneración hídrica de **humedales** por **dispositivos de MAR inducida**.
- 8-9. **Diseños para reducir la colmatación y el efecto Lisse** en los pozos, canales y balsas de infiltración + BCV específicos para estas zonas piloto.



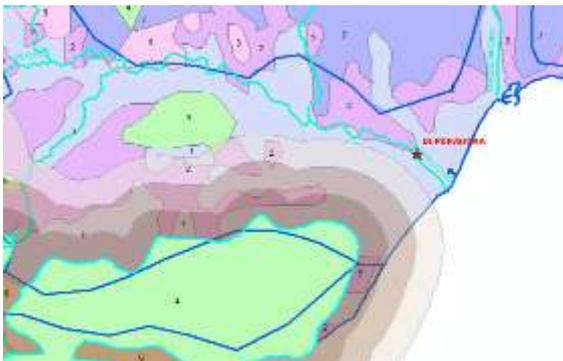
Ensayo metodológico en un caso real:

Depuradora del Bajo Guadalhorce

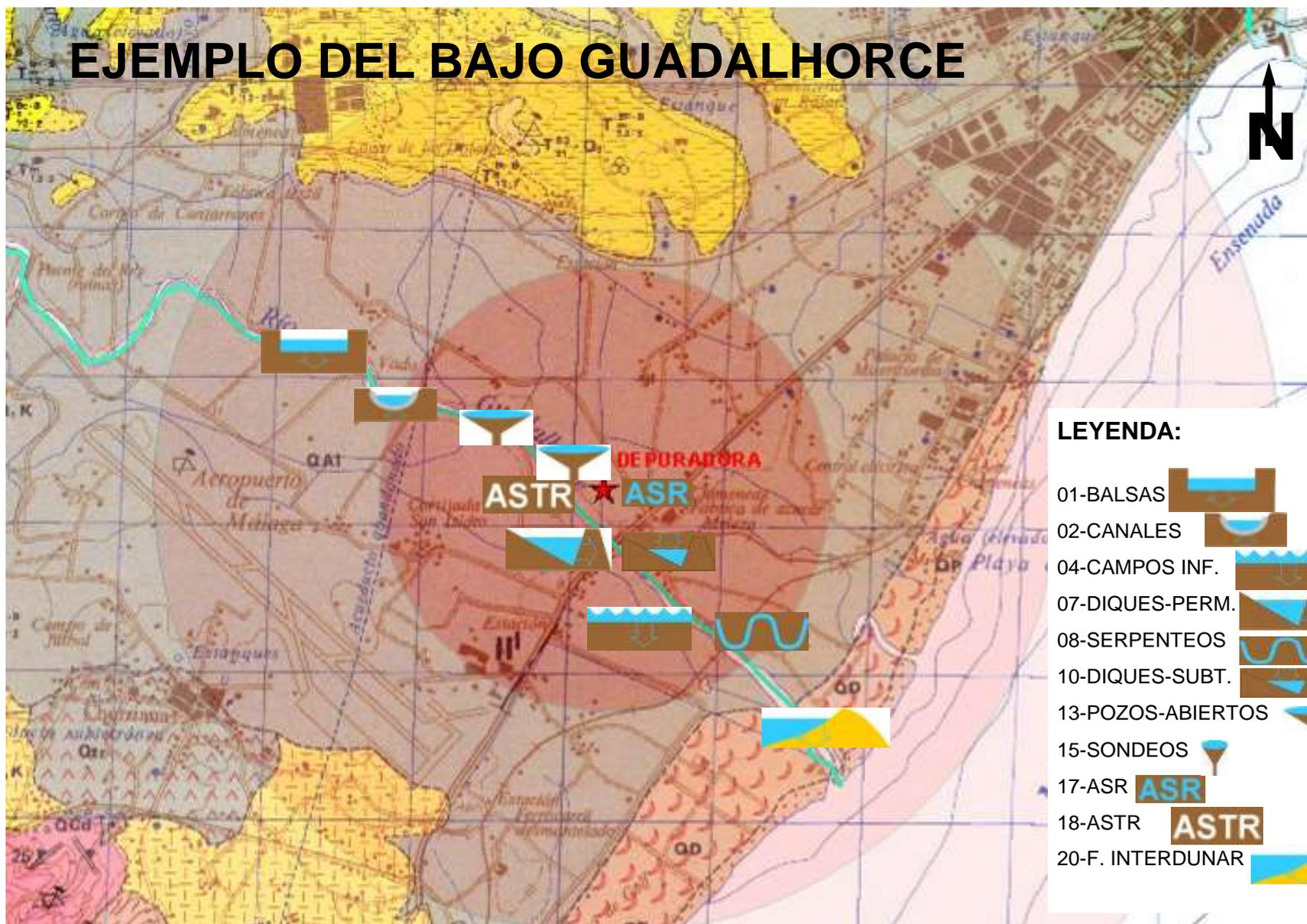
ÍNDICE DEL PRIMER ESTUDIO TIPIFICADO



1.	INTRODUCCION.....	2
2.	CARACTERIZACIÓN DE LA MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA DEL BAJO GUADALHORCE	4
3.	ANÁLISIS DE LAS POSIBILIDADES DE RECARGA ARTIFICIAL DE LOS ACUÍFEROS DEL BAJO GUADALHORCE	7
3.1.	Recarga artificial del acuífero superficial Cuaternario	7
3.2.	Recarga artificial del acuífero superficial Plioceno	7
3.3.	Recarga artificial del acuífero profundo Plioceno	8
4.	POSIBILIDADES DE RECARGA ARTIFICIAL DESDE OTROS PUNTOS DE TOMA	8
4.1.	Posibilidades de recarga artificial utilizando como área de toma los acuíferos de la Sierra de los Espartaes	8
4.2.	Posibilidades de recarga artificial utilizando como área de toma los acuíferos de la Sierra de Mijas y Sierra Blanca	9
4.3.	Posibilidades de recarga artificial utilizando como área de toma el propio cauce del río Guadalhorce.....	10
4.4.	Posibilidades de recarga artificial utilizando como área de toma los efluentes de la EDAR 10	10
5.	DESCRIPCIÓN DE LOS MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL APLICABLES EN EL ENTORNO DEL BAJO GUADALHORCE	12
5.1.	Canales	12
5.2.	Serpenteos.....	12
5.3.	Balsas filtrantes.....	13
5.4.	Inundación controlada.....	13
5.5.	Diques subterráneos o barreras semipermeables	13
5.6.	Acaballonamiento	14
5.7.	Pozos de infiltración.....	14
5.8.	ASR y ASTR	14
6.	CONCLUSIONES	15



EJEMPLO DEL BAJO GUADALHORCE



LEYENDA:

01-BALSAS



02-CANALES



04-CAMPOS INF.



07-DIQUES-PERM.



08-SERPENTEOS



10-DIQUES-SUBT.



13-POZOS-ABIERTOS



15-SONDEOS



17-ASR



18-ASTR



20-F. INTERDUNAR



Localización de la depuradora y principales dispositivos más idóneos conforme a los acuíferos existentes en esta masa de agua.

Escala aproximada: 1:50.000.

Agua de recarga (cantidad)

- Almacenamiento temporal en reservorios superficiales.
- Control velocidad circulación aguas recarga.
- Evitar operaciones durante ciclos de helada.
- Empleo de cámaras termostáticas.
- Criterios selectivos origen.
- Limpieza y mantenimiento.
- Empleo BCVs.



Agua de recarga (calidad)

- Preselección: Criterios selectivos origen aguas de recarga. Filtración y decantación aguas AR, etc. (membranas, líneas de fangos, filtros, empaques, etc.).
- Trampas de escorrentía y estructuras de decantación y remanso.
- Dispositivos anticorrosión.
- Diseño y preservación taludes (mampostería, gaviones, etc.).
- Diseño fondo en acanaladuras o furrows, empleo geotextiles.
- Limitación altura lámina de agua. Pretratamiento tipo DBPs (Disinfection by Products): Cl₂, I₂, O₃, H₂O₂, rayos UV, etc.
- Limpieza vegetación durante AR/ plantación específica en periodo estival.
- BCVs.
- Evitar aireación aguas AR: vasos comunicantes, estructuras exentas, velocidad aguas, Desaireación por piezómetros, aumento distancia puntos inyección-extracción, etc.
- Sistemas duales: Secado de algas, secado natural del lecho, criotratamiento, agrietamiento cake, escarificación de la parte colmatada y limpieza/reemplazamiento.
- Aislamiento con la atmósfera/luz solar.
- Medaka.
- Lechos filtrantes y aditivos químicos para la eliminación de costras calcáreas (ácidos, hidróxido sódico, quelantes, polifosfatos, defloculantes, etc).
- Evitar efecto reciclaje.
- Desnitrificación, "anammox", riego seleccionando profundidad emplazamiento bomba.
- Evitar la salinización natural: recarga puntual y barreras en zonas salinas.

Medio receptor (suelo y acuífero)

Pretratamiento del agua de recarga.

Secado natural del lecho y agrietamiento.

Criotratamiento.

Empleo de sistemas duales que permitan la limpieza de un sistema mientras el otro está operativo.

Bombeo inverso en pozos cercanos al cauce.

Alternancia de bombeo normal e inverso (Wash in- Wash out).

Lavado inverso (backwashing) en geotextiles, membranas y filtros.

Empleo de técnicas de limpieza tipo jet.

Técnicas de regeneración en pozos de recarga mecánicas

(cepillado y arañado de paredes

y fondo) y químicas (empleo de aditivos químicos).

Técnicas de limpieza con la mayor cadencia posible.

Bombeo diario del pozo de inyección.



Criterios / códigos de gestión / buenas prácticas

Parámetros de gestión y técnicas ex situ

- Elección del periodo y lugar más idóneos
- Inicio ciclos AR "suaves".
- Control caudal de entrada y su velocidad.
- Seguimiento del quimismo de las aguas durante el ciclo de recarga.
- Empleo de dispositivos de no afección a fauna y personas.
- Adoptar con prontitud las MTD
- Programa de Vigilancia y Control
- Protocolo específico de control de la colmatación.
- Protocolos de los aspectos hidromecánicos correctos en el espacio y tiempo.
- Sistema integral- todos los elementos están interrelacionados.
- Código de Buenas Prácticas SAT
- Limitación en el abonado.
- Intervención agricultores en gestión.
- Instalación depuradoras y minimizar vertido efluentes.
- Perímetro de protección.
- Regulación del uso público.

Conclusiones

- La tendencia descendente de la tasa de infiltración en los canales y balsas del Los Arenales se está reduciendo mediante la aplicación de **técnicas de regulación del caudal y el pretratamiento del agua de AR** (filtrado de finos y reducción del aire).
- En cuanto a las actuaciones en la morfología de las balsas y canales, los **caballones** en el fondo han incrementado la tasa de infiltración en todos los ensayos con respecto a los realizados en balsas de “fondo plano”. La distancia entre las crestas de valores más altos ha sido en torno a **80 cm**.
- En las operaciones de mantenimiento hay que incidir especialmente en la **limpieza de los furrows**.
- Todos estos aspectos operativos, con ciertas limitaciones, podrían resultar **extrapolables a escenarios análogos**.



Coordenadas y agradecimientos

aefernan@geo.ucm.es

efernan6@tragsa.es

www.dina-mar.es

