

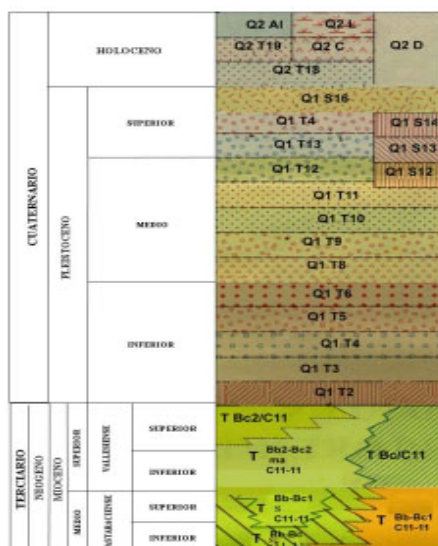
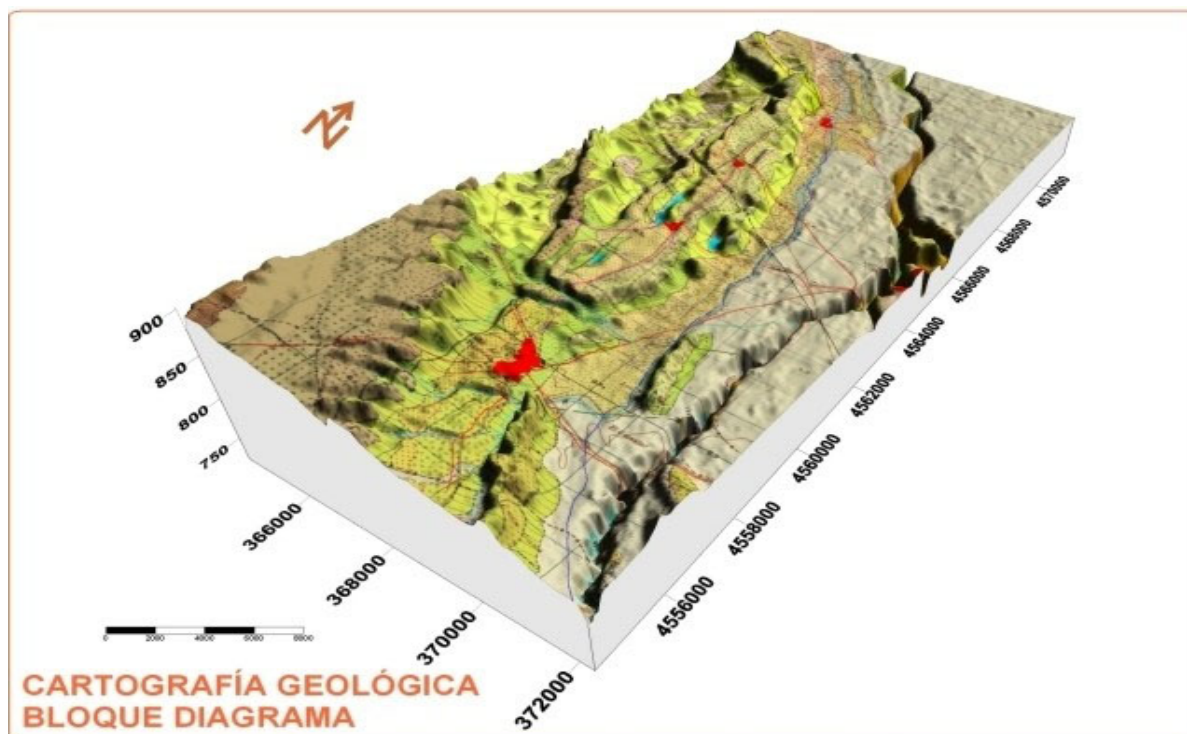
Recarga artificial de acuíferos en cuencas fluviales. Aspectos cualitativos y medioambientales. Criterios técnicos derivados de la experiencia en la Cubeta de Santiuste (Segovia)

E. Fernández Escalante

Tragsatec. C/ Julián Camarillo 6B, 4ª. 28037 Madrid.

La recarga artificial de acuíferos se ha configurado en los últimos años como una herramienta de gestión hídrica económica y de gran efectividad con respecto a las grandes obras hidráulicas, resultando una actividad de primer orden en varios países del mundo, como pueden ser Holanda, USA, Australia, etc. En el ámbito español está infrutilizada, en un estadio incipiente o experimental, y, hasta la fecha, apenas ha recibido consideración por parte de la administración hidráulica del país. En este contexto se apoya la filosofía de la tesis doctoral, cuyo principal objetivo ha sido comprobar la efectividad de la técnica y estudiar sus ventajas e inconvenientes en un laboratorio experimental natural, empleando para ello todos los recursos disponibles, especialmente las instalaciones y laboratorios de la UCM, la experiencia del autor desarrollando esta actividad para el MAPA y la adquirida en congresos específicos internacionales. Tras un profundo estudio del estado de la cuestión de la recarga artificial de acuíferos (AR), antecedentes y marco legal, se ha concluido en que esta técnica es desaprovechada en España, si bien la plataforma legal para su aplicación es idónea.

En esta tesis se ha procedido a la caracterización hidrogeológica detallada y actualizada de la Cubeta de Santiuste, laboratorio experimental donde se han obtenido gran parte de las conclusiones, con aportaciones a su conocimiento de índole geológico, hidrogeológico, climático, hidrológico, etc. Cabe destacar que el acuífero, de origen eólico, se ha formado por colmatación de antiguas cubetas de la era terciaria que están orientadas según una directriz tectónica N120. Entre ellas se transfiere el agua en la actualidad, por relleno y rebosamiento, constituyendo un sistema de '*cubetas en cascada o en relevo*'. Especial importancia tienen la ubicación de los depósitos fluviales y salinos, que han quedado debidamente georreferenciados (**Fig. 1**).



- Q₂A1 Aluviones de arenas y limos.
- Q₂L Fondos de arenas semiconsolidadas y charcos. Arenas, limos y arcillas con sales.
- Q₂T₁₈ Terrazas del Sistema Eresma - Adaja. Arenas blanquecinas y gravillas de cuarzo.
- Q₂T₉
- Q₂D Manto eólico. Arenas de cuarzo redondeado bien seleccionadas. Superficie de Coca-Arivala. Arcosas blanquecinas fluviales. Q₂S₁₁
- Q₂S₁₁ Superficies con depósito de arcosas blanquecinas y acres con gravas de cuarzo.
- Q₁T₁₃ Terrazas del sistema Eresma - Adaja - Volteya. Arcosas ocre y pardo-rojizas con gravas de cuarzo y cuarza.
- Q₁T₁₄
- Q₁S₁₂
- Q₁T₄
- Q₁T₉
- Q₁T₁₀ Terrazas del sistema Eresma - Adaja - Volteya. Arcosas rojizas con gravas de cuarza.
- Q₁T₁₁
- Q₁T₁₂
- Q₁T₅
- Q₁T₆
- Q₁T₈
- Q₁T₄
- Q₁T₁₁
- Q₁T₁₂
- Q₁T₂
- Q₁T₃
- Q₁T₄
- Q₁T₅
- Q₁T₆
- Q₁T₇
- Q₁T₈
- Q₁T₉
- Q₁T₁₀
- Q₁T₁₁
- Q₁T₁₂
- Q₁T₁₃
- Q₁T₁₄
- Q₁T₁₅
- Q₁T₁₆
- Q₁T₁₇
- Q₁T₁₈
- Q₁T₁₉
- Q₁T₂₀
- Q₁T₂₁
- Q₁T₂₂
- Q₁T₂₃
- Q₁T₂₄
- Q₁T₂₅
- Q₁T₂₆
- Q₁T₂₇
- Q₁T₂₈
- Q₁T₂₉
- Q₁T₃₀
- Q₁T₃₁
- Q₁T₃₂
- Q₁T₃₃
- Q₁T₃₄
- Q₁T₃₅
- Q₁T₃₆
- Q₁T₃₇
- Q₁T₃₈
- Q₁T₃₉
- Q₁T₄₀
- Q₁T₄₁
- Q₁T₄₂
- Q₁T₄₃
- Q₁T₄₄
- Q₁T₄₅
- Q₁T₄₆
- Q₁T₄₇
- Q₁T₄₈
- Q₁T₄₉
- Q₁T₅₀
- Q₁T₅₁
- Q₁T₅₂
- Q₁T₅₃
- Q₁T₅₄
- Q₁T₅₅
- Q₁T₅₆
- Q₁T₅₇
- Q₁T₅₈
- Q₁T₅₉
- Q₁T₆₀
- Q₁T₆₁
- Q₁T₆₂
- Q₁T₆₃
- Q₁T₆₄
- Q₁T₆₅
- Q₁T₆₆
- Q₁T₆₇
- Q₁T₆₈
- Q₁T₆₉
- Q₁T₇₀
- Q₁T₇₁
- Q₁T₇₂
- Q₁T₇₃
- Q₁T₇₄
- Q₁T₇₅
- Q₁T₇₆
- Q₁T₇₇
- Q₁T₇₈
- Q₁T₇₉
- Q₁T₈₀
- Q₁T₈₁
- Q₁T₈₂
- Q₁T₈₃
- Q₁T₈₄
- Q₁T₈₅
- Q₁T₈₆
- Q₁T₈₇
- Q₁T₈₈
- Q₁T₈₉
- Q₁T₉₀
- Q₁T₉₁
- Q₁T₉₂
- Q₁T₉₃
- Q₁T₉₄
- Q₁T₉₅
- Q₁T₉₆
- Q₁T₉₇
- Q₁T₉₈
- Q₁T₉₉
- Q₁T₁₀₀

Figura 1. Bloque diagrama de la zona de estudio elaborado a partir del modelo digital del terreno (MDT) al que se ha incorporado una imagen ráster con la cartografía geológica revisada y actualizada

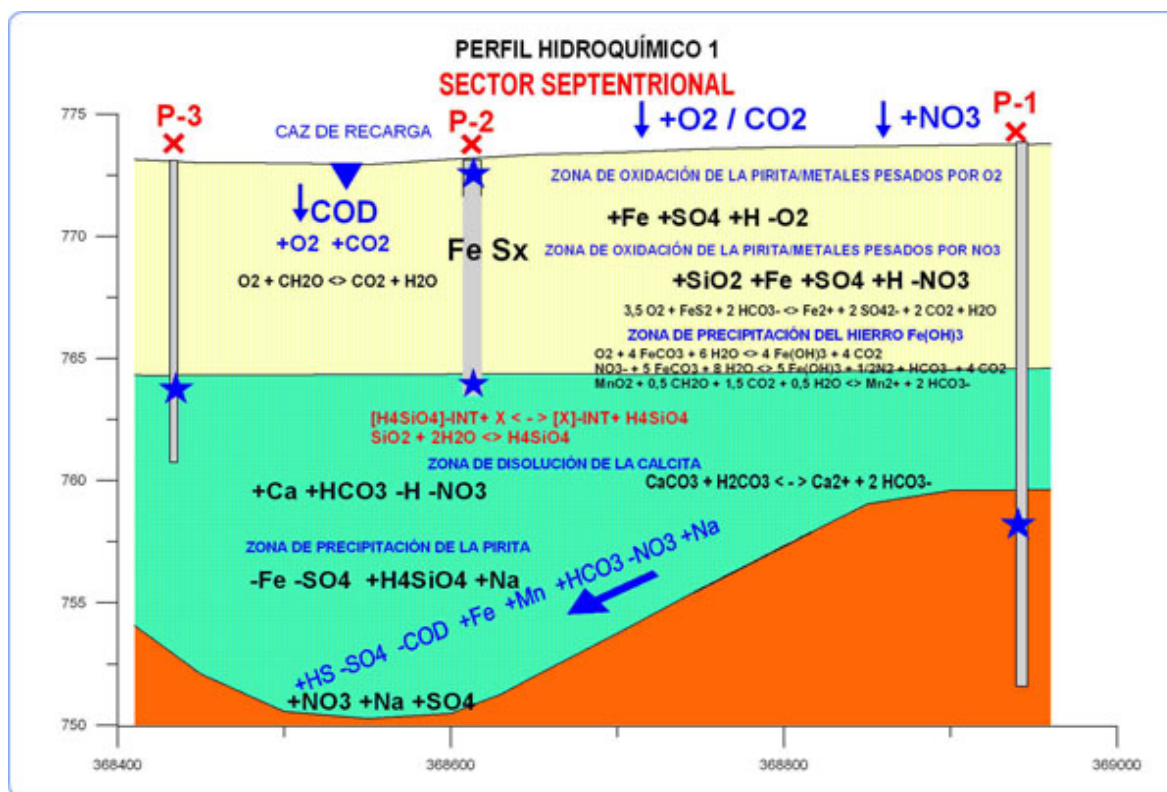
Se han detectado anomalías en las cartografías hidrogeológicas, atribuibles al descuelgue hacia niveles inferiores del agua del acuífero superficial a través de perforaciones profundas que intercomunican distintos niveles, y/o a la explotación de sondeos profundos bien ubicados. Con las operaciones de AR estas cubetas registran las mayores oscilaciones. Se ha fijado y justificado una profundidad de alerta de 1,5 m para evitar el riesgo de inundación.

Los sistemas de información geográfica y el álgebra de mapas se consolidan como herramientas apropiadas para el estudio de operaciones de AR. En este caso se han diferenciado 4 unidades homogéneas de gestión basadas en el espesor del acuífero, la salinidad y alcalinidad de las aguas subterráneas, las divisorias hidrogeológicas, las condiciones ecológicas y la respuesta diferencial ante las operaciones de AR, definiendo el concepto de *Unidad Hidroambiental* (UHA) que queda correctamente definida cuando tiene un respaldo digital.

Evolución cualitativa de las aguas

Se ha llevado a cabo una caracterización de la calidad de las aguas antes, durante y después de las operaciones de AR, trazado perfiles hidroquímicos entre parámetros medidos en las aguas nativas (pozos) y en el dispositivo de recarga artificial, que introduce en el acuífero aguas procedentes del río Voltoya, cualitativamente muy diferentes. Estudiando la interacción entre los distintos tipos de aguas, se han determinado ambientes hidroquímicos (**Fig. 2**), concluyendo en que el diseño y seguimiento de las redes de control resulta necesario para cualquier modelación cuantitativa y/o cualitativa, con un registro histórico de, al menos, cinco años de duración.

Las caracterizaciones hidroquímicas han permitido apreciar la presencia de condiciones reductoras en el sector central del acuífero, con propensión a generar incrustaciones que impermeabilizan al acuífero, lo que resulta un impedimento para la efectividad de la AR; la dilución de nitratos (que presentan mayor concentración en la franja comprendida entre 8 y 12 m de profundidad), la generación de sulfatos tras la oxidación de la pirita, etc. Finalmente se han calculado por modelación previsiones evolutivas (mediante los códigos PHREEQC y Netpath) de las aguas de AR tras interactuar con el acuífero.



X Sondeos
REACCIONES CONSTATADAS
REACCIONES SUPUESTAS
 CaCO₃ = calcita
 CH₂O = material orgánica
 INT = reacción de intercambio [Fe, NH₄, Mn, K, Mg, Ca²⁺ + Na⁺]
 Fe(OH)₃ = hidróxido férrico

FeCO₃ = siderita
 FeS₂ = pirita
 H₄SiO₄ = silicatos disueltos
 Facies Arévalo ZNS
 Facies Arévalo ZS
 Facies Cuestas (acuitardo)

Figura 2. Caracterización de ambientes hidroquímicos. Principales procesos y reacciones constatados y supuestos que afectan a la hidroquímica de las aguas en el sector septentrional de la Cubeta de Santiuste (se ha elegido como ejemplo el perfil hidroquímico 1).

Las pautas previstas sintéticamente son, a medida que se infiltran las aguas de recarga artificial en el acuífero e interactúan con las nativas, las siguientes:

- Infiltración de agua >> condiciones anóxicas >> ligera acidificación >> nueva incorporación de bicarbonato > oxidación de la materia orgánica y de la pirita > reducción de nitratos >> aumento de sulfatos y silicatos...(> tiempo de residencia) >> hidróxidos de hierro >> incrementos en Fe, Mn, NH₄⁺ y COD.

Se concluye en que la oxidación de la pirita y de la materia orgánica natural (MON) controlan las reacciones de interacción en el sistema tras la AR con mayor influencia que las restantes. Se ha apreciado además que la salinización medida es mayor que la calculada, por lo que hay un factor salinizante adicional atribuible a flujos ascendentes profundos de aguas subterráneas. También se han probado dos nuevas isorrelaciones iónicas indicativas de la evolución de las aguas del acuífero con la operaciones de AR: nitratos/oxígeno y hierro total/oxígeno, con buenos resultados.

Aspectos medioambientales

Se ha actualizado y caracterizado el inventario de humedales de la zona de estudio mediante un sistema propio, con hasta 85 humedales actuales o indiciales. En general, la mayoría de éstos se encuentran en un grado de conservación muy deficiente y su valor ecosistémico está muy dañado, resultando viable la regeneración de algunos mediante operaciones de AR de tipo inducida.

Se ha planteado una lista de control de impactos ambientales y se ha diseñado un sistema de 20 indicadores medioambientales para definir y controlar la evolución del sistema a lo largo del tiempo. Se han prediseñado además 15 indicadores de respuesta. Este sistema, que es complementado con el diseño y aplicación de un polígono de evaluación multicriterio propio, permite llevar a cabo una evaluación medioambiental bastante exhaustiva. Se basa en listas de control a las que se ha dado un carácter matricial (relacionando factores y procesos) en un histograma de barras horizontales que aplica un sistema de rangos-pesos según la intensidad y magnitud de los impactos y un factor corrector para impactos acumulativos y sinergismos (**Fig. 3**).

| EJEMPLO DE APLICACIÓN. LAGUNA DE LA IGLESIA. FEBRERO DE 2004. | | NIVEL DE PONDERACIÓN | |
|---|------|----------------------|--------------|
| INDICADORES DE ESTADO/PRESIÓN | | | |
| 1). Ríos y humedales con buena calidad según los índices bióticos (índice BMVP). | | | 100 |
| 2). Índice de calidad general (índice ICG). | | | 100 |
| 3). Acuíferos contaminados por nitratos. | 112 | | |
| 4). Caracterización de la vulnerabilidad ante la contaminación difusa (CRIPTAS). | | 151 | |
| 5). Acuíferos salinizados por intrusión salina continental. | | 458 | |
| 6). Salinización de las aguas subterráneas. | | 458 | |
| 7). Evaluación del valor de la turbidez y Total de Sólidos Disueltos (TSD) en el agua de | < 25 | | |
| 8). Nivel del agua en los piezómetros de observación. | 3,2 | | |
| 9). Diferencia de cota media entre el nivel freático y el nivel del agua de recarga en cada | | 2,8 | |
| 10). Porcentaje de finos en el suelo. indicador inicial de la colmatación. | 14% | | |
| 1). Sobreexplotación de acuíferos por el riego. | | 50**** | |
| 2). Balance de nutrientes en las aguas de recarga. | | 50**** | |
| 3). Modernización y mejora de los dispositivos. | | 50**** | |
| 4). Eficacia del uso del agua. | | 50**** | |
| 5). Evaluación socioeconómica. | | 50**** | |
| 6). Procedencia política de la actividad. | | 50**** | |
| 7). Cercanía al dispositivo de recarga. | | 50**** | |
| 8). Radio de influencia. | | 50**** | |
| 9). Presencia de ecosistemas hidrodépendientes y termodependientes. | | | 100 |
| 10). Relación de los humedales con otros acuíferos, manantiales, humedales, lagunas. | | | 100 |
| | | | TOTAL |
| | | | 2035 |



Figura 3. Aspecto del variograma o polígono multicriterial para el seguimiento de la evolución de los impactos basado en 10 indicadores de presión y 10 de estado. Se han propuesto además 15 indicadores de respuesta. El nivel de ponderación resulta de aplicar un sistema de rangos-pesos y un factor corrector. Cada indicador debe ser rodeado con una poligonal envolvente en su nivel de ponderación correspondiente. Ejemplo de aplicación para la caracterización inicial y seguimiento en la laguna de las Eras (Coca) para la situación de febrero de 2004. La evaluación global recibe un valor numérico (2.035) para el control de su evolución. El variograma debe ser accesible por internet.

Tecnologías aplicadas

Algunos de los objetivos considerados han sido el diseño de dispositivos y estructuras así como la aplicación de técnicas de tratamiento de suelo y acuífero (SAT), que permitan mejorar la calidad de las aguas de AR, minimizar las pérdidas por evapotranspiración, prevenir y controlar los procesos colmatantes, funcionar *en óptimo* con una climatología extrema (congelación del suelo o avenidas), controlar la entrada de aire al acuífero (efecto *Lisse* si se generan sobrepresiones), etc., así como facilitar el mantenimiento de las estructuras en aras de que tengan una vida útil suficientemente alta para obtener una gran rentabilidad. Los sistemas SAT se perfilan como uno de los mecanismos más eficientes para la disminución de la concentración de compuestos orgánicos y nitrogenados de los acuíferos.

Se han diseñado esbozos de nuevos prototipos y dispositivos para operaciones de AR que podrían resultar adecuados en las condiciones actuales; y presentado una propuesta de ubicación dentro de la Cubeta de Santiuste. Estos dispositivos podrían ser utilizados en otros escenarios análogos (**Fig. 4**). Se concluye en que la medida más importante para el correcto funcionamiento de los dispositivos de AR es el pretratamiento de las aguas antes de su entrada al sistema, si bien es preciso un *¿sistema integrado?* con esquemas de utilización conjunta o coordinada y plantas experimentales donde puedan ser ensayadas nuevas tecnologías, dispositivos, etc. Los ensayos hidráulicos en el medio deben sobrepasar el año de duración, con objeto de determinar un *óptimo* o capacidad de infiltración real.



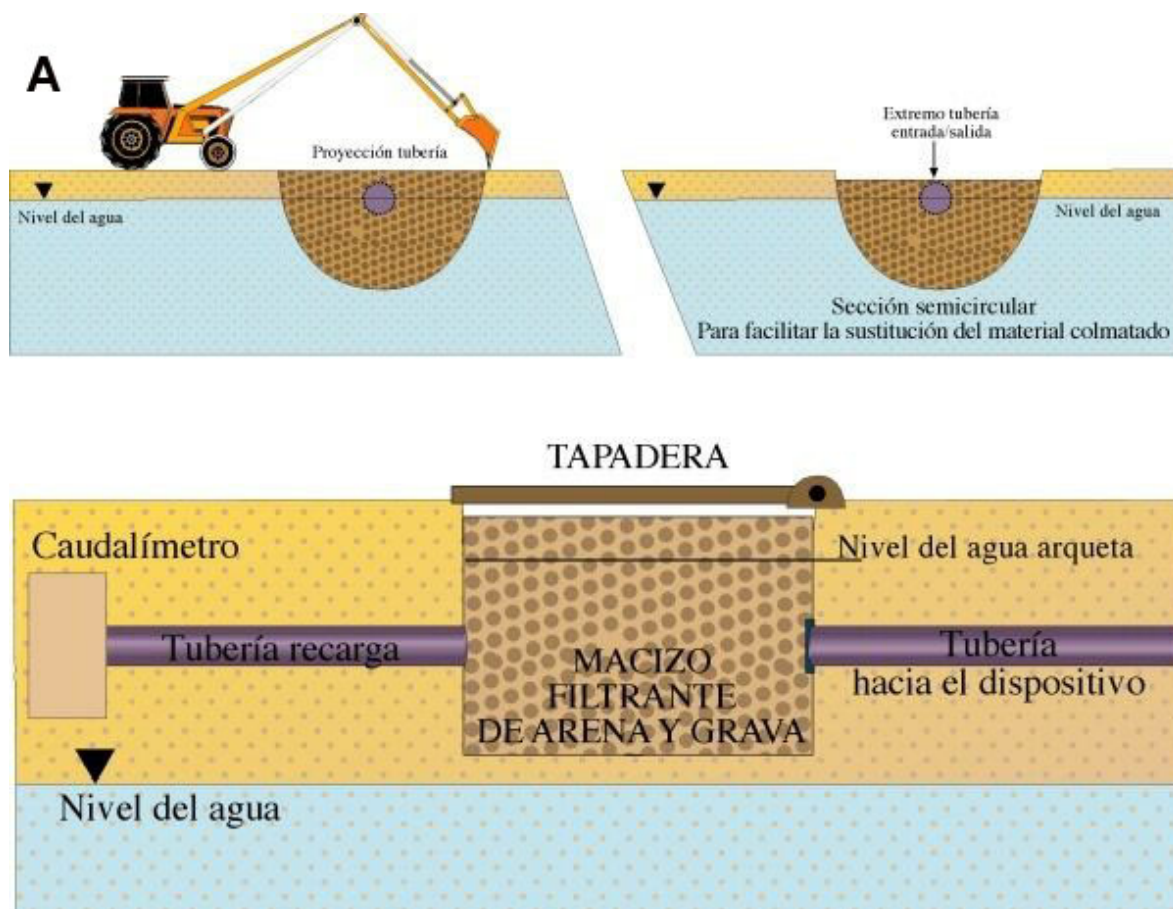
Figura 4. Propuesta de un sistema integrado para la Cubeta de Santiuste que consta de dispositivos para aumentar la efectividad de la recarga artificial, para recuperar humedales degradados mediante AR inducida, un dispositivo de recarga artificial del acuífero profundo y sugerencias para el mantenimiento de las estructuras. A estos hay que añadir la instrumentación para el telecontrol de compuertas y sensores de la calidad de las aguas. En el [Anexo 1](#) se presentan breves esbozos de algunos de los dispositivos.

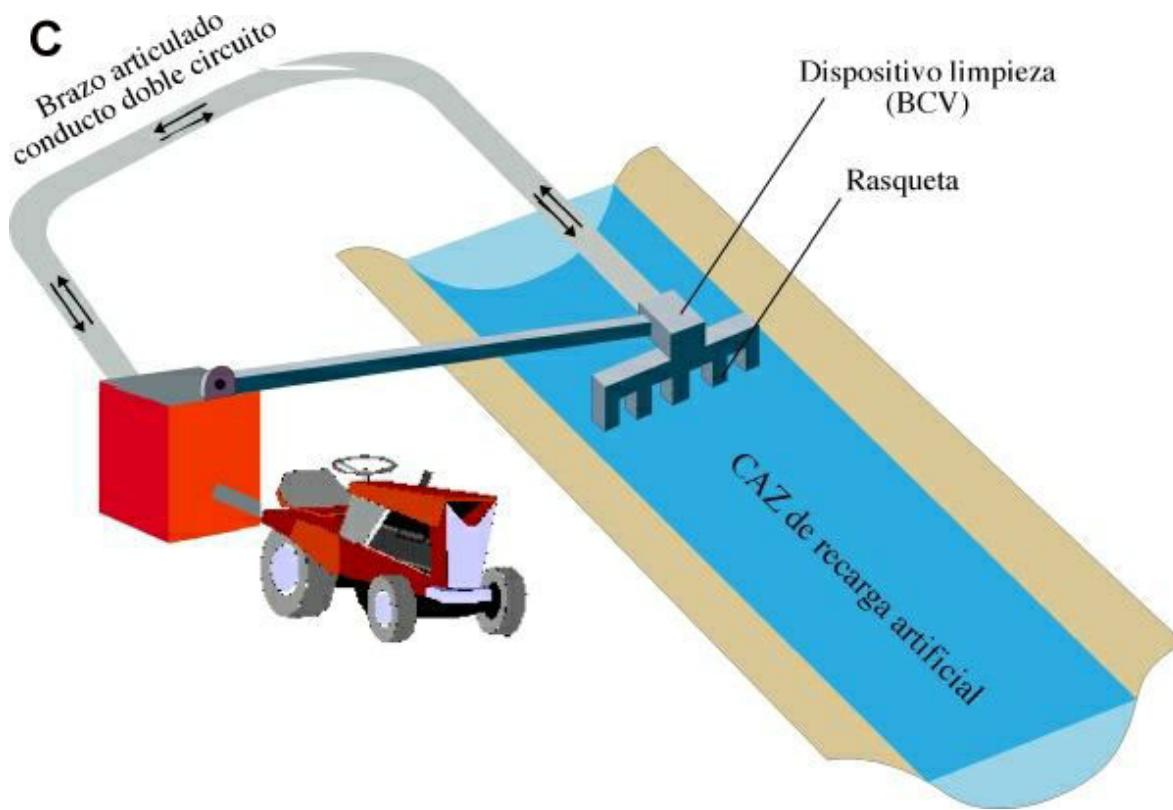
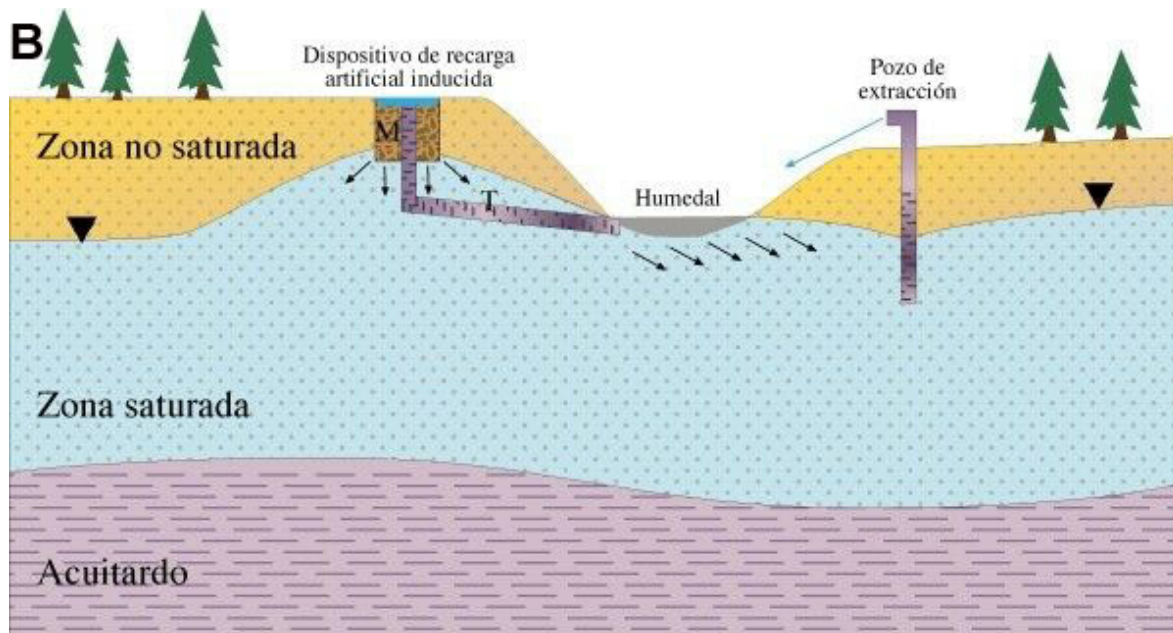
Educación ambiental y divulgación

La divulgación de la recarga de acuíferos puede ayudar a conocer mejor esta técnica, y, por tanto, a que pueda ser aplicada en un mayor número de experiencias. Esta divulgación debe realizarse a nivel de toda la población. La Administración General del Estado es la responsable de facilitar los mecanismos de participación pública, de mejorar el nivel de información y formación y de promover nuevas experiencias e investigaciones en España.

En definitiva, cabe destacar que las experiencias adquiridas hasta la fecha indican que la técnica es robusta y adecuada como alternativa de gestión hídrica, que la Cubeta de Santiuste es propicia para la AR superficial, que el método es perfectamente viable y aplicable a otros acuíferos análogos y que las consecuencias son beneficiosas en calidad de las aguas subterráneas, productividad agrícola, impacto ambiental positivo, mejora de humedales degradados, aceptación social, etc.

Anexo 1





Anexo 1. Ejemplo de esbozos de dispositivos. A) Dispositivo 1, B) Dispositivo 6, C) Dispositivo 10.

Agradecimientos

A los profesores Manuel García Rodríguez y Fermín Villarroya Gil, directores de la tesis doctoral.

ENRIQUE FERNÁNDEZ ESCALANTE

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.
Departamento de Geodinámica de la Facultad de CC Geológicas
Enero 2005
Dirección: M. García Rodríguez y F. Villarroya Gil