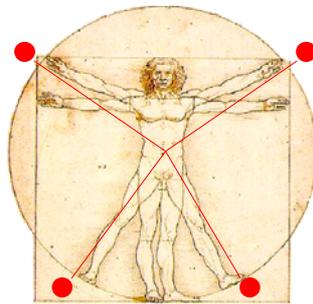


TECNOLOGÍ@ y DESARROLLO

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN III. AÑO 2005
SEPARATA



INVENTARIO DE EXPERIENCIAS DE RECARGA ARTIFICIAL DE
ACUÍFEROS EN EL MUNDO

Álvaro Enrique Fernández Escalante, Manuel García Rodríguez y Fermín
Villarroya Gil.



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: A. Enrique Fernández Escalante, Manuel García Rodríguez y Fermín Villarroya Gil.
Marzo, 2005.

http://www.uax.es/publicaciones/archivos/TECEOC05_001.pdf

© De la edición: *Revista Tecnología@ y desarrollo*

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

Editor: Julio Merino García tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

Tecnología@ y desarrollo. ISSN 1696-8085. Vol.3. 2005.

INVENTARIO DE EXPERIENCIAS DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN EL MUNDO

**A. Enrique Fernández Escalante⁽¹⁾, Manuel García Rodríguez⁽²⁾
y Fermín Villarroya Gil⁽³⁾**

(1) Dr. CC. Geológicas. TRAGSATEC. Julian Camarillo 6ºB. 28037 Madrid. Tf: 91 3226106. Fax: 91 3226005. Email: efe@tragsatec.es

(2) Dr. CC. Geológicas. Departamento de Tecnología Industrial. Escuela Politécnica Superior. Universidad Alfonso X el Sabio. Avenida de la Universidad nº 1. Villanueva de la Cañada C.P. 28691. Madrid. Tlf. 918109118. E-mail: manugaro@uax.es

(3) Dr. CC. Geológicas. Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid CP 28040 ferminv@geo.ucm.es

RESUMEN:

La recarga artificial de acuíferos es una técnica ampliamente utilizada en varios países europeos y en USA y Australia, y que sin embargo está infrutilizada en España. Se estima que el volumen de recarga artificial en España en la actualidad es de sólo 50 hm³/año. Se ha recopilado una extensa bibliografía sobre experiencias en países de todo el mundo que pueden ser útiles para el lector interesado. El objetivo principal de este artículo es alentar el desarrollo de estas actuaciones en España sobre un riguroso control técnico y científico.

PALABRAS CLAVE: Recarga artificial de acuíferos, , hidrogeología, MAR, AR, SAT, ASR.

ABSTRACT:

The artificial recharge of aquifers is a technique broadly used in several european countries and also in other continents, specially in USA and Australia, but it is infrutilized in Spain. Currently the total volume of artificial recharge in Spain is close to 50 Mm³/y. An extensive bibliography has been gathered it has more than enough experiences from all over the world in countries that they can be useful for the interested reader. The main objective of this paper it is to encourage the development of these thecniques in Spain under a rigorous technical and scientific control.

KEY-WORDS: *Artificial recharge aquifers, hydrogeology, MAR, AR, SAT.*

SUMARIO: 1. Introducción, 2. Objetivos, 3. Inventario de instalaciones en el mundo, 4. Conclusiones, 5. Agradecimientos, 6. Bibliografía.

1. Introducción

1.1. Importancia social de la recarga artificial de acuíferos

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, Estados Unidos, Australia, etc.

En foros internacionales la recarga artificial de acuíferos suele denominarse con los acrónimos “AR” (Artificial Recharge) y “MAR” (Management of Aquifer Recharge). Este último término tiene su origen en el grupo de trabajo para estudio de operaciones de gestión de recarga artificial, fundado por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos en 1988. En este artículo se utilizarán las siglas “RA” para hacer referencia tanto a las técnicas de recarga artificial como a las prácticas de gestión.

Se entiende por recarga artificial al “conjunto de técnicas cuyo objetivo principal es permitir una mejor explotación de los acuíferos por aumento de sus recursos y creación de reservas, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo natural del agua” (Freeze and Cherry, 1979). Esta técnica consiste en la introducción de agua en el acuífero de manera no natural, para, entre otras cosas, incrementar la disponibilidad y/o mejorar la calidad de las aguas subterráneas (Custodio y Llamas, 1983).

Más recientemente, Bouwer (2002) se refiere a esta técnica en los siguientes términos: “La recarga artificial de acuíferos consiste en disponer agua superficial en balsas, surcos, zanjas o cualquier otro tipo de dispositivo, desde donde se infiltra y alcanza el acuífero” (Figuras 1 y 2).

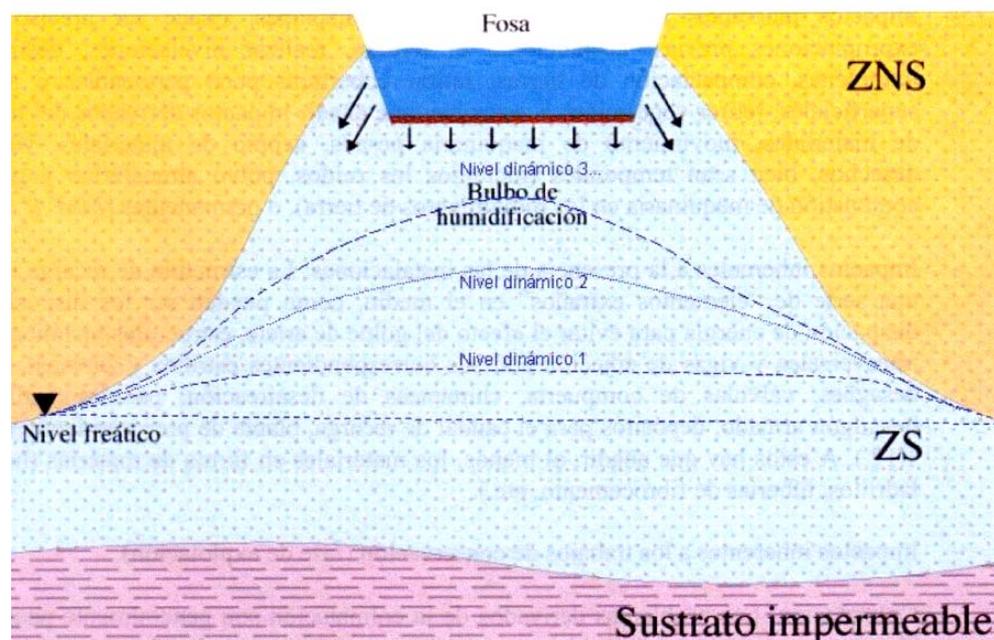


Figura 1. Bulbo de humidificación desde una fosa o zanja de recarga artificial (Fdez. Escalante, 2005)



Figura 2. Caz de recarga artificial en la cubeta de Santiuste (Fdez. Escalante, 2005)

Algunas aplicaciones prácticas o ventajas en la gestión de los recursos hídricos que pueden obtenerse de la aplicación de técnicas de recarga de acuíferos, son las siguientes:

- Frenar la intrusión marina (Martín-Alonso, 2003).
- Evitar procesos de subsidencia en el terreno.
- Mejorar la calidad mediante técnicas de tratamiento de suelo y acuífero.
- Empleo de acuíferos como sistemas de conducción de agua.
- Proporcionar una fuente de abastecimiento subterráneo en aquellas zonas en las que, por tradición, se prefiere este recurso a las aguas superficiales. Otros usos de la recarga artificial en zonas volcánicas es la geotermia (Bouwer, 2002).
- Evitar o reducir el descenso del nivel del agua producido por sobrebombeo.

- Utilización del acuífero como embalse regulador, disminuyendo las pérdidas de agua por evaporación.
- Utilización del acuífero como red de distribución, lo que permite evitar la construcción o instalación de conducciones de agua innecesarias y costosas.
- Evitar que las aguas de inferior calidad existentes en el acuífero se desplacen hacia las captaciones de buena calidad.
- Evacuación y depuración de aguas residuales urbanas, que, tras un tratamiento anterior a su infiltración en el terreno, son tratadas por el terreno de acuerdo con su capacidad de autodepuración.

La extracción de aguas subterráneas en España es del orden de 5.800 hm³/año, lo que representa un 15-20 % del agua utilizada (LBAE, MIMAM, 2000). De ellos, 1.500 hm³/año, son empleados para abastecimiento urbano, (en torno al 26 % del total de agua subterránea utilizada), mientras que los países europeos próximos muestran porcentajes entre el 50 y 80 %.

En cuanto al regadío, se dedican unos 4.300 hm³/año (lo que supone el 74% del total del agua extraída de los acuíferos) con los que se riegan unas 920.000 ha con una dotación media de 4.700 m³/ha/año, notablemente inferior a la dotación de 8.800 m³/ha/año atribuida a los riegos con aguas superficiales. A este respecto, conviene establecer parámetros de gestión hídrica, evaluando la eficiencia social y económica de los usos del agua, como fase previa para la asignación del recurso o el diseño del régimen económico-financiero.

En el V Congreso Nacional de Medio Ambiente, celebrado en Madrid en octubre de 2000, se apunta como un objetivo medioambiental la *“Integración de aguas subterráneas en la gestión hídrica.”* Para ello se considera una estrategia *“el aumento de la capacidad de regulación de un sistema de explotación utilizando los acuíferos de modo similar a los embalses de superficie.”* De este modo *“es posible regular las escorrentías mediante operaciones de embalse (recarga artificial incluida), y desembalse (bombeos o surgencias naturales).”* Por otro lado, son reguladas las *“reservas de renovación lenta, en estrategias de respuesta a sequías en que se planifica la reposición de las reservas vaciadas mediante recarga artificial o ralentización temporal de la explotación del acuífero, o como reservas disponibles una sola vez.”*

1.2. Antecedentes sobre las experiencias de recarga de acuíferos en España

Las primeras instalaciones modernas en España no se iniciaron hasta los años 60, en los aluviales de los ríos Besós y Llobregat (Custodio y Llamas, 1983). Desde 1984, el IGME viene desarrollando numerosas actividades, generalmente en forma de experiencias piloto (IGME, 2000). Más recientemente, desde el año 2001 el MAPA ha construido y ampliado al menos dos dispositivos en zonas regables de la provincia de Segovia: Cubeta de Santiuste y Carracillo (Galán et al, 2001; Fdez. Escalante y López, 2002).

El volumen anual máximo de recursos hídricos que podrían obtenerse resultantes de operaciones de RA asciende a 300-350 hm³/año (IGME, 2000). Esta cifra está en desacuerdo con la estimación realizada por el Ministerio de Medio Ambiente, según el cual “la cuantía total de recursos destinados de forma regular a recarga artificial en España es de difícil estimación, pero no debe alcanzar siquiera los 50 hm³/año” (MIMAM, 2000). Si bien, la misma fuente considera que los resultados obtenidos en estas experiencias son “esperanzadores”.

Algunos de los obstáculos que encuentra la RA en este país para su desarrollo, de acuerdo con Pérez - Paricio (2000), son:

- Una visión principalmente hidráulica de la política relativa a la gestión de los recursos hídricos en el país, donde quedan relegados a un segundo plano alternativas como son la reutilización, gestión de la demanda, y por supuesto la RA, designadas como “*técnicas especiales*” en el Programa de Actualización del Inventario Hidrogeológico (PAIH) del MIMAM, capítulo 5, en el que alude a la recarga artificial de acuíferos en la cuenca del Duero.
- Escasez y falta de continuidad en las experiencias realizadas hasta la fecha, que en muchas ocasiones, han estado en el ámbito de la investigación. Las operaciones realizadas por el MAPA a este respecto van cobrando importancia creciente, si bien, la primera actuación de gran relevancia ha sido en el año hidrológico 2002/03 (Cubeta de Santiuste).
- Poca dedicación en las publicaciones de mayor divulgación de la gestión hídrica del país, como son los textos del Libro Blanco de las Aguas Subterráneas, LBAS, (MOPTMA-MINER, 1994), el Libro Blanco del Aguas en España, LBAE, (MIMAM, 2000), etc.

Un método efectivo para combatir los obstáculos mencionados, consiste en la difusión de experiencias e investigaciones de programas multidisciplinarios de carácter científico-técnico, de manera planificada y rigurosa (Pérez-Paricio et al., 2000). Es precisamente en este contexto donde se pretende aportar una contribución para que la recarga artificial adquiera la consideración que merece en España (Fdez. Escalante, 2005).

Algunos autores han manifestado en distintos foros ponencias relativas a la aplicación de la recarga artificial en nuestro país, destacando opiniones relativas a la “*falta de confianza en esta tecnología, muy probablemente por desconocimiento de sus potencialidades*” (Fernández Rubio, 2001), o “*la tendencia a sobre aprovechar los recursos superficiales*” (Villarroya, 2002). Mientras, algunos ejemplos europeos y norteamericanos avalan su efectividad. El siguiente párrafo, relativo a la recarga artificial, ha sido extraído del LBAE (MIMAM, 2000): “*Los resultados obtenidos en estas experiencias son esperanzadores, aunque se han producido algunos fracasos que han sido fruto tanto de una falta de planificación y tecnología, como de un interés insuficiente por sus posibles beneficiarios, y escasa aportación económica para desarrollarlas.*”

2. Objetivos

Los objetivos de este artículo son:

- Iniciar un estudio del “estado de la cuestión” con vistas al futuro desarrollo de esta tecnología.
- Estimar el grado de consideración que la técnica de la recarga artificial tiene en el resto del mundo mediante el inventariado de las experiencias y dispositivos existentes en la actualidad.

Para ello se hace una síntesis del desarrollo que ha tenido este tipo de prácticas a escala mundial, realizando un inventario de las experiencias de recarga artificial existentes a partir de la información recopilada (Fdez. Escalante, 2005).

Todas las experiencias mencionadas han sido inventariadas a partir de la consulta de literatura hidrogeológica y de páginas web específicas disponibles en internet. Algunas experiencias han sido visitadas *in situ*.

3. Inventario de instalaciones en el mundo

Con objeto de dar a conocer el grado de divulgación de esta “técnica especial”, a continuación se presentan y describen brevemente algunas de las principales actuaciones realizadas en España, Europa, Estados Unidos y Australia.

Además de las instalaciones de RA que se irán comentando en los apartados siguientes, cabe citar que según el inventario de instalaciones que realiza el Instituto Acacia de Holanda en coordinación con el Grupo de Recarga Artificial de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), hay al menos cerca de un centenar más de instalaciones en fase de investigación, diseño o construcción (<http://www.iah.org/recharge>).

3.1. Actuaciones en España

En España, los primeros antecedentes de recarga artificial datan, al menos, desde la época árabe, como son los careos alpujarreños o el sistema de diques y boqueras levantinos (Díaz-Marta, 1989). Las acequias de careo aprovechan el deshielo de Sierra Nevada y permiten la infiltración del agua por el fondo de la acequia en el acuífero de las Alpujarras. Se trata de un sistema activo todavía en la actualidad con un sistema de gestión vigente desde el siglo XV. Buenos ejemplos de acequias de careo pueden ser encontradas en Mecina-Bombarón, Pitres, etc.

Las primeras instalaciones de recarga artificial que se construyeron en la época moderna (1969) están situadas en Cornellá y en los alrededores de Barcelona: aluvial del río Besós y del río Llobregat (Valdés, 1992; Martín-Alonso, 2003). En este último acuífero se recargan, en algunos años, hasta un máximo de 20 hm³ en pozos localizados en el delta, con aguas sobrantes de la planta de tratamiento de San Joan d’Espí. Esta recarga se complementa mediante escarificado del lecho del río Llobregat (Pérez-Paricio, 1999).

Siguiendo un orden cronológico, es preciso apuntar que la segunda experiencia destacable realizada en nuestro país se ubica en Mallorca, en el Llano de Palma. Utiliza un sistema mixto fundamentado en el riego directo con aguas residuales domésticas e inyección de excedentes, cuando existen, en pozos perforados en calcarenitas muy permeables. Actualmente están en funcionamiento dos sondeos de recarga artificial (Murillo et al, 2002).

El Instituto Geológico y Minero de España, en colaboración con otros organismos, como el IRYDA, Gobierno Autónomo de la Rioja, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), Diputación de Alicante, etc., ha efectuado, desde 1984, una serie de experiencias piloto, entre las que cabe señalar las siguientes (ITGE, 2000 a y b; Fdez. Escalante y García, 2004):

- Un sondeo profundo y represas en el acuífero de Jijona (Alicante).
- Un pozo de gran diámetro dotado de galerías en la Plana de Gandía-Denia, sector Vergel-Els Poblets (Alicante).
- Dos pozos rellenos de grava en el aluvial del Guadalete (Cádiz).
- Batería de pozos con drenes o galerías horizontales en profundidad aprovechando antiguas captaciones abandonadas o fuera de uso al objeto de disminuir costes con excedentes procedentes del río Girona.
- Cinco balsas de infiltración en la vega de Guadix (Granada).
- Dos balsas de infiltración en las Dehesas de Guadix (Granada).
- Seis balsas de infiltración en Mazagón (Huelva).
- Un sondeo profundo en el valle del Esgueva (Valladolid).
- Tres balsas de infiltración en el aluvial del Río Oja (La Rioja).
- Una balsa de infiltración tipo fosa en las calcarenitas de Carmona (Sevilla). El Aluvial del Guadalquivir y las Calcarenitas de Carmona constituyen una interesante formación almacén susceptible para la recarga artificial, al estar situadas en zonas donde no es posible construir embalses de superficie (Silgado et al, 2002).
- Dos zanjas de infiltración en el aluvial del bajo Guadalquivir (Sevilla).
- Un sondeo profundo en Mancha Real (Jaén).
- Sondeos de inyección en Marbella (Málaga).
- Sondeos de inyección experimentales a cargo del Canal de Isabel II (CYII) en Madrid (comunicación verbal).

Las principales características de la mayoría de estas experiencias piloto figuran en varias publicaciones del IGME (Murillo et al, 2001 y 2002; Murillo, 2002; De la Orden et al, 2003).

Otras instituciones, como es el MAPA, a través de la Empresa de Transformación Agraria (TRAGSA), han promovido experiencias de recarga artificial de forma experimental. A este respecto cabe destacar la experiencia llevada a cabo en el invierno de 1997 entre Alcázar de San Juan y Argamasilla de Alba (Ciudad Real), si bien no ha habido publicaciones al respecto por parte del organismo promotor (comunicación verbal).

En este mismo contexto cabe incluir las instalaciones de la Cubeta de Santiuste de San Juan Bautista (operativa desde noviembre de 2002) y del Carracillo (actualmente en fase experimental cuyo primer ciclo de RA comenzó en 2003).

Recientemente se ha analizado la posibilidad de la recarga artificial con aguas residuales en el contexto hidrológico de la cuenca del río Onyar, Cuencas Internas de Cataluña (Menció et al, 2003); así como en el acuífero de la Moraña (Ávila), quedando rechazada esta última opción ante la falta de recursos hídricos superficiales.

La distribución geográfica de estas experiencias queda reflejada en la Figura 3 (Nota: las imágenes de fondo de las figuras nº 3, 4, 5, 6, 7 y 9, han sido tomadas de la siguiente dirección de Internet: [http //www. earthetc.com/ ecwearth/asps/ecwearth_frame.asp? Image=geodetic/world/landsat742](http://www.earthetc.com/ecwearth/asps/ecwearth_frame.asp?Image=geodetic/world/landsat742))



Figura 3. Principales estructuras y dispositivos de recarga artificial de acuíferos operativos o en proyecto en España. No han sido representados los experimentos escasamente divulgados.

Los resultados obtenidos en todas las experiencias citadas anteriormente, donde los dispositivos de infiltración han funcionado a lo largo de uno o varios años con diferente duración de cada ciclo de recarga artificial, son esperanzadores. En este sentido, los distintos Planes Hidrológicos de cuenca han previsto diversas áreas en distintos acuíferos donde efectuar operaciones de recarga artificial, tarea que para su correcta realización precisa de la participación de las comunidades de usuarios de los acuíferos (Murillo et al, 2001).

3.2. Algunas experiencias en Europa

En Europa se han ensayado distintos esquemas de recarga artificial desde 1870 en Dusseldorf (Alemania), y desde 1879 en Nigmejen (Holanda). Desde entonces se han practicado diferentes alternativas, caracterizadas por la carencia de un protocolo común europeo, carencia que persiste en la actualidad.

Algunas cifras sobre las experiencias de RA en países de centroeuropa nos dicen que las aguas de recarga artificial derivadas desde algún río representan un 45% del abastecimiento en Hungría, un 16% en Alemania, un 50% en Eslovaquia, etc.

A modo de ejemplo, las ciudades de Dusseldorf y Budapest dependen en un 100% de aguas de RA y Berlín en un 75%.

Además de las estructuras de RA, en Europa hay un amplio desarrollo de otras prácticas similares como el empleo de “Bancos de Filtración”. La mayor densidad de estas estructuras se sitúa junto al cauce de los ríos Rhin, Elba, Danubio y en el lago Tegel (Grischek et al, 2002 a). Además existen varias plantas de Bancos de Filtración en ciudades como Colonia, Ginebra, Dresden, Zurich, Lindau, Kuopio y Maribor.

A partir de las diferentes fuentes bibliográficas consultadas, se ha concluido que el número de experiencias de recarga artificial de acuíferos en Europa (hasta el año 2002) oscila entre unas setenta u ochenta. Seguidamente se presenta una relación de las actuaciones más importantes, indicando las localidades donde se encuentran, ordenadas por países, y la referencia bibliográfica para el lector interesado. La localización de las citadas zonas puede verse en las Figuras 4 y 5.

- Alemania: Dresden-Tolkewitz, Meissen-Siebeneichen, Torgau, Flehe, Dusseldorf, Auf den Grind, Berlín-Tegel, Berlín-Friedrichshagen (Grischek et al, 2002b).

- Austria: Ulfiswiese, Innsbruck, Donauinsel y Viena (Grischek et al, 2002b).
- Dinamarca (Madsen et al, 1998).
- Eslovaquia: Rusovce, Kalinkovo, Samorin, Gabcikovo (Grischek et al, 2002b).
- Eslovenia: Maribor (Grischek et al, 2002a).
- Finlandia: Hietasalo, Kuopio, Riku, Kangasala (Grischek et al, 2002b; Miettinen et al, 2003).
- Francia: Capdenac-Gare, Geneuille (Grischek et al, 2002a); París (Haeffner et al, 1998).
- Holanda: Nijmegen, Roosteren (Grischek et al, 2002a).
- Hungría (Laszlo, 2003); Budapest, isla de Csepel, Szentendre, Esztergom, Koppanymonostor, Nagybajcs-Szogye, Győr (Grischek et al, 2002b).
- Inglaterra: Essex, Fochabers, Gatehampton (Montgomery, 1987; Cook & Moncaster, 1998; Grischek et al, 2002b).
- Lituania: Baltezers, Riga (Grischek et al, 2002).
- Noruega (Sandlund & Viken, 1997).
- República Checa: Karany (Grischek et al, 2002b).
- Rumanía: Gheraiesti, Bacau (Grischek et al, 2002b).
- Rusia: Kaliningrado (Grischek et al, 2002b).
- Suiza: Ginebra , Linsental, Winterthur, Zurcá, Ginebra (De los Cobos, 2002).

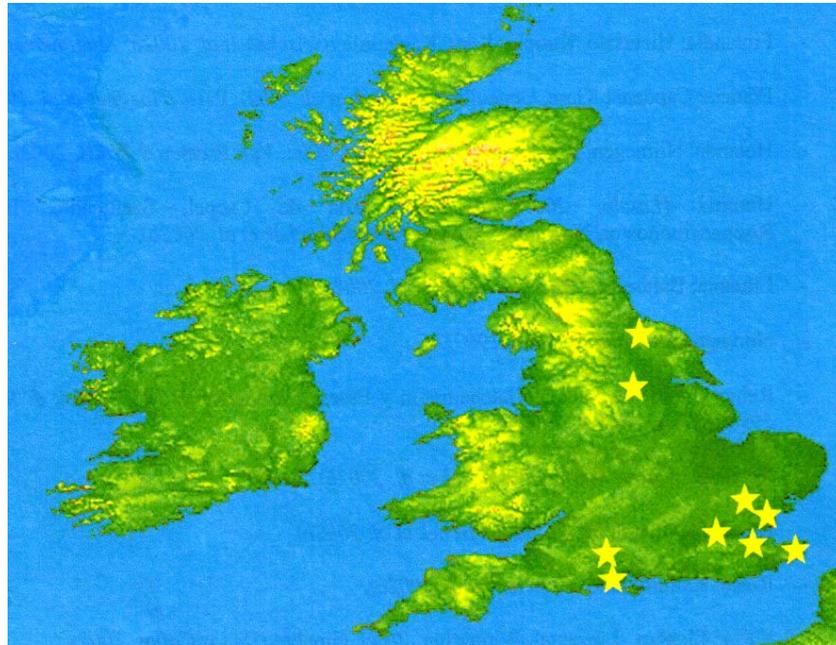


Figura 4. Principales estructuras y dispositivos de recarga artificial de acuíferos operativos o en proyecto en Inglaterra.

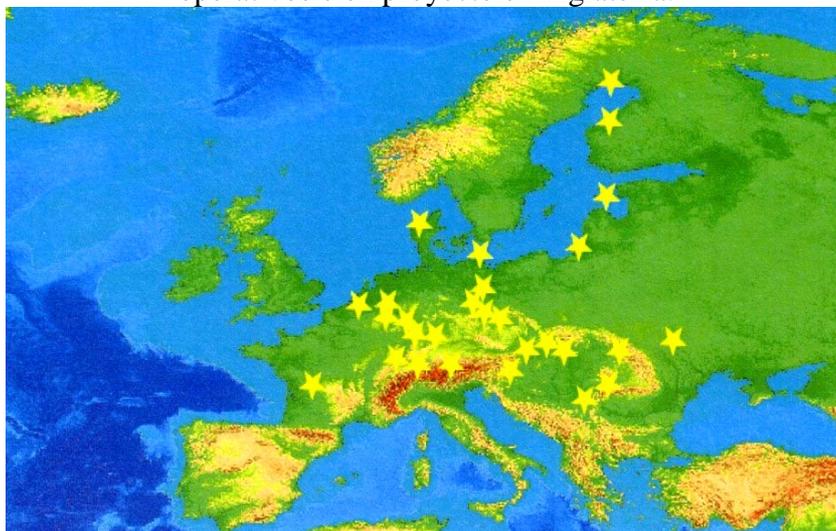


Figura 5. Principales estructuras y dispositivos de recarga artificial de acuíferos operativos o en proyecto en Europa (excluidas España e Inglaterra).

3.3. Algunas experiencias en América

Según el inventario de instalaciones del Instituto Acacia de Holanda, al menos hay 56 instalaciones operativas de recarga artificial de acuíferos en Estados Unidos (Pyne, 1998). En la Figura 6 se ha representado la localización de las experiencias más relevantes.

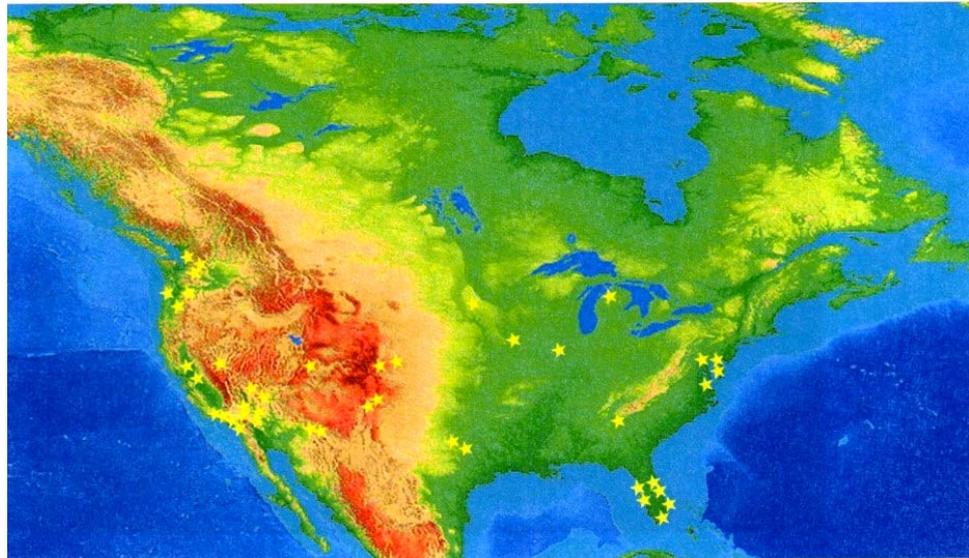


Figura 6. Principales estructuras y dispositivos de RA de acuíferos en Estados Unidos.

También se han encontrados algunas referencias de actuaciones de RA en México y Argentina (Tuinhof, 2002; Tuinhof et al, 2004).

3.4. Algunas experiencias en África

En Namibia y República Sudafricana, donde estudios preliminares llevados a cabo por el CSIR, el Departamento de “*Water Affairs and Forestry*” y los Ayuntamientos de Windhoek (Namibia), Calvinia, Kharkams (Cabo del Norte), Atlantis y Petersburgo, han concluido en que la recarga artificial puede representar una solución efectiva para países propensos a las sequías a bajo coste (<http://www.csir.co.za>, 2002).

Nuevas experiencias de RA de acuíferos en Egipto, Kenia y Namibia se han llevado a cabo empleando embalses subsuperficiales, embalses arenosos de recarga, tanques de percolación y gabiones (Tuinhof et al, 2004).

3.5. *Algunas experiencias en Asia*

Las experiencias más extendidas han sido llevadas a cabo en Israel, donde existen dos proyectos que aprovechan aguas de inundaciones para recargar los acuíferos de Shiquma, al norte de la franja de Gaza, y de Nahalei Menashe, cerca de Cesarea (Acreman, 2000).

El primero consta de una presa que retiene las aguas de inundación, para más tarde distribuir las hacia estanques de infiltración intercalados en dunas arenosas en la costa. Presenta problemas de colmatación importantes y altos costes de bombeo.

El segundo consta de un embalse de almacenamiento, uno de decantación y una serie de estanques de infiltración. La conducción del agua se produce por gravedad. En la Figura 7 se indica la posición de estos dispositivos.



Figura 7. Principales estructuras y dispositivos de recarga artificial de acuíferos operativos o en proyecto en Israel.

Aunque las referencias son bastante escasas, algunas de las experiencias más destacables se están desarrollando en Tailandia, Taiwán, Kuwait y la Unión India, país donde se han identificado una decena de experiencias de recarga artificial en: Delhi, Chandigarh, New Delhi, Haryana, Punjab, Himachal Pradesh, Palampur (Kangra), Indore (Madhya Pradesh), Jaipur (Rajasthan), (<http://www.cgwaindia.com/success.htm>).

3.6. Algunas experiencias en Oceanía

En Australia y Nueva Zelanda se ha desarrollado la técnica de RA con gran efectividad (Figura 8). En la actualidad existen al menos cinco programas en desarrollo (Pavelic, 2003, en www.iah.org/recharge). En la Figura 9 se presenta la localización de las experiencias más importantes.

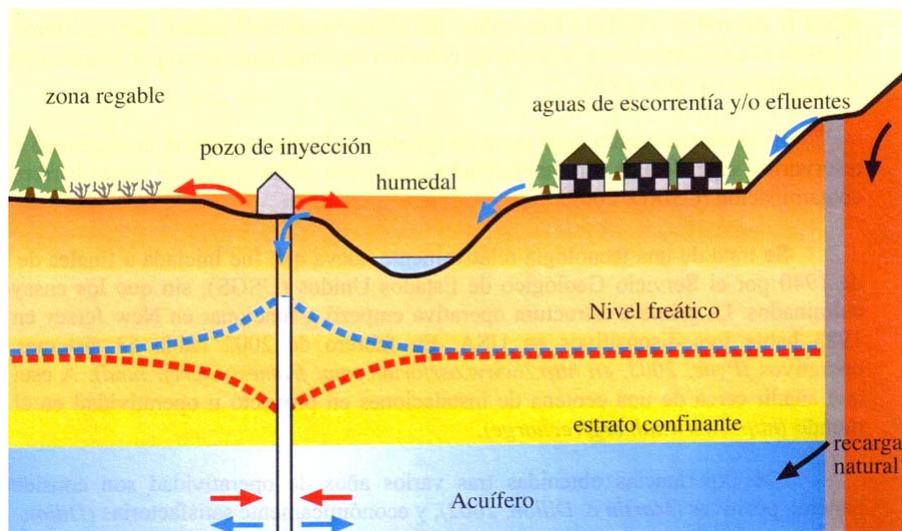


Figura 8. Ejemplo de instalación de recarga artificial de acuíferos. Bolívar, Adelaida, Australia (Modificado de Dillon & Pavelic, 1996).

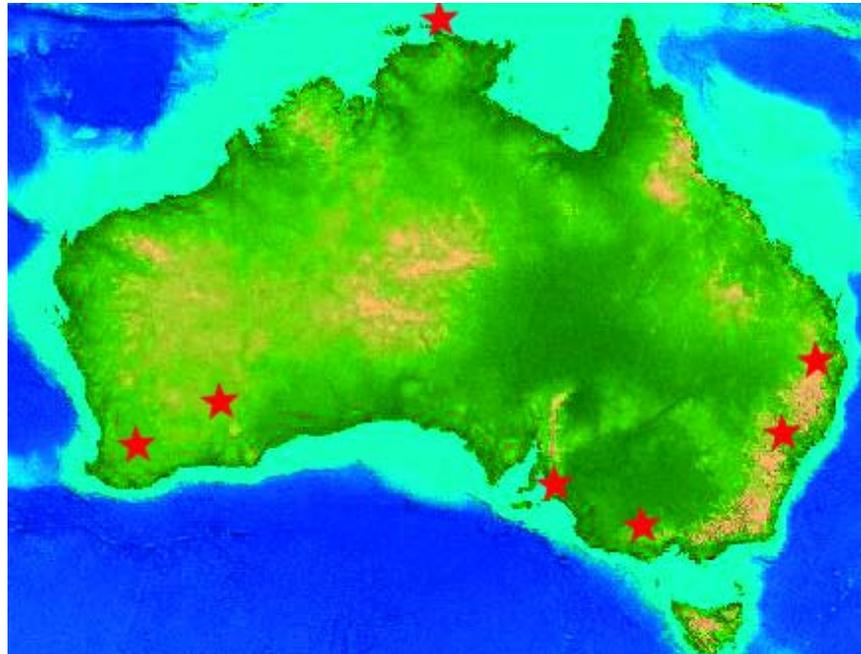


Figura 9. Principales estructuras y dispositivos de recarga artificial de acuíferos operativos o en proyecto en Australia.

4. Conclusiones

En general, el número de experiencias de recarga artificial en los distintos países avalan su grado de aceptación.

Algunos de los países donde hay más sistemas operativos de recarga de acuíferos son Australia, Holanda, Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, Alemania, y República Sudafricana. Existen además varios programas en desarrollo en Holanda, Nueva Zelanda, Tailandia, Taiwán, Kuwait, India, etc.

Actualmente esta técnica está infrutilizada en España: la mayor parte de las actuaciones son todavía experimentales. Tan solo hay tres dispositivos que pueden ser considerados de “gran envergadura”, desarrollados en Cataluña y Castilla-León.

El volumen anual medio de recursos hídricos resultantes de operaciones de RA en España se sitúa entorno a los 50 hm³ según distintas fuentes, diez veces inferior al registrado en Holanda.

Algunos ejemplos europeos y norteamericanos de experiencias en recarga artificial de acuíferos, bien conocidos por la Administración General del Estado y los responsables de la gestión hídrica en el estado español, avalan la efectividad de la técnica. Tal ejemplo podría y debería influir en su progresiva implantación, ya que convergen los principales condicionantes necesarios en gran parte de la geografía peninsular.

Este inventario puede servir para fomentar el conocimiento e importancia de la recarga artificial de acuíferos, en la gestión de los recursos hídricos.

5. Agradecimientos

A Rosa, Sergio y Leiva.

6. Bibliografía

- ACREMAN, M. (2000). *Hidrología de los humedales*. Medwet nº 10. Conservación de humedales mediterráneos. Tour du Valat, Arlés, Francia.
- 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*. Hydrogeology Journal, volume 10, nº 2, abril 2002.
- COOK, M.C. & MONCASTER, S. (1998). *ASR feasibility testing of the semi-confined Cretaceous Chalk aquifer of South Essex, England*. Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. (ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- CUSTODIO, E Y LLAMAS, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Ed Omega. Barcelona. 2 vols: 1-2450.
- DE LA ORDEN, J.A., LÓPEZ-GETA, J.A. Y MURILLO, J.M. (2003). *Experiencias de recarga artificial de acuíferos realizadas por el IGME en acuíferos detríticos*. Boletín Geológico y Minero. Volumen 114, nº 2, abril-junio de 2003. I.G.M.E-M.C.T.

- DE LOS COBOS, G. (2002). *The aquifer recharge system of Geneva, Switzerland: a 20 year successful experience*. 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.
- DÍAZ-MARTA, M. (1989). *Esquema histórico de la ingeniería y la gestión del agua en España*. Revista de OP nº 13, España y el Agua I. Otoño 1989 pg.8-23.
- DILLON, P.J. & PAVELIC, P. (1996). *Economics of ASR: System and users perspective*. Aquifer Storage and Recovery. Centre for Groundwater Studies. Adelaide, Australia. 1-2 october, 1996.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E., y LÓPEZ, J. (2002). *Contribution to the hydrogeological knowledge of an artificial recharge area based on hydrochemical investigation. Los Arenales site, 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, The Netherlands.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A.E., GARCÍA M. (2004). *La recarga artificial de acuíferos en el mundo. Estado de la cuestión y experiencias. Primera parte: estado de la cuestión*. VIII Simposio de Hidrogeología. Zaragoza. Pag. 323-333.
- FERNÁNDEZ ESCALANTE, A. E., GARCÍA M. (2004). *La recarga artificial de acuíferos en el mundo. Estado de la cuestión y experiencias. Segunda parte: inventario de experiencias a nivel mundial*. VIII Simposio de Hidrogeología. Zaragoza. Pag. 334-343.
- 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.
- FERNÁNDEZ RUBIO, R. (2001). *Las aguas subterráneas en el Anteproyecto del Plan Hidrológico Nacional*. Club Español del Medio Ambiente. Revista Tecnoambiente Nº 106 Año XI.
- FREEZE, R.A., CHERRY, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 604 pp.
- GALÁN, R, FDEZ 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.
- GALÁN, R., LÓPEZ, F., MARTÍNEZ, J., MACÍAS, C., GALÁN, G. y FDEZ. ESCALANTE, A.E. (2001). *Recarga artificial del acuífero de los Arenales en la*

- comarca de “El Carracillo” (Segovia). Soporte físico. VII Simposio de hidrogeología, AEH, Murcia.
- GRISCHEK, T., MADELEIDT, W. & NESTLER, W. (2002a). *River bed specifics and their effect on bank filtration efficiency. 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.
- GRISCHEK, T., SCHOENHEINZ, D. WORCH, E. & HISCOCK, K. (2002b). *Bank filtration in europe- an overview of aquifer conditions and hydraulic controls. 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.
- HAEFFNER, H., DETAY, M. & BERSILLON, J.L. (1998). *Sustainable groundwater management using artificial recharge in Paris region.” Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al.(ed)*. Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (IGME) (2000). *Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias*. MCT.
- INSTITUTO TECNOLÓGICO Y GEOMINERO DE ESPAÑA (ITGE) (1991). *Tecnología básica de la recarga artificial de acuíferos*. Serie: Lucha contra la contaminación.
- ITGE. (2000a). *Recarga artificial de acuíferos*. ITGE.-Exma. Diputación Provincial de Alicante.
- ITGE. (2000b). *Identificación de acciones y programación de actividades de recarga artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias*. ITGE. Ministerio de Ciencia y Tecnología.
- LASZLO, F. (2003). *The Hungarian Experience with Riverbank Filtration.” Riverbank filtration: the future is now!. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.)*. September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- LERNER, D.N., ISSAR, A.S. & SIMMERS, I. (1990). *Groundwater recharge. A guide to understanding and estimating natural resource*. IAH Int contribution Hydrogeology, 8. Heinz Heise, Hannover, 345 pp.
- LLAMAS, M.R. (2001). *Aguas subterráneas: retos y oportunidades*. Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-prensa.

- MADSEN, B., HENRIKSEN, H.J. & KNUDBY, C. (1998). *The national water resource model developed for the assessment of the distribution and protection of the Danish groundwater resources*. En Brahma et al. IAH/AIH joint conference Gambling with groundwater – physical, chemical and biological aspects of aquifer stream relations, pag. 219 – 226.
- MARTÍN-ALONSO, J. (2003). *Combined Use of Surface Water and Groundwater for Drinking Water Production in the Barcelona Metropolitan Area. Riverbank filtration: the future is now!*. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- MENCIÓ, A., MAS-PLA, J. y VILANOVA, E. (2003). *Análisis de las posibilidades de la recarga artificial de aguas residuales en el contexto hidrológico de la cuenca del río Onyar (Cuencas internas de Cataluña)*. Presente y futuro del agua subterránea en España y la Directiva Marco del agua. Medidas de corrección. Zaragoza, 20-22 de noviembre de 2002. IGME.
- MIETTINEN, I., LEHTOLA, M., VARTIAINEN, T. & MARTIKAINEN, P. (2003). *Microbial Regrowth in Artificially Recharged Groundwater: Experiences from a 4-Year Project.*” *Riverbank filtration: the future is now!*. Proceedings of the Second International Riverbank Filtration Conference. Melin, G. (Ed.). September 16-19, 2003. Cincinnati, Ohio. National Water Research Institute. Fountain Valley, California.
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (MIMAM) (2000). *Libro Blanco del Agua en España 2000 (LBAE)*. MIMAM. Madrid. 637 pp.
- MONTGOMERY, H. (1987). *U.K. Experience in the ground water recharge of threated sewage: Potential for irrigation purposes*. Irrig. & Drainage Eng.
- MOPTMA.-MINER (1994). *Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (LBAS)*. Serie Monografías. Secretaría General Técnica del Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente.
- MURILLO, J.M. (2000). *Recarga artificial de acuíferos o como introducir y almacenar agua en los acuíferos*. Terralia. La revista independiente del medio rural. Año 4. nº 15. Junio de 2000.
- MURILLO, J.M., DE LA ORDEN, J.A. y RODRÍGUEZ, L. (2001). *La recarga artificial como técnica de recuperación de acuíferos contaminados. Aplicación a la Plana de Vergel (Alicante)*. IGME., 2001.
- MURILLO, J.M., DURÁN, J.J., ORDEN, J.A. DE LA, LÓPEZ GETA, J.A. (2002). *Experiencia piloto de recarga artificial en el acuífero de Mitidja (Argelia).*” *Curso de recarga artificial de acuíferos*. IGME.- Agencia Española de Cooperación Internacional. Técnicas Hidrogeológicas y de Servicio.

- PAVELIC, P., & P. DILLON. (1996). *The impact of two seasons of stormwater injection on groundwater quality in South Australia*. Proc. of the Internat. Symp. on Artificial Recharge of Groundwater (Helsinki, Finland): 105-110. Edited by A-L. Kivimaki and T. Suokko.
- PÉREZ-PARICIO, A. (1999). *Site description Cornellà, Spain*. Proyecto Europeo de Recarga Artificial de Acuíferos. Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona.
- PÉREZ-PARICIO, A. (2000). *Integrated modelling of clogging of artificial recharge systems*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- PÉREZ-PARICIO, A., BENET, I., AYORA, C., SAALTINK, M. Y CARRERA, J. (2000). *CLOG: A code to address the clogging of Artificial Recharge systems*. Simposio internacional: Computer Methods for Engineering in Porous Media, Flow and Transport, 28/9 al 1/10 de 1998. Giens (Francia). Ed.: J.M. Crolet.
- PYNE, D.G. (1998). *Aquifer storage recovery: Recent developments in the United States*. Artificial recharge of groundwater, Peters, J.H. et al.(ed). Proceedings of the 3th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Ámsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998. Ed. Balkema, Róterdam.
- SANDLUND, O.T., & VIKEN, Å. (Eds.) (1997). *Report from Workshop on Freshwater Biodiversity*. Selbu, Norway, 5.-7. June 1997. The Trondheim Conferences on Biodiversity.
- SILGADO, A., ROMÁN, J, MARTÍN, M. y MANTECÓN, R. (2002). *Uso eficiente del agua en cuencas optimización de la gestión de los recursos hidráulicos mediante la recarga artificial. Experiencias en la cuenca del Guadalquivir*. Internet: <http://www.unesco.org>.
- TUINHOF, A & HEEDERIK, J.P. eds. (2002). *Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage. Making Better Use of Our Largest Reservoir*. Papers of Seminar Wageningen. 18 - 19 December 2002. Netherlands National Committee for the IAH in cooperation with Netherlands Hydrological Society.
- TUINHOF, A, OLSTHOORN, T., HEEDERIK, J.P. & DE VRIES, J. (2004). *Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage. A promising option to cope with increasing needs*. Netherlands National Committee for the IAH in cooperation with Netherlands Hydrological Society.
- VALDES, J.L. (1992). *Experiencias de recarga artificial en los acuíferos del Río Llobregat y Río Besòs*. Aguas de Barcelona (AGBAR), Barcelona
- VILLARROYA, F. (2002). *El marco de la Directiva Marco*. Jornadas técnicas sobre la gestión y el control del agua frente a la Directiva Marco. UAM-CY-II.

<http://www.cgwaindia.com/success.htm>

24. A. Enrique Fdez. Escalante, Manuel García Rodríguez y Fermín Villarroya .

http://www.earthetc.com/ecwearth/asps/ecwearth_frame.asp?Image=geodetic/world/landsat742

<http://www.iah.org/recharge>

<http://www.csir.co.za>