

CONAMA 2020

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

La recarga gestionada de acuíferos en España.

Previsiones en materia de planificación
y gobernanza en el corto plazo

Managed aquifer recharge in Spain. Planning
and governance forecasts in the short term



Autor Principal: Jon San Sebastián Sauto (Tragsatec)

Otros autores: Enrique Fernández Escalante, Tragsa- PTEA; José David Henao Casas (Tragsa-UPM); Rodrigo Calero Gil (Tragsa)

ÍNDICE

1. Título
2. Palabras Clave
3. Resumen
4. Introducción
5. Metodología
6. Resultados
7. Discusión
8. Conclusiones
9. Bibliografía

1. TÍTULO

La recarga gestionada de acuíferos en España. Previsiones en materia de planificación y gobernanza en el corto plazo.

Managed aquifer recharge in Spain. Planning and governance forecasts in the short term.

2. PALABRAS CLAVE

Recarga gestionada de acuíferos, MAR, planes hidrológicos de cuenca, planificación hídrica, gobernanza, cambio climático, confederaciones hidrográficas

3. RESUMEN

La recarga gestionada de acuíferos (MAR: Managed Aquifer Recharge) es una técnica de gestión hídrica de gran potencial, que hasta la fecha ha sido escasamente desarrollada en España. No obstante, su grado de implantación es creciente y las experiencias con continuidad están arrojando resultados positivos. Anteriormente era designada “recarga artificial”, término que algunos agentes todavía utilizan a pesar del mayor consenso internacional por emplear esta nomenclatura. En general y conforme al quorum de instituciones tales como la Comisión de recarga gestionada de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH-MAR Commission), tal terminología queda restringida para los aspectos cuantitativos de la técnica, sin considerar los cualitativos (Dillon et al., 2018 [3]).

El escenario climático actual, con periodos de sequía cada vez más acusados, distribución muy irregular de las precipitaciones y la creciente escasez de agua ha suscitado una amplia preocupación social y de las Administraciones Públicas, y una apuesta decidida por la aplicación de soluciones innovadoras en la gestión hídrica. Entre todos los componentes del ciclo integral del agua, se ha prestado una especial atención en la línea de acción “recarga gestionada de acuíferos”, punto focal de esta publicación. Además, las circunstancias socio-políticas y el marco legal presente son idóneos para incluir este tipo de dispositivos en los nuevos esquemas mejorados de gestión hídrica, al ser una medida de adaptación al cambio climático (los acuíferos recargados son una solución de futuro para la planificación hídrica y la gobernanza) e incluso de mitigación. Por otro lado, son dispositivos de bajo coste.

En este contexto, y tras extraer y unificar los resultados de cinco proyectos de I+D+i focalizados en la técnica MAR, esta publicación tiene por objeto estudiar las previsiones de implementación de este tipo de sistemas en los planes hidrológicos de cuenca actuales, como sistemas de gestión hídrica y gobernanza bien adaptados a la realidad hídrica española del siglo XXI. Para ello se considera preciso presentar la técnica con cierto detalle y explicar por qué es una solución tecnológica afín con el desarrollo sostenible para la gestión integral del agua.

Finalmente se exponen las expectativas a corto plazo en España, donde hay opciones reales de implementar dispositivos MAR con garantía de éxito técnico. Se ha encontrado un compromiso de acciones futuras en esta materia en el ámbito nacional en 11 Planes Hidrológicos de Cuenca: Ebro, Cataluña, Duero, Guadalquivir, Cuencas mediterráneas andaluzas, Júcar, Islas

Baleares, Tajo, Guadiana y Melilla. En definitiva, se trata de una tecnología contrastada, real, segura y viable y de alto "valor contingente". A pesar de ello y de las actuaciones previstas en los programas de medidas de los nuevos PHC, su aplicación en España es todavía escasa, a pesar de quedar demostrado que el almacenamiento de agua como recurso estratégico minimiza los impactos y riesgos citados.

El conocimiento en la materia ha aumentado considerablemente tras la celebración del 10º Congreso Internacional de recarga gestionada de acuíferos (ISMAR 10), Madrid, 20-24 de mayo de 2019, con presencia de 320 delegados de 58 países (www.ismar10.net).

3.1. Resumen en inglés

Managed Aquifer Recharge (MAR) is a water management technique with great potential, which has so far been poorly developed in Spain. However, its degree of implementation is growing and experiences with continuity are showing positive results. It was previously known as "artificial recharge", a term that some agents still use despite the greater international consensus for using the MAR nomenclature. In general, and according to the quorum of institutions such as the International Association of Hydrogeologists' Managed Recharge Commission (IAH-MAR Commission), such terminology (artificial recharge) is restricted to quantitative aspects of the technique, without considering qualitative ones (Dillon et al., 2018 [3]).

The current climate change scenario, with increasingly severe periods of drought, highly irregular distribution of rainfall and growing water scarcity, has given rise to widespread social and public concerns, and a determined commitment to the application of innovative solutions in integrated water resources management (IWRM). Amongst all the components of the integral water cycle, special attention has been paid to the line of action "managed aquifer recharge", the focal point of this publication. Furthermore, the socio-political circumstances and the current legal framework are ideal for including this technique in the most modern water management schemes, as it is a measure of adaptation to climate change (recharged aquifers are a future solution for water planning and governance) and even of mitigation. It is also worth to mention that MAR systems include usually low-cost devices.

In this context, and after extracting and unifying the results of five R&D projects focused on the MAR technique, this publication aims to study the forecasts for the implementation of this type of systems in current basin hydrological plans (PHCs), as water management and governance systems well adapted to the Spanish water reality of the 21st century. To this end, it is considered necessary to present the technique in some detail and explain why it is a technological solution aligned with IWRM sustainable development.

Finally, the short-term expectations in Spain are presented, where there are real options for implementing MAR devices with technical success guarantee. A commitment to future actions in this area has been found at national level in 11 River Basin Management Plans: Ebro, Catalonia, Douro, Guadalquivir, Andalusian Mediterranean Basins, Jucar, Balearic Islands, Tagus, Guadiana and Melilla. In short, it is a proven, real, safe and viable technology with a high "contingent value". In spite of this and the actions foreseen in the programmes of measures of the new PHCs, its application in Spain is still scarce, despite the fact that it has been demonstrated that water storage as a strategic resource that minimises the mentioned climate-related impacts and risks.

Knowledge in this area has increased considerably in Spain after the celebration of the 10th International Symposium on Managed Aquifer Recharge (ISMAR 10), Madrid, 20-24 May 2019, with 320 expert-delegates from 58 countries (www.ismar10.net).

4. INTRODUCCIÓN

La recarga artificial de acuíferos o Managed Aquifer Recharge (abreviatura: MAR) es un método de gestión hídrica que permite introducir de manera intencionada agua en los acuíferos subterráneos (en general, agua de buena calidad y pretratada). Una vez almacenada en estos, puede ser extraída para distintos usos (abastecimiento, riego, frenar la intrusión marina, reducir la contaminación, regenerar ecosistemas, etc.) mediante pozos o sondeos.

El agua puede proceder de ríos, depuradoras, escorrentía urbana, desaladoras o humedales, entre otros orígenes; y es introducida al acuífero mediante diversos dispositivos tales como zanjas, balsas o pozas (técnica más frecuente en el mundo), canales (segundo dispositivo más empleado), pozos, sondeos de inyección, etc.

La actividad se lleva a cabo generalmente en invierno o en la época lluviosa, cuando hay excedentes hídricos (sistema intermitente, ocasional o de oportunidad); aunque hay dispositivos permanentes o 24-7 si la disponibilidad de agua es continua (depuradoras). Este agua es almacenada en el acuífero adicionalmente a la recarga natural, y sigue su circuito subterráneo, homogeneizando su composición *“in itinere”* a la vez que se *“naturaliza”* durante un periodo de tiempo variable. Más tarde es extraída y empleada para diferentes usos, como abastecimiento y regadío, generalmente con una calidad mejorada y con altas garantías de seguridad.

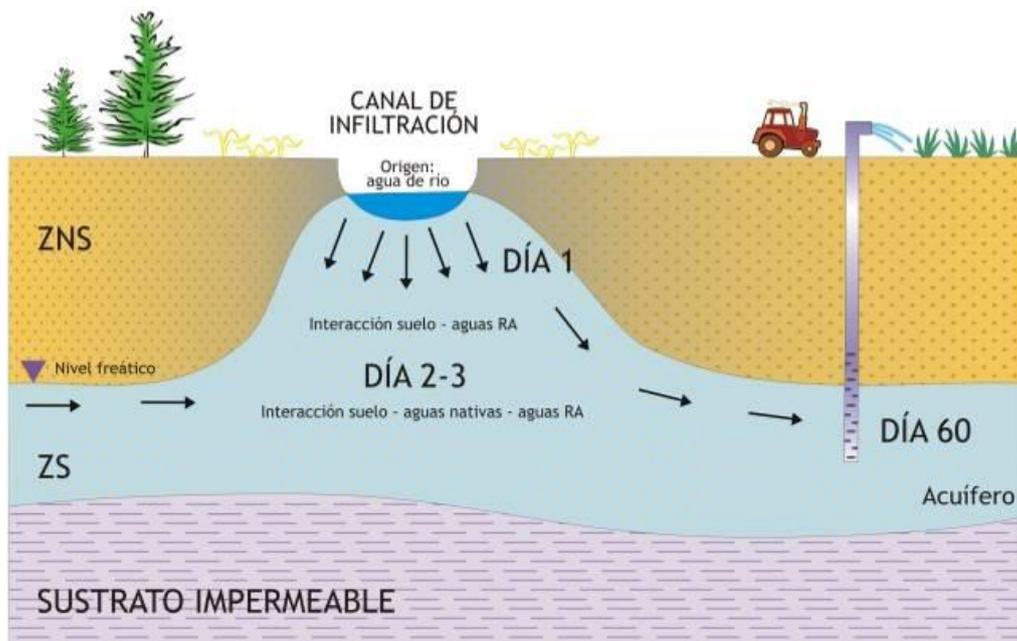


Figura 1. Definición del término “recarga artificial” tomado de la Wikipedia (redactada y publicada por el autor principal en 2008).

Las técnicas MAR son consideradas una alternativa de gestión hídrica de primer orden en varios países del mundo, mientras que en otros se considera una técnica “especial”, y suscita un cierto escepticismo a pesar de su gran potencial. A modo de ejemplo cabe destacar que se han inventariado más de 500 dispositivos y experiencias distribuidos en Europa [1].

De manera coloquial y con pretensiones didácticas, si la extracción de aguas subterráneas mediante un sondeo resulta algo habitual inserto en nuestra idiosincrasia, el proceso similar, invirtiendo el sentido del agua, debería resultar igual de natural, y previsiblemente lo será. Sería multiplicar el proceso por menos uno.

4.1. Antecedentes

En España, la mayoría de las experiencias de mayor escala fueron construidas con carácter experimental, con escasos dispositivos operativos de gran envergadura, ubicados en Castilla y León, Cataluña, Madrid y Castilla-La Mancha.

La cifra de agua recargada de manera artificial a los acuíferos oscila, según las fuentes, desde 50 hm³/año según IGME 2000; hasta 350 hm³/año según el Libro Blanco del Agua en España, MIMAM, 2000; 380 hm³/año (DINA-MAR, 2011) [2], cifras que, aún en el mayor de los casos, representan un volumen del orden de 10 veces inferior a países de Europa Central como Alemania. Tal diferencia numérica es debida a haber tenido en consideración o no durante el cálculo, los dispositivos ubicados en áreas forestales para la gestión hídrica paliativa. En España la infiltración intencionada de agua desde diques de laminación y recarga excede el volumen total publicado en las distintas referencias. Estos diques fueron construidos en su mayoría por el IRYDA y el ICONA desde la década de los 50, y actualmente están siendo inventariados. A este respecto falta por incluir en los cálculos la infiltración que se lleva a cabo por el fondo de las grandes presas, que en España pueden llegar a alcanzar la cifra de 1.400 hm³/año. Un volumen adicional debe ser considerado al considerar los elementos de retorno existentes en zonas urbanas.

De este modo es posible estimar, de manera realista, un volumen de recarga "artificial", intencionado o no, de hasta 800 hm³/año, cifra alejada del volumen publicado en las referencias mencionadas, y que representa un 10% del porcentaje extraído de los acuíferos para distintos usos en el país. También queda alejada de la capacidad de almacenamiento superficial de España, que asciende a unos 54.000 hm³ (quinto país del mundo en capacidad de almacenamiento superficial y primero de Europa).

Acuíferos susceptibles de ser recargados de manera antrópica.

Los condicionantes a tener en cuenta en una zona de recarga artificial tipo, según la finalidad específica de la recarga, son las siguientes:

Acuíferos sobre-explotados que deben ser realimentados:

- Zona con intensa explotación agrícola o zona que suscite un determinado interés medioambiental.
- Acuíferos con intensa extracción para usos potables.
- Zonas con un incremento de extracción previsto para el futuro, ya sea programado o espontáneo (por ejemplo: crecimiento demográfico en una ciudad o pueblo cuyo

sistema de abastecimiento de agua potable esté alimentado desde acuíferos; ampliación de la superficie agrícola con parcelas abastecidas con aguas subterráneas; etc.).

Acuíferos que muestran una progresiva degradación de la calidad del agua:

- Zonas con elevadas concentraciones de nitratos.
- Zonas con valores medioambientales deteriorados o en peligro de desaparición.
- Zonas con problemas de intrusión salina continental o marina (acuíferos costeros).

Acuíferos en zonas donde la disponibilidad de aguas superficiales muestra una marcada variación estacional:

- Disponibilidad de agua superficial excedentaria durante algunos meses del año.
- Zonas donde se puede combinar la recarga artificial de acuíferos con el manejo de excedentes (control de avenidas, etc.).

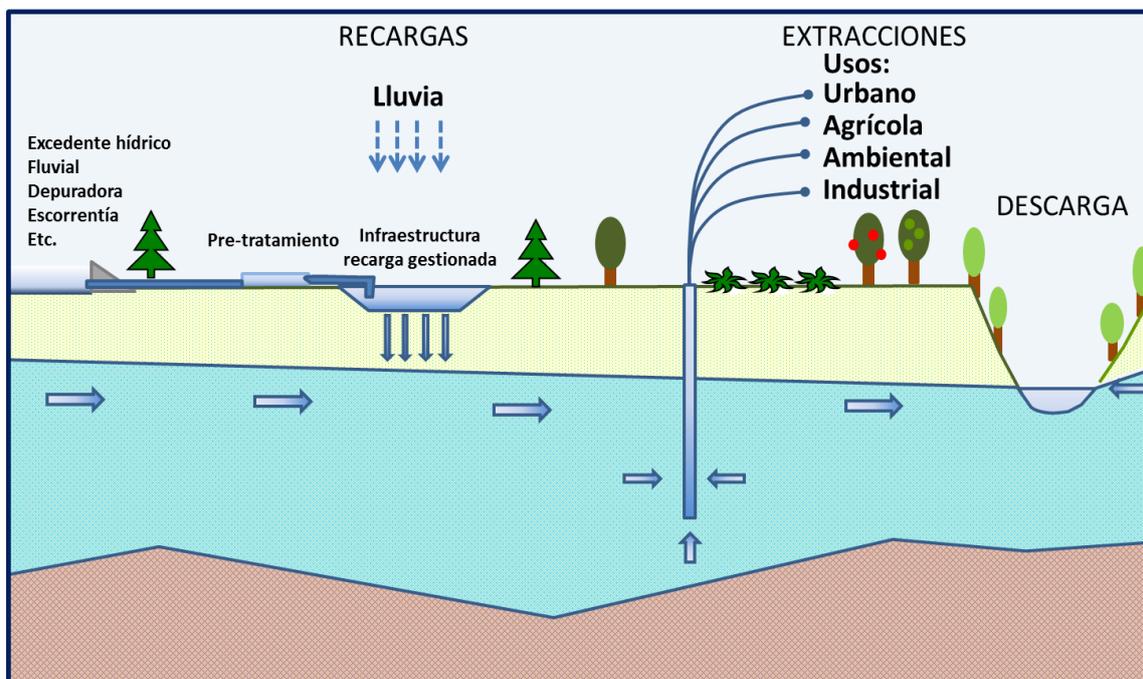


Figura 2. Algunos de los usos más habituales de los recursos hídricos almacenados mediante técnicas de recarga gestionada.

Consideraciones económicas.

De todos los puntos de vista posibles para fomentar la técnica MAR e integrarla en esquemas conjuntos con obras hidráulicas “duras”, el más relevante es el económico. En un primer estudio (las referencias bibliográficas específicas son escasas), que concluyó que el agua procedente de la gestión de la recarga de acuíferos (MAR) tiene unos costes en torno a un 30% por debajo del coste medio del agua desalada, y en torno al 50% de la embalsada en presas y balsas (DINA-MAR, 2011; a partir de datos numéricos de obras de Tragsa distribuidas por todo el territorio nacional). Esto es debido a que los dispositivos de recarga son mucho menos costosos que las grandes obras hidráulicas de almacenamiento superficial. Además, en ciertas

ocasiones, incrementan el volumen almacenado bajo tierra en zonas en las que no es viable aplicar otras técnicas de gestión hídrica que garanticen el suministro.

Calidad del agua a recargar.

A nivel nacional no existe una reglamentación para la calidad del agua de recarga, excepto para el caso en el que esta proceda de plantas de tratamiento de aguas residuales (aguas depuradas o regeneradas). El RD 1620/2007 establece valores máximos admisibles según el uso del agua previsto.

Cuadro 1. Valor máximo admisible (VMA) de los parámetros regulados en la legislación vigente para la recarga del acuífero por percolación y por inyección.

USO DEL AGUA PREVISTO	VALOR MÁXIMO ADMISIBLE (VMA)				
	NEMATODOS INTESTINALES	ESCHERICHIA COLI	SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	TURBIDEZ	OTROS CRITERIOS
5.- USOS AMBIENTALES					
CALIDAD 5.1 a) Recarga de acuíferos por percolación localizada a través del terreno.	No se fija límite	1.000 UFC/100 mL	35 mg/L	No se fija límite	NT ¹ : 10 mg N/L NO ₃ : 25 mg NO ₃ /L Art. 257 a 259 del RD 849/1986
CALIDAD 5.2 a) Recarga de acuíferos por inyección directa.	1 huevo/10 L	0 UFC/100 mL	10 mg/L	2 UNT	
CALIDAD 5.3 a) Riego de bosques, zonas verdes y de otro tipo no accesibles al público. b) Silvicultura.	No se fija límite	No se fija límite	35 mg/L	No se fija límite	OTROS CONTAMINANTES contenidos en la autorización de vertido aguas residuales: se deberá limitar la entrada de estos contaminantes al medio ambiente. En el caso de que se trate de sustancias peligrosas deberá asegurarse el respeto de las NCAs.
CALIDAD 5.4 a) Otros usos ambientales (mantenimiento de humedales, caudales mínimos y similares).	La calidad mínima requerida se estudiará caso por caso				

¹ Nitrógeno Total.

Fuente: BOE: RD 1620/2007.

Los parámetros exigidos son escasos pero altamente restrictivos, siendo una de las legislaciones más exigentes del mundo.

En el contexto internacional, se ha recopilado y comparado la legislación específica de 17 estados que han regulado los estándares de calidad (Fernández-Escalante et al., 2020 [4]).

El resto de los países se rigen por la norma de la OMS; y en cualquier actuación en el extranjero, cada promotor se debe asegurar de que los efluentes de las depuradoras cumplen los requisitos de calidad de la OMS 2003 (=WHO) [5].

Cuadro 2. Propuesta de los requerimientos del agua regenerada para la recarga artificial (OMS, 2003). DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno. NTU: Unidades nefelométricas de turbidez. COT: Carbono Orgánico Total. RWC: porcentaje de agua regenerada en los pozos de extracción.

Tipo de recarga		
Tipo de contaminante	Infiltración superficial	Inyección subsuperficial

Microorganismos patógenos Tratamiento secundario	≤ 30	
Filtración	≤ 2 NTU	
Desinfección	Inactivación de virus 4-log ≤ 2% coliformes totales	
Tiempo de retención en el subsuelo	6 meses	12 meses
Separación horizontal	153 m	610 m
Contaminantes regulados	Los de la Ley de potables	
Contaminantes no regulados		
Tratamiento secundario	DBO < 30 mg/L; COT < 16 mg/L	
Ósmosis inversa	Considera 4 opciones Profundidad hasta el agua subterránea a tasas de percolación: <0,2 pulgadas/min a 10 pies < 0,3 pulgadas/min a 20 pies	
Extensión superficial con extracción del 50% del TOC		
Opción de monitoreo del límite superior	Demostrar viabilidad en límite superior	
Porcentaje de agua regenerada	≤ 50%	

Fuente: OMS, 2003.

Actualmente está previsto que la OMS actualice esta tabla. Según consta en su página web http://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/es/, entre sus documentos en preparación se incluye uno que tiene por título: “Aspectos de salud derivados de la recarga de acuíferos con agua regenerada”.

5. METODOLOGÍA

El presente artículo tiene carácter divulgativo y pretende recopilar el estado del arte actual. De este modo, la metodología se apoya en numerosas consultas en Internet y búsquedas con palabras clave en los distintos planes hidrológicos de cuenca publicados por las correspondientes confederaciones hidrográficas.

Se han revisado los planes de segunda y tercera etapa de planificación y realizado un análisis léxico-gráfico basado en las menciones a la técnica MAR (en general empleando la antigua notación “recarga artificial”). Algunas presentaciones específicas arrojan bastante luz al respecto, tales como la presentación de Martínez-Cortina, 2017 [6]

De modo adicional los autores han creado varias alertas con palabras clave en *Google Alerts*, con seguimiento y comprobación de todos los resultados. De este modo han sido detectadas novedades sincrónicas con la redacción de este artículo, tales como la implementación (escasamente anunciada en su Plan Hidrológico de Cuenca) de actividades MAR mediante un convenio por parte de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir de 4 de septiembre de 2020 [7].

6. RESULTADOS

6.1. Contexto nacional

El volumen máximo de agua que podría ser recargada en España es muy alto en comparación a otros países, gracias a las grandes cuencas sedimentarias que constituyen excelentes acuíferos. La figura siguiente muestra la ubicación y la tipología de los 33 dispositivos de recarga gestionada, bien fueran experimentales o permanentes, que se han llevado a cabo en España (conforme al inventario realizado por el Grupo en 2009, publicado en DINA-MAR, 2010).

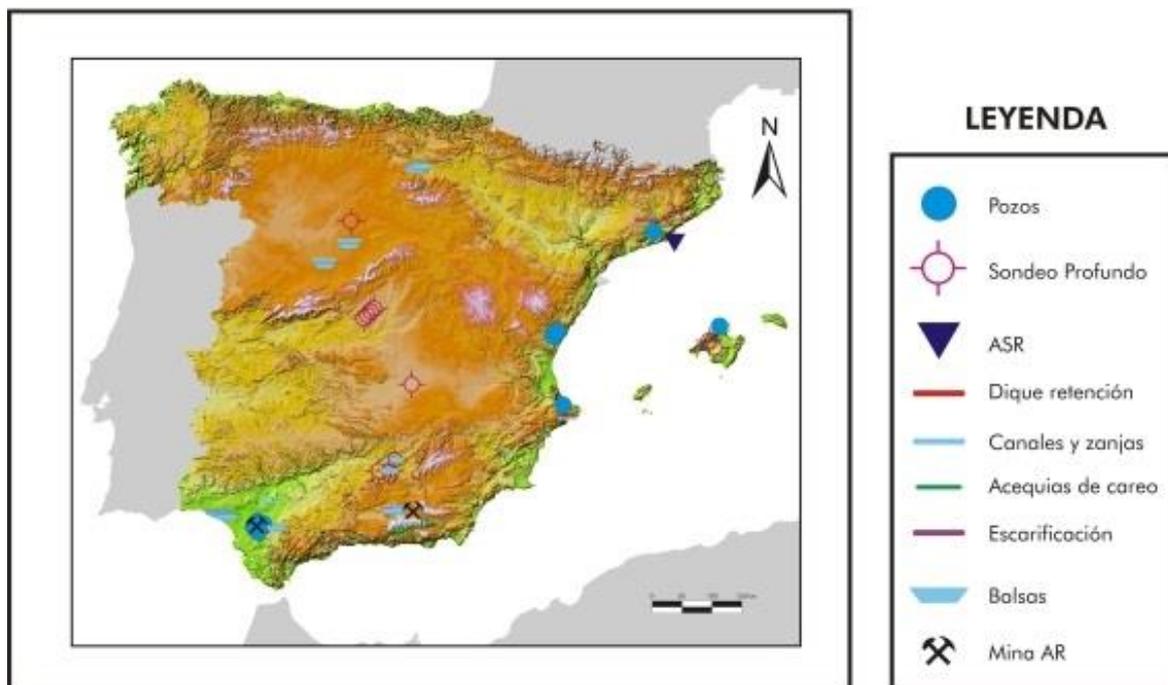


Figura 3. Inventario de dispositivos de recarga gestionada a nivel nacional (DINA-MAR, 2011).

Conforme a los estudios y resultados de DINA-MAR, 2011, un 17% del territorio español peninsular (casi 67.000 km²) son susceptibles a la aplicación de la técnica MAR, según se ha deducido mediante GIS avanzado y operaciones de álgebra de mapas durante un estudio de I+D+i que tuvo dos años de duración. Estos resultados pueden ser consultados en el visor cartográfico explicado con detalle en la referencia del Grupo Tragsa www.mdpi.com/2073-4441/6/7/2021/pdf [8] (en inglés) y en el Boletín Geológico y Minero [9] http://www.igme.es/boletin/2014/125_3/9_%20Articulo%206.pdf (en español). Todo un ejemplo de Sistema de Soporte a la toma de Decisiones (DSS) y, en ciertos casos, de Colaboración Público-Privada (PPP).

Según la referencia mencionada, la cuenca hidrográfica más proclive a desarrollar esta tecnología es la del Duero, seguida de Baleares y Tajo. Esto se debe, en general, a la cantidad y calidad de las fuentes de toma, ya que varios de sus cauces fluviales permiten la detración de un cierto volumen de su caudal fluyente en época de lluvias para su almacenamiento subterráneo. Estos esquemas son de carácter temporal, estacional o intermitente, al depender de los ríos. La única opción de recarga permanente (24/7) es con aguas depuradas procedentes de plantas de tratamiento que alcanzan la calidad requerida (tratamiento terciario o secundario avanzado con post-tratamiento).

Las expectativas de creación de nuevas infraestructuras y prototipos para recargar acuíferos están contempladas en varios planes hidrológicos de cuenca. Por ejemplo, la última versión del Plan hidrológico de la cuenca del Ebro anuncia la implementación de un total de 25 dispositivos complementarios al esquema actual de gestión. Otros planes hidrológicos de cuenca tienen muy presente la reutilización y la “técnica MAR”, tales como el Plan Hidrológico de las Islas Baleares (PHIB), que menciona la conveniencia de este tipo de dispositivos, así como el del Guadalquivir, Duero, etc. De hecho, el Plan Hidrológico de la Cuenca del Duero (segunda etapa de Planificación) es, de nuevo, altamente receptivo a la implementación de sistemas MAR, con importantes novedades de implementación publicadas recientemente en el PH Guadalquivir (apartado siguiente).

6.2. Previsiones de implementación de dispositivos MAR en España a corto plazo

Se han consultado once Planes Hidrológicos de Cuenca (tercera etapa de planificación) en los que se ha encontrado un compromiso de acciones futuras en tecnología MAR en el ámbito nacional, que son los del Ebro, Cataluña, Duero, Guadalquivir, Cuencas mediterráneas andaluzas, Júcar, Islas Baleares, Tajo, Guadiana y Melilla. Los resultados se exponen a continuación:

El nuevo Plan Hidrológico de la Confederación Hidrográfica del Ebro, que contempla la ejecución de 25 estudios y obras recarga artificial en el ámbito de su Cuenca y en sectores en los que ya ha sido estudiada su viabilidad. Los sectores o acuíferos “objetivo” quedan presentados en la figura siguiente. Entre las acciones más inmediatas anuncia la Recarga artificial de la Masa de Agua Subterránea (MASb) del Campo de Cariñena (CHE; 0,8 M€), sin especificar la anualidad y un estudio de posibilidades de recarga artificial en la cuenca del Ebro (Aluvial del Ebro: Zaragoza, calizas de Tárrega, pliocuaternarios de Alfamén, campo de Belchite para después de 2021 por 0,03 M€).

El Plan Hidrológico del Distrito Cuenca Fluvial Cataluña en su Programa de Medidas (PdM) 2016-2021 anuncia medidas de aumento de la recarga en las MASb de la Cubeta de Sant Andreu y del Delta del Llobregat. Especifica además varios proyectos tales como el de conexión con el canal de la derecha, captación fuente de suministro del río Llobregat hasta la balsa de recarga de Sant Vicenç dels Horts; el proyecto ejecutivo de acondicionamiento y puesta en marcha de las balsas de recarga de Sant Vicenç dels Horts y Ribes (Baix Llobregat); la retirada de la capa orgánica de la balsa de infiltración de Sant Vicenç dels Horts [ACA; entre las tres: 0,72 M€] y acciones en las balsas de Santa Coloma de Cervelló [ACA; 8 M€].

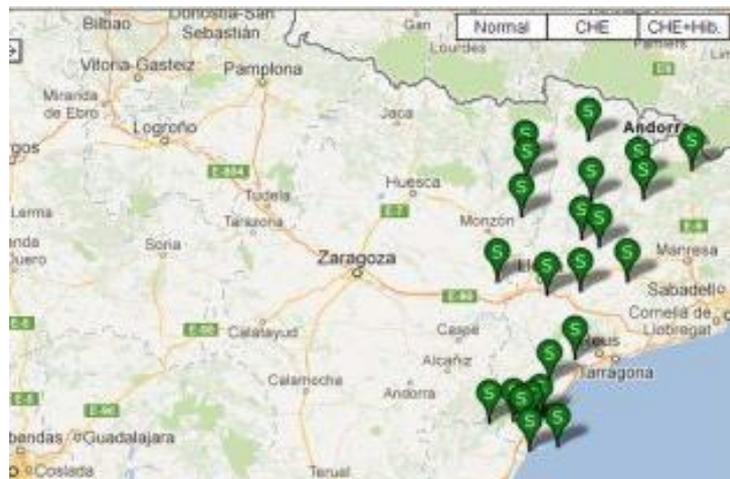


Figura 4. Futuras acciones de recarga artificial que serán implementadas por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y del Distrito Cuenca Fluvial Cataluña (tomado de PHC, 2015).

El Plan Hidrológico del Duero es uno de los que presentan mayor sensibilidad ante esta técnica, y más allá de considerarla un vertido, establece Directrices para la recarga artificial en su Programa de Medidas, Anejo 12, pág. 50 y en el Art. 35.4 de su Normativa. Describe además las tres instalaciones operativas en la MASb de Los Arenales y anuncia la intención de ampliación de la recarga artificial de El Carracillo por la Junta de Castilla y León, 2016-2021.

El Plan hidrológico de la cuenca del Guadalquivir, en segunda etapa de planificación (2015-2021), página 50, indica las finalidades principales y anuncia acciones futuras: “Después de analizar las posibles alternativas de recarga en las masas y aplicando el juicio experto al conjunto de propuestas, se llegó a la conclusión de plantear actuaciones de recarga en 17 MASb que componen el Catalogo de Actuaciones de Recarga de la Demarcación”. Con mayor inmediatez anuncia en su Programa de Medidas (PdM) acciones en los sistemas de recarga artificial del acuífero de la Vega de Granada (pg. 43) sin determinar Administración responsable, por 10 M€. El 4 de septiembre de 2020 ha sido publicado el convenio de colaboración que se detalla en el apartado siguiente.

El PH de las cuencas mediterráneas andaluzas establece en su artículo 26 de la Normativa del Plan las Directrices para la recarga artificial de acuíferos, mencionando una actuación en funcionamiento en MASb de Marbella-Estepona y anuncia en su programa de medidas la Recarga artificial del Campo de Dalías (2ª fase), a ejecutar por la Administración Central por 10 M€ (uno a 2021 más nueve a 2027).

El Plan hidrológico de la Cuenca del Júcar menciona una actuación reciente en el acuífero de La Rambleta (MASb Plana de Castellón) con capacidad para almacenar 1,5 hm³/año y denuncia cinco MASb con presión significativa “por embalses con recarga por infiltración hacia los acuíferos”. En su Programa de Medidas contempla la reposición de la acequia mayor de Sagunto afectada por la construcción de la presa de Algar; actuaciones para hacer efectiva la recarga en la MASb del Medio Palancia (DGA; 2018; 0,54 M€) (pg. 46) y el estudio de posibles recargas artificiales a partir de distintas fuentes de recursos (CHJ; 2019-2023 por 0,054 M€) (pg. 71).

El Plan Hidrológico de las Islas Baleares declaró las actuaciones de recarga artificial de interés general en el RDL 8/1993. Considera este tipo de acciones en los Artículos 70 a 72 de la Normativa del Plan. En el Plan anterior ya contemplaba la recarga artificial acuífero S'Estremera (ya en funcionamiento, con una media de 3,3 hm³/año), y el proyecto de recarga del acuífero de Crestatx. En su PdM (anexo 8) anuncia además acciones inminentes para el estudio de viabilidad de la recarga artificial en Sencelles (0,02 M€); otro Estudio piloto de almacenamiento y recuperación (0,06 M€ entre 2015-21 y 2021-27) y proyectos piloto de recarga artificial por 0,95 M€ en el periodo 2021-27 (pg. 38).

08M0447	Actuaciones necesarias en la presa del Algar para hacer efectiva la recarga en la masa de agua subterránea del Medio Palancia	
Administración:	Administración General del Estado	
Organismo:	D.G. del Agua	
Tipología:	07. Otras medidas: medidas ligadas a impactos	
Carácter:	Otras medidas básicas	
Año Inicio:	2016	Inversión Total (€): 538.116,50
Año Fin:	2021	Inversión 2016-2021 (€): 538.116,50
Interés General:	SI	CAE (€ / año): 50.879,02



Figura 5. PHJ, pg. 483. Actuaciones necesarias en la presa del Algar para hacer efectiva la recarga en la masa de agua subterránea del Medio Palancia (PHJ, 2018).

El Plan hidrológico de la Cuenca del Tajo cuantifica dos presiones sobre MASb por recarga artificial y menciona en su Programa de Medidas, entre las actuaciones en aguas subterráneas del CYII para abastecimiento, el “Plan de Recarga” (Comunidad de Madrid; sin especificar inversión).

El Plan Hidrológico del Guadiana incluye dos estudios de recarga artificial en el Alto Guadiana (Apéndice 3 del Anejo 11-Programa de Medidas). Menciona además un análisis de alternativas para la captación (OPH) y la elaboración de un informe relativo a propuestas sobre posibles actuaciones en su cuenca (encomendado al IGME). Se mencionan además actuaciones ocasionales aguas abajo de Argamasilla de Alba.

El Plan Hidrológico de Melilla en su PdM anuncia el estudio de la posibilidad de realizar operaciones de recarga artificial de acuíferos con recursos procedentes de episodios esporádicos lluviosos intensos y/o de aguas residuales con depuración terciaria (CHG; 30.000 €).

La totalidad de los PHC puede ser consultada en:

<https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/planificacion-hidrologica/planes-cuenca/default.aspx>

Convenio CH Guadalquivir-IGME

El Convenio entre la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y el Instituto Geológico y Minero de España para la mejora del conocimiento hidrogeológico en el marco de la planificación hidrológica (2020-2024) [9]. Dicho convenio contempla acciones de “recarga artificial” *como una alternativa para atender la demanda de agua. A este respecto deben contemplarse, antes de considerar cualquier hipótesis de recarga artificial, aspectos tales como el análisis de demandas y usos actuales y futuros, el de los elementos de regulación actual y futura, tanto de índole superficial como subterránea, así como la evaluación de las hipótesis de gestión enfocadas al aumento de la regulación, al incremento de la garantía, o a ambas conjuntamente.* Las actividades previstas quedan descritas en los epígrafes 3 y 14:

3. *«Apoyo en la determinación de las áreas de recarga artificial de masas de agua subterránea del Alto Guadalquivir: objetivos de la recarga; procedencia, cuantía y calidad de los recursos aplicados».*

14. *Elaboración de medidas de actuación en base al tratamiento hidrogeológico de las masas de agua subterránea declaradas en riesgo. Corrección de sectores con sobreexplotación, propuesta de medidas de recarga artificial para mejora de la calidad, restitución de niveles y de caudales ambientales.*

La definición de estudios resulta insuficiente si no se implementan las construcciones oportunas más adelante, en caso de converger los requisitos previstos en la planificación hidrológica.

7. DISCUSIÓN

En los últimos años la aceptación de la tecnología MAR es palpable y creciente. La recarga gestionada (antes artificial) ha entrado en una buena parte de los planes hidrológicos de países de Centro y Suramérica, tales como México, Chile, Perú, Nicaragua, etc. [5] En estos países hay una creciente actividad e interés en esta técnica. En otros lugares del mundo también hay una fuerte demanda. Cabe citar, por ejemplo, la publicación de licitaciones internacionales muy recientes para actuaciones en países áridos tales como Túnez y Afganistán.

Esta creciente demanda y la aceptación del paradigma, escasamente cuestionado, de que esta tecnología constituye un mecanismo de adaptación al cambio climático, mediante el aprovechamiento de precipitaciones extremas, reduciendo la evaporación y eutrofización de volúmenes de agua almacenados ante la insolación y amortiguando el impacto de las sequías, ha llevado a grandes empresas constructoras a mostrar un mayor interés en la implementación de dispositivos MAR. Algunas claves del éxito técnico creciente de la tecnología MAR se presentan a continuación.

7.1. Medida de adaptación al cambio climático

Los efectos adversos del cambio climático dibujan un panorama desolador a medio-largo plazo en el arco mediterráneo. Dentro de las medidas de prevención y mitigación, numerosos países están analizando la posibilidad de contar con reservas de agua estratégicas para afrontar los

escenarios de escasez. Los sistemas de alarma y los Planes de sequía confirman el panorama venidero. En esta situación, resulta necesario implementar actuaciones preventivas y crear las infraestructuras necesarias para el almacenamiento de volúmenes importantes de agua, que permitan afrontar situaciones duraderas de escasez de agua y que reduzcan el efecto negativo de las sequías sobre la economía y el medio ambiente.

Entre todas las técnicas de gestión hídrica, tanto convencionales como alternativas, el almacenamiento intencionado de agua en los acuíferos, o recarga gestionada, se considera uno de los métodos más eficientes para luchar frontalmente contra los efectos del cambio climático. En este contexto, varios países, incluyendo aquellos en vías de desarrollo, están implementando técnicas de “cultivo de agua”, por lo general en la cabecera de las cuencas y asociadas a actividades de forestación, para la retención y preservación de la cubierta vegetal.

Los almacenamientos son naturales, requiriendo tan sólo su localización en el subsuelo. Los volúmenes almacenados quedan además protegidos de la evaporación, y su calidad preservada y alejada de focos contaminantes y de elementos susceptibles de malograr la calidad de las aguas, utilizando a los acuíferos como un medio receptor, y a su vez, con un sistema de depuración natural de las aguas. Esta metodología, aunque estructural, es considerada de bajo coste con respecto a las grandes obras hidráulicas.

Es precisamente en este contexto de medidas innovadoras y soluciones tecnológicas donde el concepto “cambio climático” ha adquirido un sentido contrario al pernicioso que suele acompañarle, y es que ha unido a técnicos y científicos con un objetivo común: diseñar e implementar medidas preventivas y mitigadoras del mismo y aunar esfuerzos ante esta amenaza común. El grado de conocimiento alcanzado no servirá de nada si no se ponen en marcha medidas efectivas y reales, en general estructurales, llevadas a cabo por empresas especializadas, sea cual sea la fuente de financiación.

La figura 6 sintetiza los principales efectos o macroimpactos de los efectos adversos del cambio climático, sus problemas aparejados y cómo la técnica MAR permite la reducción de la intensidad y escala de cada uno de los impactos mencionados. El desarrollo pormenorizado puede ser consultado en la bibliografía [10].



Figura 6. MAR como medida de adaptación al cambio climático (incluso mitigación). Manifestaciones principales, problemas asociados y cómo la recarga gestionada de acuíferos permite reducir el impacto de estos vectores. Tomado de Fernández-Escalante *et al.*, 2019 [10].

7.2. Diversificación de las fuentes de toma

Cualquier proyecto de recarga artificial requiere, de manera muy sintética, cuatro requisitos básicos, que son: contar con una fuente de agua con una cierta garantía, con un medio receptor para su almacenamiento, que el contexto legal permita la actividad y unos recursos económicos suficientes para su implementación.

De este modo, la diversificación de las fuentes de toma, es decir, la posibilidad de captar agua de diferentes orígenes en distintos periodos del año, incrementa la posibilidad de éxito técnico de cada sistema. Las fuentes de toma más habituales son:

Efluentes de depuradoras

Los efluentes de depuradoras debidamente purificados constituyen la única alternativa de suministro permanente para operaciones de recarga intencionada. Dependiendo de la fuente originaria del proceso de depuración, el efluente resultante puede tener calidades muy diversas, especialmente si hay presencia industrial. Es una práctica habitual su mezcla con aguas de otros orígenes previamente a su infiltración en el acuífero, aunque esta práctica no siempre es viable.

Por bueno que sea el proceso de depuración, las aguas resultantes suelen ser muy inestables iónicamente y suelen requerir un post-tratamiento. Este se lleva a cabo bien en la propia

planta depuradora; en la cabecera del dispositivo de recarga; o bien *in itinere*, es decir, el agua es sometida a tratamientos de manera simultánea a su flujo por las conducciones.

En general, la práctica de usar aditivos químicos como cloro, iodo o agua oxigenada es evitada en la mayoría de las experiencias, por la liberación de iones nocivos libres a los acuíferos y por los sinergismos que se generan en reacciones consecutivas.



Figura 7. Efluentes de una depuradora por lagunaje mezclado con aguas fluviales en un canal de recarga gestionada para alcanzar el estándar de calidad exigido.

Excedentes hídricos fluviales

La derivación del excedentes hídricos de origen fluvial salvaguardando un caudal ecológico constituye una de las alternativas más viables y recurrentes, sí bien, al tratarse de un método intermitente y temporal, la garantía de suministro es baja, y queda supeditada a la climatología. La sostenibilidad del sistema, por tanto, está amenazada por el cambio climático y la concurrencia de eventos climáticos extremos con frecuencia creciente.

Igualmente resulta importante estudiar los efectos ambientales, especialmente aquellos diferidos (producidos aguas debajo de la fuente de toma a una distancia indeterminada o de impactos inmediatos imprevisibles) y en el medio y largo plazos.

La dependencia exclusiva de excedentes fluviales para actuaciones de recarga gestionada, hoy por hoy, no garantiza su continuidad futura, de ahí la conveniencia de combinar este recurso con otros adicionales.



Figura 8. Balsa de decantación/infiltración en el acuífero de Los Arenales.

Escorrentía superficial

Se trata de otra fuente de suministro intermitente y temporal cuya calidad es muy dependiente de la zona de captación. La escorrentía de carreteras o de aeropuertos suele contar con importantes concentraciones de, por ejemplo, hidrocarburos; mientras que en zonas rurales la presencia de sólidos en suspensión suele ser bastante elevada. De este modo, se trata de una alternativa adicional a ser combinada con otras fuentes de toma.

Otros

Abarca las restantes fuentes de toma que en general corresponden a excedentes hídricos, bien de desaladoras, plantas de tratamiento de agua potable, retorno de regadío (que de manera habitual presentan una sobrecarga de nutrientes), y muy especialmente, los caudales excedentarios de avenidas o inundaciones, que en general requieren amplias zonas de almacenamiento temporal para ser decantados antes de proceder a su infiltración en el terreno.

7.3. Multifuncionalidad

Buena parte de las actuaciones de recarga gestionada se apoyan en la utilización de elementos pre-existentes y en una mentalidad recicladora, actitudes agrupadas con la etiqueta “multifuncionalidad”.

Carácter reciclador

El uso de elementos pre-existentes es una solución tecnológica de primer orden, que permite abaratar costes y reutilizar elementos cuya clausura podría representar un coste importante. Al mismo tiempo se puede cumplir una doble función de recarga y uso ambiental, al realizar una integración o restauración paisajística pasando de un hueco minero abandonado (en general areneros) y foco potencial de contaminación a un humedal infiltrante y biodepurador.

A pequeña escala, cabe mencionar la reutilización de pozos secos, habiendo acuñado el slogan *“do not close a well, reuse it”*. La incorporación de pozos abandonados al sistema de recarga, su relleno con grava y pequeñas adaptaciones han permitido su integración en el medio, el uso del terreno superficial que ocupaban y, a su vez, llevan a cabo una recarga inducida e invisible.

Aprovechamiento de infraestructuras pre-existentes

A mayor escala cabe mencionar la reutilización de elementos relacionados con la construcción y la actividad minera, tales como pozos secos, areneros, canteras, bocaminas, etc., cuya clausura puede resultar gravosa y su permanencia peligrosa al ser puntos de conexión directa con el acuífero. Su reutilización como balsas de infiltración abarata costes de movimiento de tierras, etc. y otorga a estos elementos un interés medioambiental.

Otros elementos han sido empleados en casos específicos, tales como el trazado de arroyos secos en la actualidad o viejos canales de conducción, que son reutilizados para la recarga intencionada del acuífero con garantía de que el agua fluye por gravedad sin necesidad de realizar estudios de micro topografía.



Figura 9. Hueco minero de dos areneros para la extracción de áridos rehabilitados y reutilizados como balsa de infiltración.

Diversidad de usos

A pesar de que la finalidad de estos dispositivos e infraestructuras es el almacenamiento adicional de agua en los acuíferos, en varias ocasiones con fines puramente estratégicos, las construcciones generadas permiten ampliar los usos del territorio asociado al desarrollo rural, e incluso han brindado opciones adicionales de uso público, uso recreativo, uso medioambiental, etc.

Por ejemplo, algunas de las balsas de infiltración construidas se han realizado en lugares relativamente secos, lo que resulta una atracción para los habitantes del lugar, que visitan estos cuerpos de agua. Esta curiosidad hidrogeológica también constituye una fuente de atracción de excursionistas, expertos, estudiantes, profesionales, etc.

7.4. Integración en el planeamiento y en la ordenación territorial

De todos los sistemas de recarga inventariados conforme a su tipología [2] extraídos en: <https://www.ismar10.net/wp-content/uploads/2020/09/D1-05-02-inventario-25-EN.pdf>, existen varios que son intercalados en el circuito de las aguas en su ciclo hidrológico natural, y que contribuyen de manera pasiva a la infiltración de las aguas en el acuífero. Algunos ejemplos son los diques de retención, habitualmente construidos en la cabecera de las cuencas y que en ocasiones son polivalentes. Por ejemplo, hay diques para la laminación de avenidas, que simultáneamente, provocan una infiltración adicional de agua en el acuífero por simple retención de la misma, siendo este el principal componente del volumen de recarga gestionada en España, conforme a estudios actualmente en ejecución en el marco del proyecto MARSOLut (<https://www.marsolut-itn.eu/>).

Otros elementos de interés son los humedales artificiales y las cuencas de almacenamiento temporal de aguas excedentarias. Estas cumplen una función doble, que es prolongar el tiempo de concentración para su utilización posterior y mejorar (por lo general) la calidad de las aguas originarias para el uso previsto, que es la recarga intencionada de los acuíferos.

En el ámbito urbano, existe un amplio abanico de posibilidades para retener, tratar e infiltrar el agua en el acuífero que subyace a muchas ciudades. Estos acuíferos reciben una infiltración muy inferior a la natural, debido al alto escurrimiento que provocan los pavimentos y las superficies impermeables (terreno “improductivo”).



Figura 10. Ejemplo de un humedal artificial en El Carracillo, acuífero de Los Arenales, Segovia.

Impactos

Con respecto a los impactos ambientales previsibles en cualquier actuación de recarga artificial de acuíferos, y ante la dificultad de identificar y evaluar los impactos diferidos y los que se puedan producir en el medio y largo plazo, se han desarrollado y publicado metodologías específicas para determinadas actuaciones.

Por ejemplo, cabe destacar el libro de impacto ambiental en zonas regables, el libro resultado del proyecto de I+D+i EARSAC, que cuenta con un capítulo específico para zonas regables con aguas regeneradas en depuradoras para las condiciones ambientales del arco mediterráneo.

8. CONCLUSIONES

La recarga gestionada de acuíferos (MAR) es una técnica de gestión hídrica de gran potencial muy poco utilizada en España. Hay un gran escepticismo sobre su valor y una escasa difusión hasta la fecha. Así mismo sigue estando escasamente considerada por los gestores hídricos del país. No obstante, su grado de implantación es creciente y las experiencias con continuidad están arrojando resultados positivos.

Las circunstancias socio-políticas, así como el marco legal que regula la actividad, son idóneas en el momento actual para incluir este tipo de dispositivos en los nuevos esquemas mejorados de gestión hídrica. Por otro lado, las circunstancias económicas se aproximan a las deseables, a pesar de ser dispositivos de bajo coste y que el ratio coste/beneficio disminuye a medida que prospera el estado de la técnica.

El análisis económico y la dimensión medioambiental de la técnica MAR refrendan su efectividad, su conveniencia y su buena adecuación a la realidad hídrica española del siglo XXI. Esta práctica no debe ser entendida como una herramienta para controlar el medio físico, sino como un instrumento para actuar contra el efecto de unas actividades mal planificadas en el pasado y para planificar otras más afines con el desarrollo sostenible del futuro.

Se trata de una medida estructural, quizás más “elegante” que la construcción de una presa o una balsa, pero ciertamente más ecológica, que permite un margen de maniobra muy superior (el terreno sobre el acuífero almacén puede ser empleado para distintos usos, como cultivos, al contrario que un pantano o balsa). También representa un ahorro de costes para rendimientos equivalentes a los de las grandes infraestructuras hidráulicas. Además es una tecnología contrastada, real, segura y viable. Hay también quien aboga por su alto “valor contingente”.

La técnica debe ser incorporada en esquemas de utilización conjunta complejos, ya que, por sí misma, difícilmente puede cubrir una fuerte garantía de suministro en períodos plurianuales.

En España hay grandes posibilidades de instalar nuevos dispositivos MAR y, afortunadamente, los tomadores de decisiones están dando un cierto grado de confianza a la tecnología, basándose en experiencias positivas ya realizadas. En el contexto actual, hay numerosos ejemplos demostrativos de restauración o regeneración de espacios de interés medioambiental mediante préstamos de volúmenes discretos procedentes de ríos. No obstante, estas actividades adolecen de garantizar su continuidad en el tiempo en caso de sequías prolongadas, cuyos efectos resultan agravados por la desertización, el cambio climático, la crisis económica y otros problemas globales. Hasta la fecha las implementaciones han sido escasas y positivas, y los hidrogestores españoles van mirando la técnica MAR como la alternativa seria, segura, viable, realista y económica que es, aunque a su vez, compleja.

La técnica se ha convertido en una manera de encarar "frontalmente" los efectos adversos del cambio climático y permitir el almacenamiento de agua como recurso estratégico para afrontar situaciones de escasez de agua y de sequía. Además permite detener y aprovechar una fracción de los caudales de concentración de las avenidas e inundaciones.

Aún con el riesgo de “objetivar” en exceso una tecnología tan valiosa, la gestión de la recarga puede ser considerada un sistema de gestión hídrica realista y complementario a los restantes esquemas de gestión integral, de probada aplicabilidad internacional y adecuado para las expectativas climáticas venideras conforme a la evolución de los indicadores de cambio climático. Cabe destacar algunos aspectos para reforzar estas afirmaciones:

- Multifuncional: Integración en planificación hidrológica y proyectos de riego, obras hidráulicas y depuración. Obras de ingeniería para dispositivos superficiales, sondeos, depuradoras, balsas, canales... Desarrollo de sinergias.
- Extensible: Mediterráneo, África Subsahariana y Sudamérica. Recientes convocatorias internacionales y licitaciones para Afganistán, Mongolia, Chile, Túnez, Argelia, etc.
- Legislable: Importancia de contribuir en la nueva directiva de reutilización, en el GT de modificación de la DMA (*Common Implementation Strategy* o CIS), en la próxima reforma de la ley de EIA y las revisiones de PPHH en la tercera etapa de planificación.

- Sólido: Criterios de peso sociales, técnicos, económicos y ambientales para fomentar una técnica sostenible con asociación directa a la lucha contra los efectos del cambio climático como mecanismo de adaptación.

Nota: parte del texto de este apartado coincide con la definición de la Wikipedia para “recarga artificial”, que reproducimos en derecho ya que fue redactado por los dos autores principales.



Figura 11. Captura de datos en un canal de recarga gestionada en El Carracillo, acuífero de Los Arenales, Segovia.

9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Fernández Escalante, E.; San Sebastián Sauto, J.; Calero Gil, R, y Ortega Labrandero, R. (2020) Innovación en la Planificación y Gestión del Agua. El Grupo Tragsa y la Recarga Gestionada de Acuíferos. Tragsa, 2020. Depósito Legal: M-6683-2020. <https://bit.ly/3c2ztwN>
- [2] DINA-MAR. Fernández-Escalante, E. (coord.) (2011). Gestión de la recarga gestionada de acuíferos. Desarrollo Tecnológico. Serie Hidrogeología Hoy, n 6. Editor: Tragsa. <https://www.ismar10.net/wp-content/uploads/2020/09/dina-mar-2007-2011-libro-sp.pdf>
- [3] Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T. et al. (2019). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. Hydrogeol J. 27, 1–30 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>

- [4] Fernández-Escalante, E., Henao Casas, J. D., Vidal Medeiros, A. M. & San Sebastián Sauto, J. (2020). Regulations and guidelines on water quality requirements for Managed Aquifer Recharge. International comparison. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 9(2). DOI: <https://doi.org/10.7343/as-2020-462>.
- [5] OMS (=WHO) (2003). State of the art report health risks in aquifer recharge using reclaimed water. World Health Organization.
https://www.who.int/water_sanitation_health/wastewater/wsh0308chap5.pdf
- [6] La planificación hidrológica y nuevos planes de cuenca. D. Luis Martínez Cortina, Dirección General del Agua, (MAPAMA). Jornada técnica cátedra Rafael Dal-Ré 20 nov 2018, TRAGSA-UPM. En <https://blogs.upm.es/dalretragsa/documentos/>
- [7] Resolución de 4 de septiembre de 2020, del Instituto Geológico y Minero de España, O.A., M.P., por la que se publica el Convenio con la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, para la mejora del conocimiento hidrogeológico en el marco de la planificación hidrológica (2020-2024), en http://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/675387-r-instituto-geologico-y-minero-de-espana-4-sep-2020-convenio-con-la-confederacion.html
- [8] Fernández Escalante, E.; Calero Gil, R.; San Miguel Fraile, M.A. & Sánchez Serrano, F. (2014). Economic Assessment of Opportunities for Managed Aquifer Recharge Techniques in Spain Using an Advanced Geographic Information System (GIS). *Water* 2014, 6, 2021-2040; doi:10.3390/w6072021 www.mdpi.com/2073-4441/6/7/2021/pdf
- [9] Fernández Escalante, E.; San Miguel Fraile, M.A. & Sánchez Serrano, F. (2014). El hidrogeoportal DINA-MAR. Aplicación en soporte GIS para determinar zonas susceptibles de aplicar técnicas de recarga gestionada en España. *Boletín Geológico y Minero* 125 (3): 341-368. http://www.igme.es/boletin/2014/125_3/9_%20Articulo%206.pdf
- [10] Escalante, E.F.; Sauto, J.S.S.; Gil, R.C. (2019). Sites and Indicators of MAR as a successful tool to mitigate climate change effects in Spain. *Water* 2019, 11, 1943. <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/9/1943>
- [11]