

La recarga gestionada de los acuíferos como una técnica polivalente y efectiva de adaptación al cambio climático

Enrique Fernández Escalante (Tragsa-PTEA)¹

Jon San Sebastián Sauto (Tragsatec)²

Maria Villanueva Lago (Tragsatec)³

Rodrigo Calero Gil (Tragsa-PTEA)⁴

¹Doctor en Hidrogeología. Tragsa I+D+i. Maldonado 58. 28006. Madrid. efernan6@tragsa.es

²Doctor en Biología. Tragsatec. Julián Camarillo 6b. 28037. Madrid. jsss@tragsa.es

³Ingeniero Agrónomo. Tragsatec. Julián Camarillo 6b. 28037. Madrid. mwillan2@tragsa.es

⁴Ingeniero Agrónomo. Tragsa. Maldonado 58. 28006. Madrid. rcalero@tragsa.es

RESUMEN

La recarga gestionada de los acuíferos, también llamada artificial o simplemente, MAR por sus siglas en inglés, constituye uno de los grupos de medidas de gestión hídrica más exitosas para combatir frontalmente los efectos adversos del cambio climático. Esta afirmación no es gratuita, y en este artículo se justifica con ejemplos y casos de éxito de los cinco continentes que la técnica MAR, combinada con otras medidas de gestión integral de los recursos hídricos o IWRM tiene un alto potencial en la adaptación y mitigación del cambio climático.

Los principales problemas e impactos fruto del cambio climático estudiados son el aumento de la evaporación y evapotranspiración en las nuevas condiciones ambientales, una mayor demanda hídrica, mayor riesgo de incendio, reducción de la oferta hídrica y garantía de suministro en determinados lugares, extremismo en la escorrentía, afecciones a los humedales y menor producción de energía hidroeléctrica, con un efecto directo en el precio de la electricidad.

Las opciones relativas a cómo actúa la recarga artificial como medida de adaptación reduciendo los impactos identificados, sin pretensiones de ser estrictamente exhaustivos, se basan en las medidas siguientes: uso de los acuíferos como un almacén subterráneo; aumento de la humedad del suelo y ascenso del nivel freático, especialmente en acuíferos intensamente explotados; posibilidad de infiltrar aguas regeneradas para su posterior reutilización empleando el acuífero como sistema de depuración adicional (economía circular); almacenamiento de agua en márgenes de las riberas e incremento de la infiltración bajo zonas urbanizadas; distribución del agua subterránea a lo largo del acuífero por gravedad, sin necesidad de conducciones; infiltración de excedentes hídricos mediante mecanismos de detención y retención-infiltración y SUDS y creación de barreras hidráulicas positivas en zonas costeras contra la intrusión marina.

En definitiva se propone la gestión plurianual del agua y de las reservas subterráneas mejorada en contraposición a esquemas vigentes de gestión hídrica, carentes de celdas

de almacenamiento subterráneo y de retorno de agua a los acuíferos. Los casos de éxito expuestos permiten soportar la afirmación ya presentada en el propio título.

PALABRAS CLAVE:

Recarga artificial; acuíferos; Managed Aquifer Recharge; MAR; gestión hídrica; cambio climático; IWRM; adaptación; mitigación.

1 INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más consciente de los efectos del Cambio Climático la búsqueda de soluciones prácticas para mitigar sus consecuencias nocivas implica un cambio de mentalidad en la gestión de los recursos hídricos. Más allá de la sobreexplotación de los recursos es preciso plantear modelos capaces de convivir con los efectos ya visibles del CC, especialmente en países de climas áridos o mediterráneos, donde la escasez anual convive con la extrema pluviosidad puntual. Estos fenómenos ya conocidos son acentuados precisamente según los modelos de CC vigentes.

Las principales manifestaciones del cambio climático contempladas en este artículo en las cuales puede incidir la técnica MAR son: el aumento de la temperatura media, la variación en la concentración de las precipitaciones anuales, la mayor ocurrencia de fenómenos extremos y el aumento del nivel marino.

Los principales problemas e impactos fruto del cambio climático estudiados son el aumento de la evaporación y evapotranspiración en las nuevas condiciones ambientales, una mayor demanda hídrica, mayor riesgo de incendio, reducción de la oferta hídrica y garantía de suministro en determinados lugares, extremismo en la escorrentía, afecciones a los humedales y menor producción de energía hidroeléctrica, con un efecto directo en el precio de la electricidad.

La recarga gestionada de los acuíferos, también llamada artificial o simplemente, MAR por sus siglas en inglés, ha aportado un amplio abanico de soluciones tecnológicas para paliar los efectos negativos del CC desde el punto de vista de las aguas subterráneas pero también con una visión global de gestión integral e integradora de los recursos hídricos y de su medio asociado, siguiendo el enfoque de la Directiva Marco del Agua europea. Esta concepción ha logrado llevar a cabo distintas aplicaciones por todo el mundo donde se afrontan diferentes retos derivados del CC desde el almacenamiento de aguas de avenida a la impulsión contra la intrusión marina. En todos ellos se pueden obtener indicadores objetivos no solo de recarga exitosa sino también de efectos paliativos en el clima local.

Por ello, se presenta como uno de los grupos de medidas de gestión hídrica más exitosas para el combate frontal a los efectos adversos del cambio climático. Esta afirmación no es gratuita, y en este artículo se justifica que la técnica MAR, combinada con otras medidas de gestión integral de los recursos hídricos o IWRM, tiene un alto potencial en la adaptación y mitigación del cambio climático.

2 METODOLOGÍA

El objetivo principal de este artículo es exponer ejemplos y casos de éxito de los cinco continentes demostrativos de que la recarga artificial de los acuíferos (MAR) constituye una serie de técnicas efectivas de adaptación a los efectos adversos del cambio

climático.

El enfoque metodológico es el de binomio “problema-solución”. Para ello, se va a realizar una comparación entre los principales efectos del CC y las posibles medidas prácticas que la técnica MAR puede aportar para mitigar dichos efectos nocivos. En la tabla siguiente se indican en la primera columna los principales efectos del CC. A continuación, de forma relacionada, se listan los problemas impactos derivados y en la tercera columna las posibles medidas que la técnica MAR oferta.

Tabla 1: Relaciones entre los principales vectores en los que se manifiesta el cambio climático, los principales problemas e impactos afectados y elenco de soluciones tecnológicas relacionadas útiles como medidas paliativas un como medidas de adaptación.

EFFECTOS CC	PROBLEMAS CC	SOLUCIONES MAR
↑ TEMPERATURA MEDIA	↑ Evaporación	Almacén subterráneo
	↑ ETP	Humedad edáfica
	↑ Demanda hídrica	Infiltración regeneradas
	↑ Riesgo incendio	Infiltración puntual/dirigida
↓ PRECIPITACIONES ANUALES (esp. invernales)	↓ Oferta hídrica	Autodepuración/Reinfiltración
	↓ Escorrentía	Almacén fuera de ribera
	↓ Humedales	Restauración / regeneración
	↓ E hidroeléctrica	Distribución gravedad / ahorro E
↑ FENÓMENOS EXTREMOS	↑ Avenidas	Infiltración excedentes
	↑ Sequías	Gestión plurianual / Reservas
↑ NIVEL MARINO	↑ Intrusión salina	Barrera hidráulica positiva

En el siguiente apartado se pasa a ilustrar cada solución con ejemplos prácticos exitosos de distintos puntos de la geografía española e internacional. Con cada uno de ellos se presentan a su vez datos objetivos que destacan la capacidad de la técnica MAR para obviar las ventajas del mismo frente a otras técnicas similares.

3 RESULTADOS

A continuación se presentan distintos casos de éxito que soportan la afirmación expuesta en el apartado introductorio.

Los ejemplos expuestos se han agrupado conforme a los cuatro grandes grupos mostrados en la primera columna de la Tabla 11 :

1. Ejemplos de soluciones tecnológicas paliativas del aumento de la temperatura

- media (3.1).
2. Ejemplos de soluciones tecnológicas para los cambios en la distribución de la precipitación anual (3.2).
 3. Ejemplos de soluciones tecnológicas para la gestión de fenómenos extremos (3.3).
 4. Ejemplos de soluciones tecnológicas para paliar los efectos originados por el ascenso del nivel del mar (3.4).

Aunque se han recopilado principalmente casos españoles, en el resultado final se han incluido ejemplos significativos de los cinco continentes:

3.1 EJEMPLOS DE SOLUCIONES TECNOLÓGICAS PALIATIVAS DEL AUMENTO DE LA TEMPERATURA

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en su Quinto Informe de Evaluación (2014) afirman que la temperatura global se incrementará por encima de 1,5 °C en el siglo XXI en todos los escenarios considerados, y muy probablemente por encima de los 2 °C en los dos escenarios de mayores emisiones .

Entre los principales efectos de este aumento de temperatura destaca una mayor evaporación y evapotranspiración, lo que hace que la demanda hídrica vaya en aumento. Para contrarrestar este efecto, las técnicas MAR pueden ser clave mediante tres soluciones que se desarrollarán a continuación.

3.1.1 Almacén subterráneo (Abu Dabi (EAU))

El almacenamiento subterráneo resulta particularmente efectivo en aquellos acuíferos cuya explotación intensiva ha incrementado la profundidad del nivel freático medio. Se trata por tanto de un medio receptor especialmente naturalizado, ya que las actividades de recarga intencionada sencillamente tratan de revertir a un estadio cercano al pre operacional un impacto medioambiental acumulado: la explotación de aguas subterráneas de manera insostenible.

La mayoría de los sistemas de recarga gestionada constituyen de forma inherente a su definición un almacén subterráneo, donde puede ser almacenado un volumen de agua superior al retenido de manera natural. Estos almacenes pueden ser para uso interanual o para salvaguardar periodos de sequía.

Otros ejemplos de almacén subterráneo pero con fines estratégicos, son las desarrolladas por varios países que pretenden contar con un almacenamiento de agua puramente estratégico, para encarar situaciones de sequía prolongada. Gran parte de estos tienen aún una indefinición todavía importante, no obstante ciertos gobiernos consideran que unos almacenes de agua estratégicos, preservados de la evapotranspiración y garantizando la calidad del agua, son un recurso de gran valor para determinadas situaciones de escasez.

Un ejemplo emblemático de almacenar agua como reserva estratégica de agua dulce se localiza en **Abu Dabi (EAU)**. Desde 2005 (Figura 1) se llevan a cabo operaciones para la recarga de un acuífero profundo mediante sistemas ASR en **Abu Dabi**. En el desierto de Liwa, a 160 km de la línea costera, se ha desarrollado un sistema de almacenamiento de agua bajo las dunas del desierto que ha llegado a almacenar **11.350 m³** mediante **5 pozos de inyección** conectados a un **tanque de tormentas** que recolecta el agua de lluvia durante la época húmeda.

En 2010 y tras 5 años de ensayos, el gobierno de Abu Dabi aprobó la construcción a gran escala del sistema ASR, con un total de **300 pozos** conectados a tanques y cisternas de captación, proyecto terminado en diciembre de 2017, con una capacidad de inyección cercana a **26 hm³** (Dawoud, 2018). Este volumen sería suficiente para cubrir para la población servida una **situación de emergencia de 90 días**. El sistema, que requiere un alto consumo de energía eléctrica para su funcionamiento, empieza a contar con la instalación de **paneles solares** como fuente de energía principal para los grupos electrobomba.

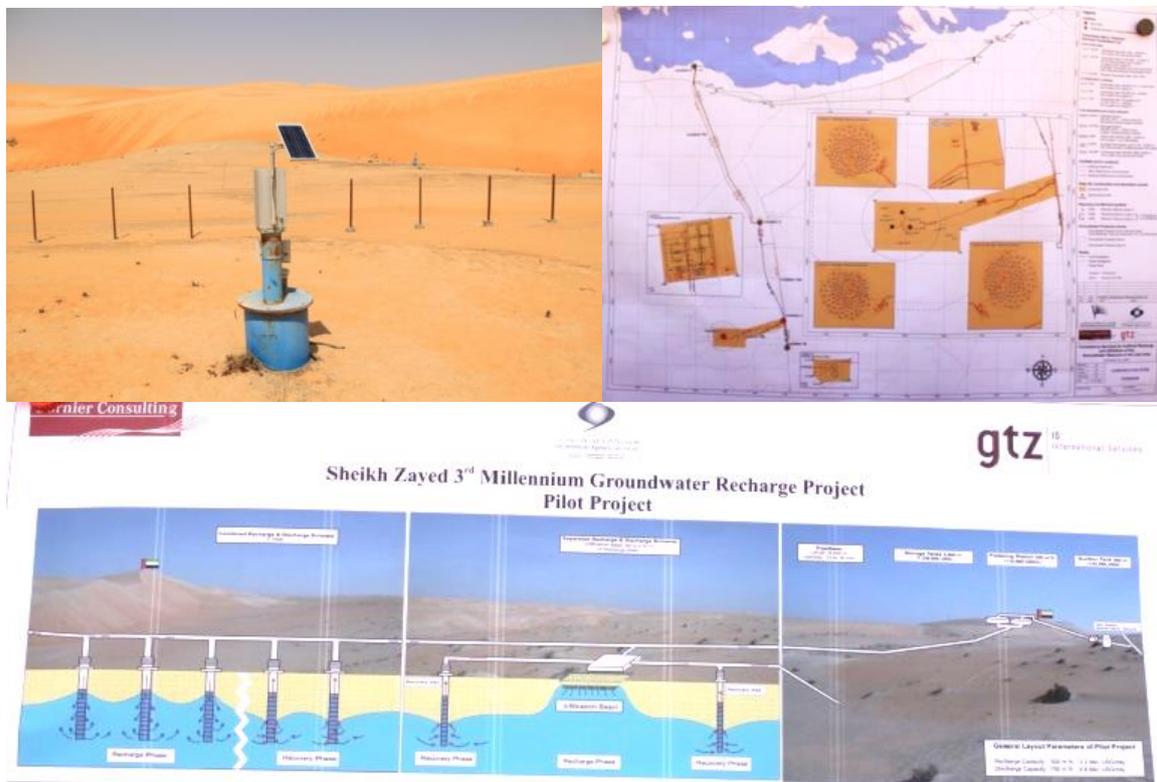


Figura 1: Sistemas ASR para la inyección profunda de agua en el acuífero como reserva estratégica para posibles situaciones de emergencia.

INDICADORES: Almacén subterráneo. Indicador: Volumen almacenado 26 hm³/anuales. Comparación: Evaporación máxima si se almacenara en balsas o presas con 34,6°C de media de t^{ra} máxima (2008-2018).

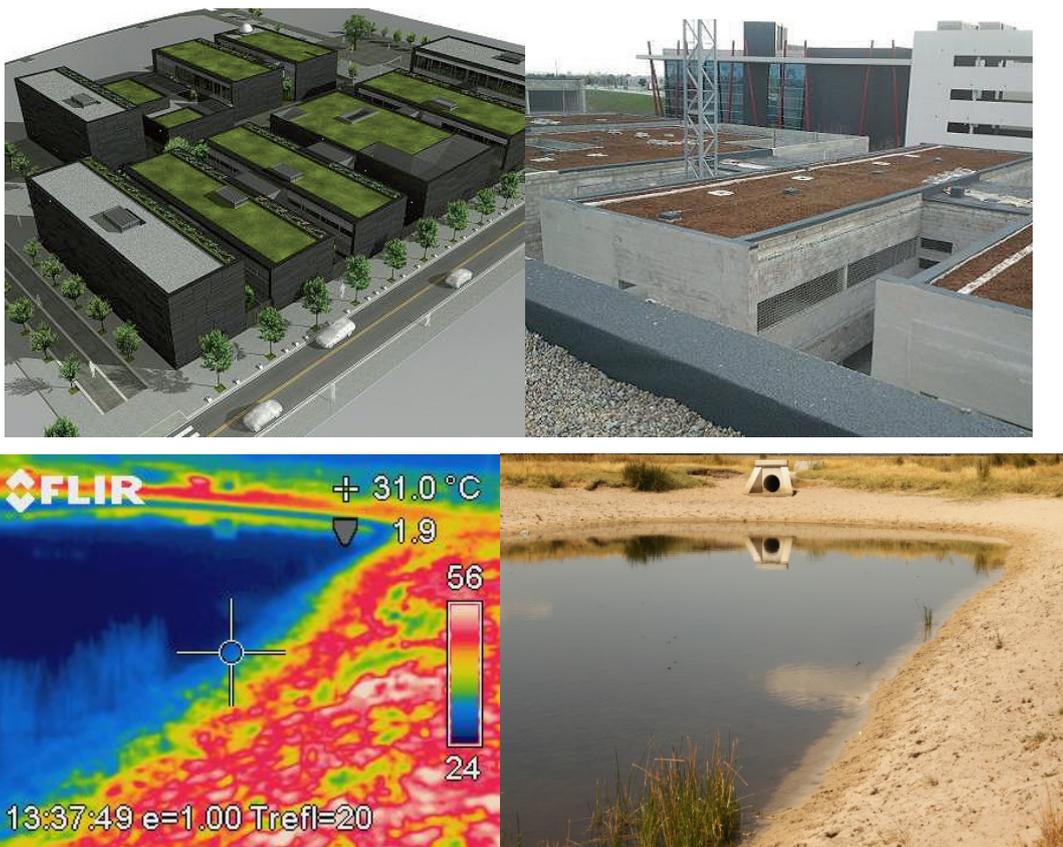
VENTAJAS: Algunas de las ventajas del almacenamiento de agua subterráneo, es el aumento de la residencia de las comunidades abastecidas desde estos cuerpos de agua; la restauración de acuíferos y cuencas con afecciones medioambientales de distinto grado; el aumento de la calidad ecosistémica de humedales y puntos de interés hidrodependientes degradados, tales como fuentes y manantiales secos, oasis, galerías filtrantes, etc. Si este almacenamiento se llevó a cabo con excedentes hídricos, se está convirtiendo una amenaza en un recurso, por lo tanto esta recarga intencionada puede formar parte de la solución, no del problema. En un país como Abu Dabi con una precipitación media de 75 mm anuales y 8,3 de promedio de días con precipitación al año (2008-2018), la evaporación en superficie es una merma excesiva (Climate.org,

2018).

INCONVENIENTES: No obstante, la derivación de caudales superficiales (no siempre precipitaciones) para la recarga puede representar una detracción de recursos cuyo uso previsto podría ser diferente. Resulta conveniente, por tanto, realizar evaluaciones de impacto comparativas, relacionando los escenarios resultantes del uso real versus el uso inicialmente proyectado.

3.1.2 Reducción de la temperatura (Palma de Mallorca (I. Balears))

Los sistemas urbanos de drenaje sostenible o SUDS son un grupo de elementos constructivos que forman parte de la arquitectura urbana, cuyos fines últimos son mejorar el drenaje en la ciudad, aumentar la tasa de infiltración en los acuíferos situados bajo las ciudades, cuya infiltración natural se ha visto reducida por las extensas superficies pavimentadas, y reducir el efecto “isla de calor” al intercalar celdas con almacenamiento de agua o con una humedad superior dentro del ecosistema urbano.



Figuras 2. SUDS para reducir el efecto “isla de calor” en las ciudades. Modelo y construcción del tejado verde del Parc Bit building, Palma de Mallorca, España.

Termografías comparativas del calor en un humedal artificial frente a una zona expuesta sin vegetación. Véase la paleta de colores entre 24 y 56°C con temperatura ambiente de 31°C.

Estos y sistemas arquitectónicos e hidrogeológicos constituyen una línea de acción de

vanguardia contra los efectos adversos del cambio climático en las zonas urbanizadas.

En Palma de Mallorca hay un emblemático ejemplo que es el Parc Bit, donde los tejados vegetados reducen la temperatura superficial de la edificación, contribuyendo a paliar el efecto isla de calor (Figuras 2). Las termografías permiten establecer indicadores contrastando en la paleta térmica los colores de las zonas vegetadas o humedales y de los edificios.

INDICADORES: Sup vegetada (ha) Vs T^a o humedad relativa.

Comparación entre áreas no vegetadas e impermeables en áreas urbanas (islas de calor) con zonas vegetadas o humedales urbanos en la ciudad usando paleta termográfica.

VENTAJAS: El abanico de posibilidades es muy amplio, y sus relaciones con la hidrogeología urbana pueden ser bastante complejas. El elenco existente abarca desde aparcamientos permeables, sistemas que recogen el agua del tejado y la infiltran directamente al acuífero, humedales urbanos, rotondas cóncavas verdes, etc. Un amplio catálogo de posibilidades puede ser consultado en la publicación GIAE, la gestión integral del agua de lluvia en entornos edificados, grupo Tragsa 2015.

INCONVENIENTES: Riesgo de contaminación accidental por recogida de aguas circulantes sobre superficie contaminadas urbanas. Riesgos por derrumbe de techados o filtraciones en infraestructuras por crecimiento vegetal o por exceso de caudal punta en fenómenos extraordinarios.

3.1.3 Humedad edáfica y ascenso del nivel freático (WOT (India) y Kitui (Kenia))

Dentro de los esquemas de gestión integrada de cuencas, las soluciones tecnológicas relacionadas con el almacenamiento extra de agua representan un capital social y una garantía para el medio ambiente. La conservación de la humedad edáfica se llevó a cabo mediante diferentes procedimientos, tales como la captura y almacenamiento del agua de lluvia en sitios propicios, tales como las zanjas siguiendo las curvas de nivel, llanuras de inundación, reservorios superficiales, humedales artificiales, diques o gaviones transversales a lo largo de las vaguadas, etc. En este contexto el mantenimiento de la humedad edáfica y la recarga de los acuíferos representa un punto de entrada crítico para la adecuada gestión integrada de cuencas.

Los dispositivos de parada construidos a lo largo de las cuencas de los ríos, especialmente en zonas de cabecera, constituyen un interesante sistema de infiltración al tiempo que incrementan la humedad edáfica del suelo en el entorno del aluvión.



Figura 3. Diques transversales para retener la escorrentía subterránea a través del subálveo de un cauce fluvial, como almacén para abastecimiento. La medida reduce además la temperatura del subsuelo del aluvión. Sand dam en Kenia (izda.) y dique de laminación y recarga en Alicante (dcha).

Las presas de arena (“sand dams”) son dispositivos transversales de 1 a 5 m de altura que retienen en su interior un volumen de arena con un contenido que varía entre el 25 y 40% de agua (Figura 3). En Kitui (Kenia) llegan al medio millar como un ejemplo exitoso multifuncional de infraestructura de recarga (Lasagne, 2008) pese a retener apenas un 1-3% de la precipitación (1 Dm³). La época seca dura 4 meses de Junio a Septiembre con prácticamente precipitación nula. Los dos picos de precipitación se concentran alrededor de Abril y Noviembre (weatherspark.com, 2018). El almacenamiento de agua no sólo cumple una valiosa función en un área donde las láminas de agua son vectores de malaria sino que la humectación del terreno crea un ambiente proclive a la agricultura y ganadería por la dispersión horizontal del agua de escorrentía (Hut et al 2008).

INDICADORES: Aumento % humedad edáfica (25-40%). Comparación: Riego en verano frente a recarga invernal: riego por aspersión (sólo en época de máxima ETP y máxima producción con mínimo efecto en suelo) o por gravedad (máximo lixiviado vertical con arrastre de agroquímicos).

VENTAJAS: La reducción de la temperatura en el suelo además permite el mantenimiento de una edaoflora y edaofauna en la parte superficial del terreno que mejora la fertilidad del suelo, especialmente en épocas de estiaje. El coste de la infraestructura es mínimo (3 a 100 veces menor) respecto a otros con durabilidad cercana a 50 años. La filtración lenta sirve de sistema de potabilización.

INCONVENIENTES: La elevada la humectación puede favorecer fenómenos de inundabilidad por lo que se debe llegar a un compromiso entre aumento del freático y mantenimiento de zona no saturada de filtro y absorción de caudales extraordinarios por precipitación directa o avenida. La elevada humectación junto a la excesiva reducción de la temperatura puede favorecer fenómenos de congelación dentro del horizonte superior del suelo en áreas situadas en latitudes altas o grandes altitudes. Esto puede resultar indeseable en ciertas épocas del año por lo que es preciso controlar el freático para que no permanezca demasiado superficial.

3.1.4 Infiltración de aguas regeneradas (Graz (Austria))

La recarga de acuíferos en Graz, la segunda población mayor de Austria con 290.000 habitantes lleva practicándose desde hace 30 años. La fuente fundamental de recarga ha sido un par de manantiales en la cuenca del río Mur para extraer 400 L/s (50.000 m³/día) con un coste de 0,2 €/m³ comparado con un precio del agua de 1,5 €/m³. (Kupfersberger, 2009)



Figura 4: Balsas de infiltración con aguas regeneradas de la depuradora de Graz, Austria.

En la EDAR de Granz (Austria) el volumen infiltrado de aguas regeneradas alcanza los 3.5 hm³ anuales mediante la infiltración por balsas (Figura 4) en Reclaim Water, 2007.

INDICADORES: Total de regeneradas (3,5 hm³/anual) usadas en la recarga del acuífero y porcentaje de caudal de regeneradas respecto a las necesidades de la población (19 % del agua de boca consumida al año).

VENTAJAS: Decreciente oferta de fuentes primarias (precipitación y avenidas en superficiales) frente a creciente oferta de fuentes secundarias (EDAR, EDAM, pluviales). Oportunidad de convertir un vertido (tasa de vertido) en un recurso (tasa de recuperación).

INCONVENIENTES: En la recarga de agua regeneradas los problemas a afrontar proceden de la diferente calidad del influente (recarga) respecto al de receptor (acuífero), fenómenos de colmatación en balsas de infiltración y restricciones de recarga (EIA) o de uso (limitación a usos menos restrictivos).

3.1.5 Infiltración puntual (CYII (Madrid))

Dentro de los sistemas de recarga artificial podemos distinguir tres grandes tipologías: los poligonales, los lineales y los puntuales. La infiltración puntual se lleva a cabo, por lo general, mediante pozos de inyección. Se trata de una metodología común en zonas con escasa disponibilidad de terreno, donde no se pueden desarrollar dispositivos de infiltración de alta ocupación superficial. Aprovechan, por tanto, dos características: baja ocupación de terreno y capacidad para absorber caudales punta elevados.

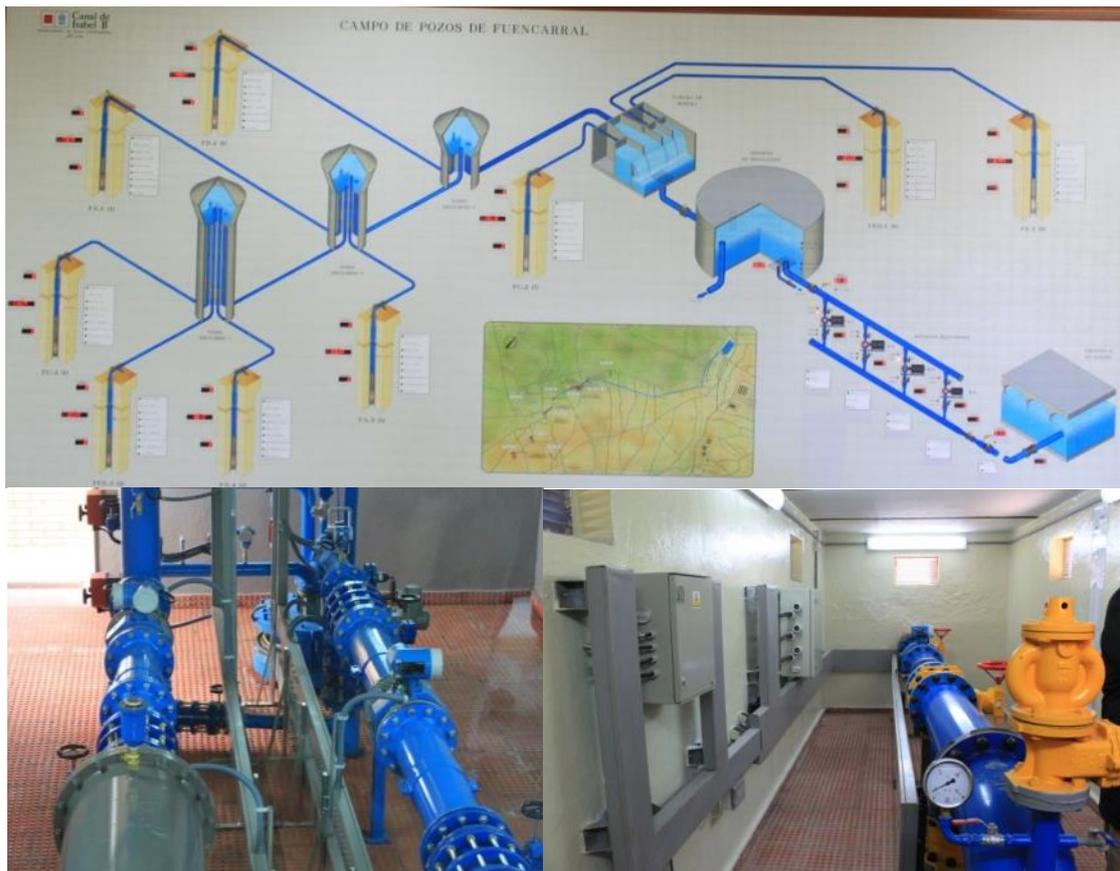


Figura 5. Sistema de recarga artificial mediante sondeos profundos (sup.) y empleo de electricidad para la inyección de agua en el acuífero terciario detrítico que Madrid mediante sondeos (inf. Izda. y dcha.).

Un sistema digno de mención, con soluciones tecnológicas y desarrollos de ingeniería muy avanzados son los pozos de inyección construidos por el canal de Isabel II en Madrid (Figura 5), para su inyección profunda en un acuífero semi confinado. Estas baterías de sondeos son empleadas en situaciones de sequía prolongada para el abastecimiento de la capital. El sistema constituye un almacenamiento que incrementa la garantía de suministro en la ciudad de Madrid en **5 hm³ al año**.

3.1.6 Infiltración dirigida (Canal del Guadiana (CLM))

Un ejemplo innovador de infiltración dirigida con los esquemas tradicionales es el uso de pozos artesianos para la recarga artificial, restauración de ecosistemas y protección de la biodiversidad mediante sistemas pasivos, es decir, utilizan la gravedad para desplazar al agua sin necesidad de bombeo y a coste energético cero.

Los usos pueden ser muy diversos, como es el caso del regadío y fines medioambientales en la batería de sondeos adyacente al canal del Guadiana, que fue desarrollada por la CHG en Castilla-La Mancha para el desarrollo rural, y para combatir la sobreexplotación de la masa subterránea antiguamente llamada acuífero 23 (DINAMAR, 2009).. Con este dispositivo (Figura 6) se llega a conseguir una recarga suplementaria de 48 hm³/año.

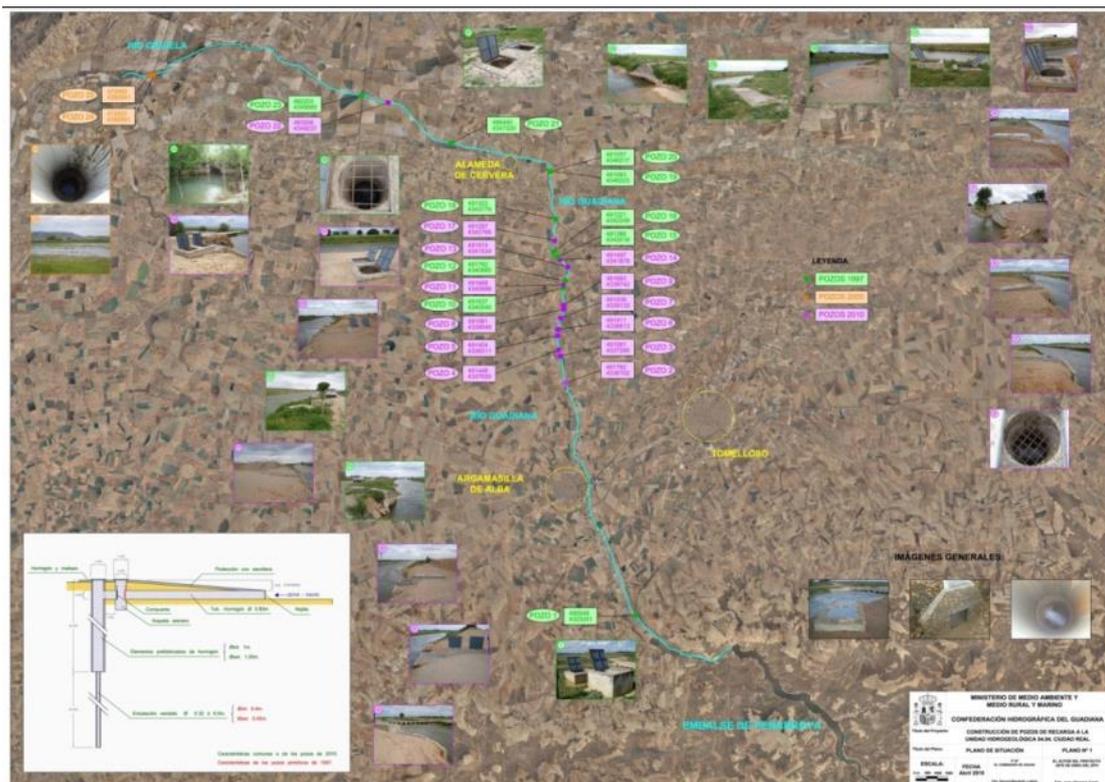


Figura 6. Sistema de recarga artificial mediante pozos adyacente al canal del Guadiana para regadío y usos medioambientales. Esquema General (DINAMAR, 2009).

INDICADORES: Infiltración de caudales y aumento de los recursos gestionados: 48 Hm³ anuales, en canal del Guadiana, CLM.

VENTAJAS: Alta capacidad para gestionar avenidas y caudales punta en espacios reducidos con la aplicación de medidas que eliminen la carga sólida. Capacidad para redirigir caudales a acuíferos profundos o confinados para evitar inundaciones por elevación del freático en acuíferos libres.

INCONVENIENTES: Los procesos de decantación pueden colapsarse y las avenidas han de ser previamente laminadas para poder ser inyectadas. El relleno forzado del freático puede reducir el espacio disponible en el subsuelo para absorber por filtración las precipitaciones extremas inesperadas.

3.2 EJEMPLOS DE SOLUCIONES TECNOLÓGICAS PARA LOS CAMBIOS EN LA DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

Los efectos del cambio climático observados durante varias décadas se han vinculado a cambios experimentados por el ciclo hidrológico en gran escala. Los cambios de la precipitación están sujetos a una variabilidad espacial y temporal considerable. Durante el siglo XX, la precipitación ha aumentado en mayor medida en extensiones terrestres y en latitudes septentrionales altas, y ha disminuido entre los 10°S y los 30°N a partir de los años 70 (Bates et al., 2008).

3.2.1 Autodepuración / Re-infiltración / reúso (Phoenix (EEUU))

El efecto sobre las aguas regeneradas que producen los canales dotados de biofiltros y los humedales artificiales (NBSs), según se ha observado analizando las calidades de las aguas en los canales de la cubeta de Santiuste o y en los humedales artificiales del Sanchón durante el desarrollo del proyecto MARSOL (MARSOL, 2016) es francamente positivo.

En el ámbito internacional cabe citar algunos ejemplos de humedales que estarían desecados y posiblemente su terreno habría sido cambiado de uso, y que gracias a algunas acciones de recarga intencionada gozan de una buena salud ecosistémica. Con ello se ha incrementado un 18% la recarga natural anual en los Tres Ríos, Phoenix (Arizona, EEUU) al mismo tiempo que se regeneran una serie de humedales (Figura 7) con una superficie de 283 ha que habían sido desecados en los últimos años (Infantino, Stockham and Stanisc, 2018) convirtiéndose en un reducto de para 150 especies de avifauna local típica del Sudeste Norteamericano.



Figura 7. Regeneración hídrica de un humedal mediante acciones de recarga artificial con pozos que alimentan su sustrato en las inmediaciones de Phoenix, Arizona.

INDICADORES: Incremento de recarga natural (18%) con una superficie de humedal de 283 ha que acoge 150 especies de aves.

VENTAJAS: Posibilidad de diseño según características de los parámetros de vertido conjugando profundidad o desarrollo de vegetación que permitan el desarrollo de fenómenos físicos, químicos y biológicos en función de calado, tipo de fondo, velocidad del flujo o entrada de luz. Características manejables también para acoger distintos tipos de hábitats.

INCONVENIENTES: La mezcla con aguas de calidad reducida puede incidir en la capacidad infiltradora del acuífero por colmatación de la zona no saturada o comprometer las posibilidades y autorizaciones de uso para la mezcla final. El desarrollo de cierta vegetación puede favorecer una infiltración mayor a través de las raíces o por el contrario impulsar la colmatación superficial por formación de biofilms bacterianos.

3.2.2 Almacén fuera de ribera (Ica (Perú))

Algunos sistemas de recarga artificial se encuentran adyacentes a cauces fluviales, y aprovechan las situaciones de abundancia de caudal para su derivación y almacenamiento los laterales del río. Existen ejemplos de utilización del banco del río como elemento purificador de la calidad del agua, para el abastecimiento de agua de

boca, para el regadío y para usos medioambientales. De hecho, este tipo de sistemas, conocidos como RBF o River Bank Filtration es la tipología de recarga gestionada más abundante en Europa. Este tipo de sistemas han sido empleados desde hace siglos en ciudades europeas tales como Berlín, Bucarest, Dusseldorf, Pisa, etc.

Otro tipo de sistemas de almacenamiento adyacente a los cauces fluviales, son las pozas de infiltración que se desarrollan abundantemente en Sudamérica.

Un ejemplo especialmente relevante, por ser al dispositivo de recarga artificial de mayor tamaño en el continente americano se encuentra en Ica, Perú. En esta zona, la junta de usuarios de aguas subterráneas del **Valle de Ica o JUASVI** detiene las aguas que bajan de los Andes a gran velocidad por el río Ica, las desvían a pozas o balsas de infiltración situadas en la ribera del río, donde son decantadas. Desde ahí, las aguas son conducidas a pozas de infiltración.

En la actualidad se emplean hasta **846 pozas** para la recarga artificial del acuífero. Estas aguas son empleadas para la actividad agroindustrial, y simultáneamente reducen el efecto de la sobreexplotación de las aguas subterráneas que afecta al acuífero de Ica.

La actividad, iniciada en el año 2012, ha ido arrojando resultados positivos, por lo que cada año se ha incrementado el número de pozas de infiltración y el área empleada para la recarga artificial del acuífero, según se resume en la Tabla 3:

Tabla 2: Histórico de la recarga artificial del acuífero de Ica (Perú)

AÑO	VOLUMENES ALMACENADOS	VOLUMENES INFILTRADOS	TASA DE INFILTRACIÓN	Nº DE POZAS	AREA (m ²)
2012	645,946	627,183	97%	41	22,368
2013	1,494,592	1,468,699	98%	89	36,952
2014	3,506,271	3,496,448	100%	125	59,263
2015	5,719,611	5,702,478	100%	192	70,171
2016	1,583,457	1,571,583	99%	659	342,845
2017	17,674,834	16,700,000	94%	846	2,955,539

Además del efecto positivo en el acuífero, las aguas que discurren por el río Ica durante la época lluviosa se concentran durante un periodo de tiempo relativamente corto, y por ello han producido con frecuencia desbordamientos, avenidas, corrimientos de tierra (huaycos), en definitiva, daños económicos. El hecho de desviar un cierto volumen del caudal punta, reduce el riesgo de provocar impactos ambientales negativos. En el hidrograma (figura 8) se ilustran las descargas que se producen en el río Ica a lo largo del año. En él se puede apreciar el potencial de inundabilidad durante la época lluviosa (febrero-marzo) y la conveniencia de reducir este volumen en cabecera, antes de que alcance el casco urbano de Ica.

Figura 8. Hidrograma de recarga al acuífero por cauce del río Ica (ANA, 2017).

En la figura 9 se aprecian las pozas construidas para el almacenamiento temporal en la ribera del río, y mejora cualitativa de estas aguas por simple decantación, y las pozas de recarga artificial que infiltran al acuífero las aguas de calidad mejorada.



Figura 9. Almacenamiento o en pozas de recarga en el lateral del río Ica, Perú (cortesía de Navarro, 2017).

El sistema permite además reducir las salidas de agua dulce al mar, permitiendo su aprovechamiento indirecto. El volumen promedio anual de descarga al mar del río Ica es de **31 Hm³** (ONERN 1971). En 2006, se descargaron 104 Hm³ al mar (ATDR-Ica). En 2008, se estima que 140 Hm³ se fueron al mar. En 2009 otros 100 Hm³ se fueron al mar (Bayer, 2009). Desde que empezaron las operaciones de recarga, en 2012 este volumen se ha reducido en torno **al 15%**.

INDICADORES: Almacén fuera de ribera (0,6 a 16 hm³) Infiltración de caudales de descarga desviados (94-100% de infiltración). Reducción de aportes directos al mar (15% en Perú).

VENTAJAS: Al contrario que las presas estos sistemas evitan la construcción de diques fijos que suponen barreras biológicas para fauna y flora y cambios morfológicos de importancia (profundidad, tipo de lecho, vegetación) que suponen riesgos de eutrofización o anoxia de las aguas almacenadas dentro del propio cauce.

INCONVENIENTES: Las extracciones deben ser evaluadas como cualquier otra detracción de caudal bajo criterios de EIA, evaluando efectos aguas abajo tanto en el propio cauce como en las aguas costeras y de transición. Se debe considerar tanto la disminución de agua como de sedimentos aguas abajo.

3.2.3 Restauración/regeneración de ecosistemas (Kumamoto (Japón))

Un caso bastante especial de pago por servicios ecosistémicos para la restauración de ecosistemas se lleva a cabo en Japón.

El pago por servicios ecosistémicos (PES) es un mecanismo de mercado enfocado a la conservación de los ecosistemas, por el que los gestores reciben un pago, bien sea de forma directa o indirecta, por un trabajo determinado, como puede ser la recarga intencionada de un acuífero con excedentes hídricos de los volúmenes destinados a cualquier otro uso. Un ejemplo emblemático se llevó a cabo en la localidad de Kumamoto, en la isla de Kyushu, Japón (Shivakoti et al., 2018). Se trata de una zona de geología volcánica con una demanda de agua creciente, donde se están ensayando distintos modelos de PES e incluso se ha elaborado una normativa que facilita y regula la implementación de distintos esquemas. Tanto los usuarios agrícolas como los encargados del suministro de agua a la ciudad han buscado un esquema *win-win* para garantizar la pervivencia de estos esquemas. La fuente de toma suele proceder de excedentes de la época lluviosa y drenaje de arrozales. Actualmente se alcanzan cifras de recarga del orden de 12 hm³, que representa un 13% del total de la demanda urbana

de la localidad de Kumamoto.

Los productos cultivados han conseguido ser catalogados con la etiqueta de “eco-producto”, lo que da un valor añadido a las frutas y verduras, consiguiendo un mayor coste en el mercado.

La actividad cuenta además con un importante soporte desde organismos públicos de investigación, en una labor de asesoría permanente a los agentes encargados de llevar a cabo la recarga al cambio de una compensación.

INDICADORES: Volumen recargado de 12 hm³ al año, un 13% del total de la demanda urbana.

VENTAJAS: La infiltración lenta en zonas donde se dispone de superficie suficiente para balsas de recarga permite el mantenimiento de humedales temporales que apenas suponen un sacrificio de una fracción importante del volumen recargable y que al mismo tiempo cumplen funciones ecosistémicas relevantes como refugio de fauna y flora silvestre o recreativos.

INCONVENIENTES: El establecimiento de láminas de agua libre puede limitar el uso de aguas regeneradas debido a posibles riesgos sanitarios.

3.2.4 -Distribución del agua por gravedad dentro del acuífero (Carracillo (CyL))

Un sistema “pasivo” de recarga artificial es aquel que no requiere de energía eléctrica para su funcionamiento. Generalmente funcionan por gravedad, y una vez conocido el comportamiento del acuífero, es posible infiltrar las aguas de recarga en una zona determinada, contando con que su comportamiento hidráulico llevará esas aguas de manera natural, pasiva, y en un tiempo de tránsito determinado, los recursos hídricos a las zonas donde serán reutilizados, simplemente por gravedad. Esta técnica permite ahorrar la de los trazados de tubería de distribución, con sus consecuentes beneficios medioambientales y ahorros de costes. Un ejemplo es la recarga artificial en la cabecera del Carracillo, con distribución de las aguas de recarga desde la zona almacén a lo largo de toda la zona regable, donde se encuentra diseminados la mayor parte de los pozos de la comarca. El volumen del agua de recarga en la zona de cabecera (Este) se dirige de manera natural a través del acuífero hasta la descarga en el río Pirón (Oeste), y puede ser interceptada durante todo el circuito por los pozos de riego, evitando así el tendido de tuberías.

El sistema de distribución por gravedad (Figura 10) llega a cubrir hasta 40,7 km de longitud entre canales y de tuberías desde la presa hasta la zona de descarga final sirviendo una superficie de 3.500 ha regadas dentro de 7.586 ha de superficie agraria.

El sistema representa un ahorro energético importante, adiccionario al ahorro que conlleva el bombeo de agua desde niveles freáticos más someros.

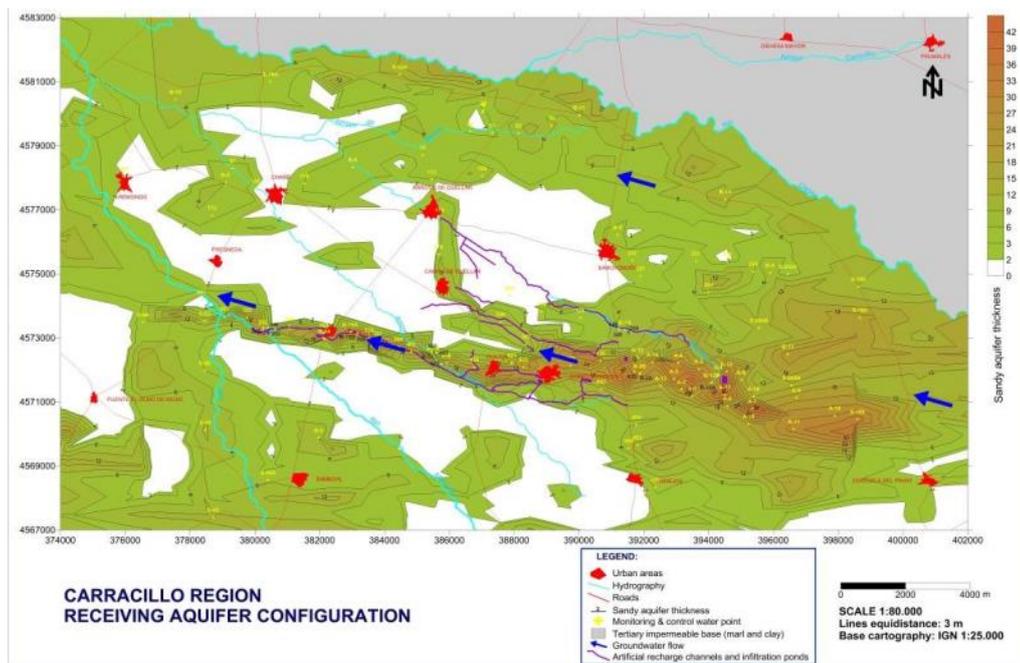


Figura 10. Cartografía con la configuración del acuífero del Carracillo y su funcionamiento. El Carracillo, Segovia, España.

INDICADORES: Longitud de transporte sin impulsión (40,7 km de tuberías y canales por gravedad). Área servida sin impulsión (3.500 ha regadas).

VENTAJAS: La transmisividad lateral del acuífero es la que puede junto al diseño adecuado aprovechando la geomorfología realizar una recarga que pueda ser lo más equitativa para todos los usuarios. La combinación con sistemas de detención o la conducción hacia puntos de especial permeabilidad son herramientas disponibles a la hora de establecer sistemas que aprovechen las características hidráulicas del terreno.

INCONVENIENTES: La hidrología en detalle y la geotecnia juega un papel fundamental a la hora de poder aprovechar el potencial distribuidor del acuífero. Los estudios precisos son fundamentales antes de poder diseñar sistemas que no solo recarguen, sino que además puedan realizar el transporte sólo por gravedad.

3.2.5 -Ahorro en el consumo de energía gracias a la recarga artificial (El Carracillo (Castilla y León))

El consumo de energía para el bombeo depende de varios factores, tales como la eficiencia energética del sistema, la presión dentro de la red de regadío, la demanda requerida, la frecuencia de bombeo para satisfacer volúmenes pico, y de manera especialmente importante la profundidad del agua que debe ser extraída (a más profundo, más caro).

Se da la circunstancia de que aproximadamente el 40% de los costes del regadío en el acuífero Los Arenales son costes energéticos, bien electricidad o combustible para los motores de explosión.

El seguimiento de los costes de bombeo para las 314 unidades en explotación inventariadas en El Carracillo, contando con un bombeo medio de 9,957 m³ por pozo y

año, y el ascenso del nivel freático medio desde una profundidad cercana a la 6,3 m hasta los 4 m después de varios ciclos de recarga artificial, representa un ascenso de +2.30 m (Figura 11).

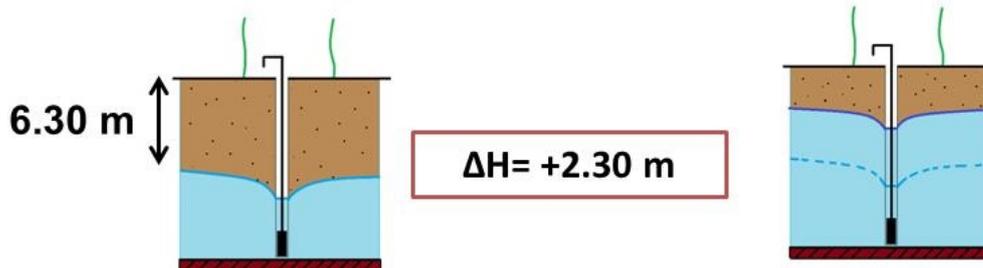


Figura 11. Incremento del nivel del agua debido operaciones de recarga artificial en el acuífero de El Carracillo, antes y después de las acciones de recarga gestionada.

La siguiente cuestión que se plantea es calcular cuánto representa un ascenso del nivel del agua de 2,30 m en términos energéticos. La equivalencia en kW-h equivale a un ahorro del 36% como media, y un ahorro total de 3.000 euros por año (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

	Before MAR	After MAR
Energy consumption (kW·h)	76,430	48,430
Energy cost (€/year)	8,180	5,180
Energy savings of 36%		

Figura 12. Cálculo del ahorro energético aparejado al bombeo de aguas subterráneas desde una cota más somera en El Carracillo, Los Arenales, Castilla y León (tomado de MARSOL, 2016).

Una vez hechos estos cálculos, mediante el empleo de una calculadora específica, se ha calculado el volumen de CO₂ emitido en ambos escenarios. El resultado es que, gracias a la recarga artificial, las emisiones anuales de este gas en el regadío del Carracillo se han reducido en 10.780 kg de CO₂ equivalente por el ascenso del nivel freático, sin incorporar las actividades de modernización, eficiencia energética y regadío con energía solar.

INDICADORES: Reducción de coste energético Indicador: % coste o kg CO₂ (36% de tarifa eléctrica o reducción de 10.780 kg de CO₂ con ascenso de 2,3 m por recarga). Comparación: Coste de bombeo sin recarga (3.000 €/año más de factura).

VENTAJAS: En este contexto se barajan nuevas líneas de acción para mejorar aún más la eficiencia energética, tales como el reemplazo de motores diésel por motores eléctricos, el uso de energías alternativas para cubrir los costes de bombeo, tales como paneles solares, energía eólica y un mayor empleo de biomasa.

INCONVENIENTES: La mejora de las condiciones económicas del consumo energético puede convertirse en un estímulo peligroso para el excesivo aumento de la demanda agraria por lo que es preciso establecer una ordenación de usos consuntivos en la cuenca.

3.3 EJEMPLOS DE SOLUCIONES TECNOLÓGICAS PARA LA GESTIÓN DE

FENÓMENOS EXTREMOS

Otro de los efectos relacionados con el cambio en el ciclo hidrológico, es la variación en la intensidad de las precipitaciones y sus valores extremos. En la mayoría de las áreas, la frecuencia de fenómenos de precipitación intensa (o la proporción total de lluvia descargada por lluvias intensas) ha aumentado, así como las crecidas en los ríos alimentados por glaciares o por el deshielo de nieve (Bates *et al.*, 2008).

3.3.1 -Infiltración de excedentes (Arnachos (Valencia))

Un ejemplo innovador de infiltración dirigida con los esquemas tradicionales es el uso de pozos artesianos para la recarga artificial, restauración de ecosistemas y protección de la biodiversidad mediante sistemas pasivos, es decir, utilizan la gravedad para desplazar al agua sin necesidad de bombeo y a coste energético cero.

Desde el año 1995 la Directriz Básica de Protección Civil ante el riesgo de inundaciones introduce los criterios de seguridad para prevenir y limitar los daños potenciales que se podrían ocasionar con este riesgo. En este contexto hay otro ejemplo digno de mención, que es el uso de un sondeo profundo “**Arnachos**” (Figura 13) con una alta capacidad de recarga (en torno a **1.000 l/s**) que se encuentra situado a escasos metros de a una balsa de riego de la Comunidad de Regantes de El Tarragó de Losa del Obispo (Valencia). Este permite evacuar al subsuelo una fracción importante de agua limpia procedente de dicha balsa de riego cuando se dan situaciones de lluvias intensas.



Figura 13. Sondeo profundo de investigación “Arnachos” de la Balsa del Campo (Chulilla), Valencia (UTM 685744/4391256) junto a una balsa de regadío como

elemento de seguridad y de recarga. Fotos por cortesía de J.M. Montes y FEAGA.

Este sistema de recarga representa un elemento de seguridad, al gestionar el exceso de agua. En el año 2014 apenas fue empleado dos veces para la recarga del acuífero objetivo kárstico infrayacente, restando un volumen de las intensas precipitaciones cercano a **1.000 l/s durante 14 h**.

En consecuencia, la cantidad de agua introducida en el acuífero en una situación de avenida fue de **50,4 millones de litros**. Se trata, por tanto, de un volumen nada desdeñable que habría incrementado el efecto devastador de la avenida. Es por tanto una aplicación o solución tecnológica basada en el principio romano: *"divide et impera"*.

INDICADORES: Infiltración de caudales punta cercanos a los 1000 L/s. en Valencia (0,05 hm³) durante 14 h.

VENTAJAS: Alta capacidad para gestionar avenidas y caudales punta en espacios reducidos con la aplicación de medidas que eliminen la carga sólida. Capacidad para redirigir caudales a acuíferos profundos o confinados para evitar inundaciones por elevación del freático en acuíferos libres.

INCONVENIENTES: Los procesos de decantación pueden colapsarse y las avenidas han de ser previamente laminadas para poder ser inyectadas. El relleno forzado del freático puede reducir el espacio disponible en el subsuelo para absorber por filtración las precipitaciones extremas.

3.3.2 Gestión forestal de cuencas (Neila (Castilla y León))

Para el caso de la Península Ibérica, actualmente hay en desarrollo un inventario de cerca de un millar de diques construidos en la cabecera de cuencas hidrográficas. Según cálculos realizados en el proyecto DINA-MAR, la mayor fracción de la recarga artificial en España procede de este tipo de dispositivos, contabilizándose, según las estimaciones publicadas, en cerca de **200 hm³/año** (en dina-mar, 2009 y PTEA, 2018).

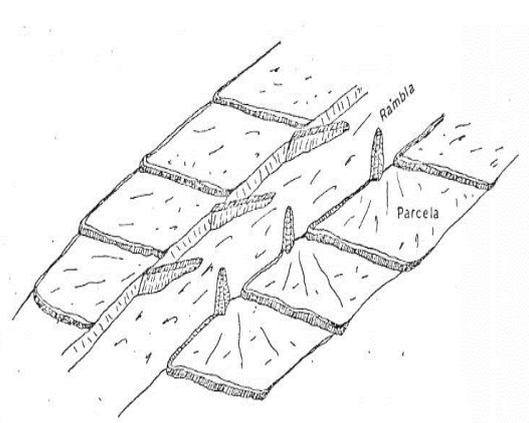


Figura 14. Sistema para dividir el agua de una avenida en cabecera de Cuenca, aumentando su tiempo de concentración y reduciendo su efecto devastador. Boqueras, Sierra de Espadán, Castellón.

Las situaciones extremas por abundancia de agua, bien sea inundaciones, avenidas, de cotas frías, etc. pueden ser empleadas, en una cierta fracción, para la recarga artificial del acuífero. Para ello hace falta combinar un sistema que detenga las aguas que

discurren a gran velocidad, y la derivan hacia dispositivos de recarga. Estos deberán retener el agua hasta la decantación de una gran parte su fracción sólida, para su posterior infiltración en el acuífero. En España estas técnicas han sido empleadas desde la época de los romanos, por lo menos, con desarrollo de sistemas específicos basados en el principio “divide et impera”. Algunos ejemplos han sido las denominadas boqueras y atochadas (Figura 14), sistemas tan específicos que incluso carecen de traducción al inglés. El agua de la avenida es dividida en fracciones a lo largo de la Cuenca, aumentando el tiempo de concentración y disminuyendo su efecto devastador.

Los dispositivos de detención-infiltración y de retención- infiltración (DI-RI) están teniendo un fuerte desarrollo en todo el planeta, y muy especialmente en la falda de las cordilleras.

El sistema combate en primera línea una de las principales manifestaciones del cambio climático: la distribución irregular y con caudales extremos de las precipitaciones.



Figura 15: Dique en cabecera de Cuenca para la retención e infiltración de aguas torrenciales en situación de avenida. Las Palmas (izda.), check dam en Zarzis, Túnez (dcha.).



Figura 16. Acciones mecánicas para minimizar la escorrentía, facilitar la recarga y la plantación posterior (izda.) y construcciones para canalizar y nivelar el exceso de agua de escorrentía (dcha.) Neila (CyL).

Pueden citarse abundantes ejemplos de preparación mecánica del suelo para incrementar la tasa de infiltración, desvío del agua fluvial hacia bosques acondicionados para almacenar agua un tiempo y facilitar su infiltración, bosques “ordenados” para una escorrentía “ordenada” y facilitar la infiltración, etc.

Un nuevo ejemplo se encuentra en Neila, Burgos, donde una construcción canalizada deriva aguas desde una vía de comunicación hacia un bosque ordenado con adecuada gestión forestal, capaz de retener un cierto volumen de agua aplicando el principio “divide et impera”.

INDICADOR: Porcentaje en % del agua de escorrentía total en una zona construida o vía de comunicación que es derivado hacia zonas de almacenamiento temporal e infiltración (o viceversa). Los volúmenes derivados dependiendo del tipo de precipitación y suelo oscilan entre el 15 y el 40% (DINA-MAR, 2009).

VENTAJAS: Control erosivo de cuencas y fomento de la restauración hidrológico forestal gracias a dispositivos de retención que forman suelo y reducen la pendiente. Desarrollo de especies botánicas de suelos profundos con mayor estabilidad del terreno. La retención de sólidos permite aumentar la vida útil de embalses.

INCONVENIENTES: La retención en cabecera condiciona la escorrentía aguas abajo como en cualquier cuenca por lo que la formación de suelos y la recarga de humedales asociados pueden verse afectados.

3.3.3 Gestión plurianual y reservas de agua para su utilización a medio y largo plazo (Santiuste (CyL))

En determinadas ocasiones condicionadas por el volumen de almacenamiento potencial del medio receptor, se pueden llevar a cabo acciones de gestión plurianual de las aguas de recarga. Esta situación es posible bien en zonas de alto volumen y cualquier demanda, o de bajo volumen de almacenamiento potencial y bajas demandas.

En apartados anteriores se han descrito situaciones de gestión hídrica interanual

incluyendo nodos de retorno a los acuíferos en los esquemas topológicos, y almacenamientos estratégicos como medida preventiva de adaptación ante hipotéticas situaciones adversas futuras. En este mismo contexto, cabe mencionar la gestión plurianual de las reservas. Se trata de una técnica de gestión hídrica básica que considera el agua como un recurso minero, renovable en años de condiciones meteorológicas favorables, para su utilización en años de sequía prolongada.

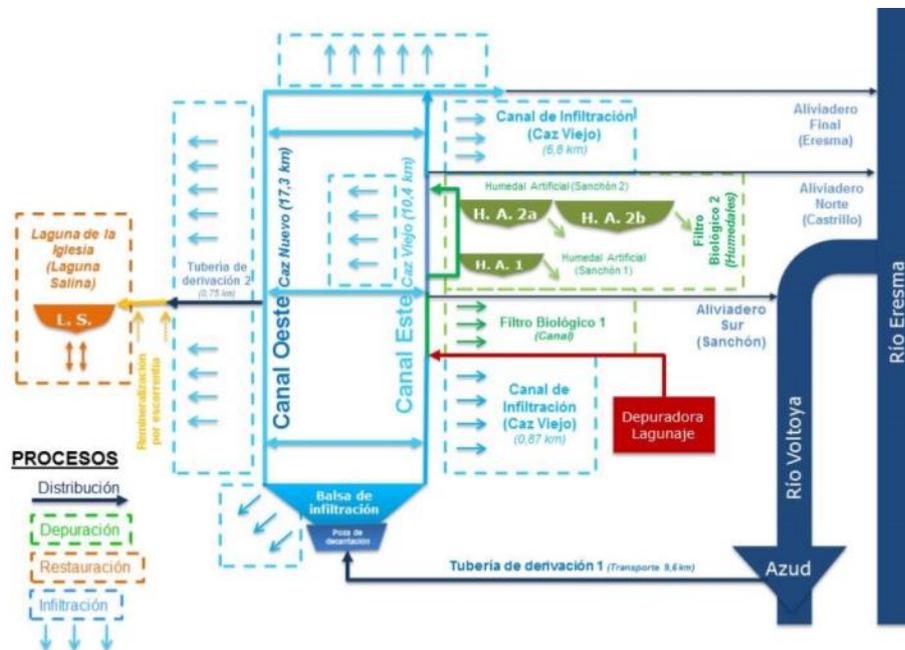


Figura 17. Almacén de agua subterránea de manera intencionada para su uso interanual. Cubeta de Santiuste. Dispositivos y funciones. MARSOL, 2016.

Por ejemplo, en el acuífero Los Arenales (Figura 17), el almacenamiento de agua durante varios periodos invernales, de manera adicional a la previamente existente cuando el acuífero fue declarado de manera provisional sobre-explotado, podría amortiguar situaciones de sequía de escasa duración con una repercusión casi nula para los agricultores. Conforme a los datos del proyecto de I+D+i DINA-MAR del grupo Tragsa, se podría mantener la actividad económica de la comarca durante un periodo de tres años con precipitación nula durante todo ese tiempo, gracias a las reservas almacenadas en las distintas cubetas subterráneas que presenta el acuífero (DINA-MAR, 2009).

INDICADORES: Reserva para uso (riego) para 3 años con una precipitación nula.

VENTAJAS: Al ser reservas subterráneas no requiere de medidas de precaución en cauces como las sueltas invernales o vaciados en deshielos en las presas. También se pueden derivar volúmenes a acuíferos profundos para explotación en situación de emergencia.

INCONVENIENTES: Gestión plurianual implica una muy buena ordenación de usos con un gran espíritu cohesivo entre los usuarios. Pese a sus ventajas frente a presas, también requieren precauciones ante subidas excesivas del freático.

3.4 EJEMPLOS DE SOLUCIONES TECNOLÓGICAS PARA PALIAR LOS EFECTOS ORIGINADOS POR EL ASCENSO DEL NIVEL DEL MAR

3.4.1 Barreras hidráulicas (Llobregat (Cataluña); Malta Sur; Menashe (Israel))

Si la intrusión marina crece con el ascenso del nivel del mar, las únicas medidas conocidas en la actualidad se basan en barreras hidráulicas positivas. Estas barreras requieren grandes costes energéticos para su funcionamiento. Por tanto, el diseño de medidas pasivas para empujar la cuña salina hacia el mar es una línea de investigación y desarrollo abierta, que espera ansiosamente prototipos.

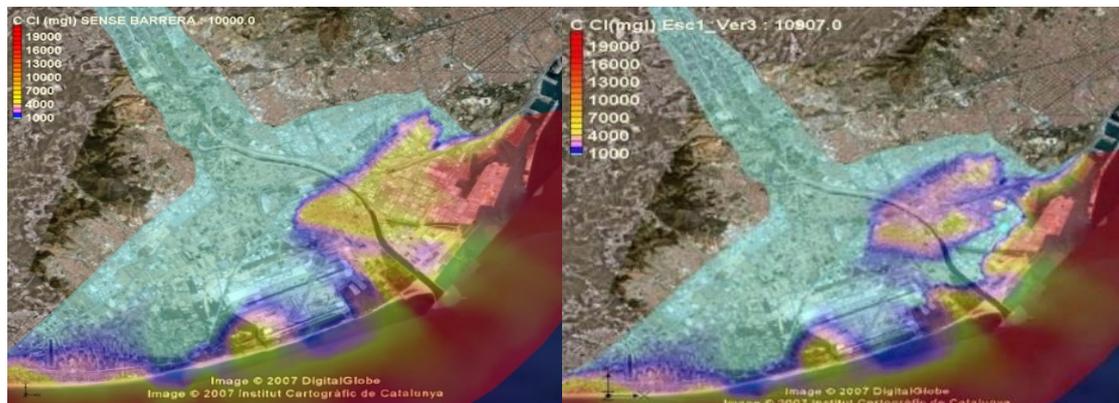


Figura 18. Barrera hidráulica en el delta del río Llobregat. Representación gráfica del modelo empleado para calcular la evolución de la concentración de cloruros en el delta, horizonte 2035. ACA en CETAqua, 2013.

Uno de los casos más emblemáticos de una barrera hidráulica positiva para revertir una situación de intrusión marina, se encuentran la zona franca de Barcelona. A través de una batería de pozos de recarga artificial, que utilizan las aguas regeneradas en la depuradora del Prat, fue diseñado un sistema de inyección activo, que podría devolver la calidad de las aguas subterráneas del acuífero del bajo Llobregat a una situación pre operacional para el año 2035, conforme a los modelos matemáticos de flujo, de interacción y de mezcla con la interfaz marina desarrollados por la ACA.

INDICADORES: Recuperación de la situación preoperacional a la intrusión marina: 30 años de recarga para recuperar la situación previa a la cuña marina en el Llobregat conforme a isolíneas de ión cloruro y modelación directa.

VENTAJAS: Ventajas de la inyección de agua que no tendría otros usos por su escasa calidad (exceso de sales o de nitratos procedentes de EDAM o EDAR) pero que compensan el riesgo de afección a un acuífero dulce (Malta) estratégico.

INCONVENIENTES: Evaluación de los efectos colaterales a ambos lados de la inyección o sobre la capacidad acuífera del subsuelo según la calidad del agua usada como barrera.

4 CONCLUSIONES

La relación de efectos del CC, sus problemas derivados se ha acompañado con 15 ejemplos exitosos de España y otros lugares del planeta aportando una serie de indicadores (Tabla 3) que permiten valorar la eficacia y eficiencia de la técnica MAR

como una herramienta multipropósito capaz de cumplir varias funciones al mismo tiempo.

Tabla 3: Relación de problemas del CC y soluciones MAR con sus ejemplos e indicadores de cumplimiento de objetivos de lucha contra el CC

PROBLEMAS CC	SOLUCIONES MAR	EJ. ARENALES	EJ. ESPAÑA
Evaporación ↑	Almacén subterráneo	Santiuste (CyL) +55 ha	
	Reducción tº suelo		P. de Mallorca (I. Balears)
ETP ↑	Humedad edáfica	Gomezerracín (CyL) 15-20%	
Demanda hídrica ↑	Infiltración regeneradas	Alcazarén (CyL) 0,4 hm³/año	
	Infiltración puntual		CYII (Madrid) +5 hm³/año
	Infiltración dirigida		C. Guad. (CLM) 48 hm³/año
Oferta hídrica ↓	Autodepuración/Reinfiltración	Santiuste (CyL) (+/-12-53%)	
Escorrentía ↓	Almacén fuera de ribera	Santiuste (CyL) 2,6 hm³	
Humedales ↓	Restauración	Santiuste (CyL) 5% recarga	
E hidroeléctrica ↓	Distribución por gravedad	Carracillo (CyL) 40,7 km	
Avenidas ↑	Infiltración sobrantes/urbana		Arnachos (Valencia) 0,05 hm³
	Gestión forestal de cuencas		Neila (CyL)
Sequías ↑	Gestión plurianual	Santiuste (CyL) 3 años reserva	Santiuste (CyL) 3 años reserva
Intrusión salina ↑	Barrera pozos costeros		Llobregat (Cataluña) recup. 30 años

Las opciones relativas a cómo actúa la recarga artificial como medida de adaptación reduciendo los impactos identificados, sin pretensiones de ser estrictamente exhaustivos, se basan en las medidas siguientes:

- Uso de los acuíferos como un almacén subterráneo
- Aumento de la humedad del suelo y ascenso del nivel freático, especialmente en acuíferos intensamente explotados
- Posibilidad de infiltrar aguas regeneradas para su posterior reutilización empleando el acuífero como sistema de depuración adicional (economía circular)
- Almacenamiento de agua en márgenes de las riberas e incremento de la infiltración bajo zonas urbanizadas
- Distribución del agua subterránea a lo largo del acuífero por gravedad, sin necesidad de conducciones
- Infiltración de excedentes hídricos mediante mecanismos de detención y retención-infiltración y SUDS
- Creación de barreras hidráulicas positivas en zonas costeras contra la intrusión marina.

En definitiva, la gestión plurianual del agua y de las reservas subterráneas mejoradas presenta ventajas interesantes con respecto a esquemas de gestión hídrica carentes de celdas de almacenamiento subterráneo y de retorno de agua a los acuíferos.

Los esquemas topológicos de gestión con celdas de retorno a los acuíferos, y conversión de aguas superficiales en subterráneas, están dando, por lo general, buen resultado. Estos sistemas son garantistas para el suministro de agua futuro y constituyen una indiscutible serie de medidas de adaptación al cambio climático. Otros, además, resultan paliativos de sus efectos adversos.

5 BIBLIOGRAFÍA

- ANA, 2017. Estudio hidrogeológico del acuífero Ica. Memoria final. ANA Perú.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, Eds., 2008: El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 2008
- CETaqua, Centro Tecnológico del Agua (2013) Enhancement of Soil Aquifer Treatment to Improve the Quality of Recharge Water in the Llobregat River Delta Aquifer Life+ ENSAT project 2010-2012 Layman's Report. Barcelona.
- Del Barrio, V. (2014). The activity seen from the Duero river basin and the RBMP. MAR4FARM training Workshop, Gomezserracín, Segovia, 2014 October 29-30.
- DINA-MAR (multiautor) (2010). La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Desarrollo tecnológico. Coord. Enrique Fdez. Escalante. Serie Hidrogeología Hoy, No 6. Método Gráfico. Available online: <http://goo.gl/6lp4m>.
- Fdez. Escalante, E.; San Sebastián Sauto, J.; Villanueva Lago, M.; Vidal Medeiros, Ana M^a. (2016). Guidelines for M.A.R. water quality. International overview and lessons learnt. ISMAR 9 oral presentation.
- Fernández Escalante, E. (2014). 2002-2012, una década de recarga gestionada. Acuífero de la Cubeta de Santiuste (Castilla y León). Tragsa. Abril 2014. ISBN 84-616-8910-0. 298 pg.
- Fernández Escalante, E. 2018. Mecanismos de “detención-infiltración” para la recarga intencionada de los acuíferos como estrategia de adaptación al cambio climático. Revista IDiAgua, número 1, Junio de 2018 “Fenómenos extremos y cambio climático. Plataforma Tecnológica Española del Agua, 2018.
- GIAE. Multiautor. (2015). The Comprehensive Management of Rainwater in Built-up Areas. Grupo Tragsa 2015. goo.gl/ZewhSQ
- Hut, R., Ertsen, M., Joeman, N., Vergeer, N., Winsemius, H., & Giesen, N. V. (2008). Effects of sand storage dams on groundwater levels with examples from Kenya. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 33(1-2), 56-66.
- IMTA, 2017. Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica. IMTA, México, 977 pg. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/manejo-recarga-acuíferos-ehl.pdf.
- Infantino, Stockham and Stanisic, 2018 Tres Rios Environmental Restoration TME. Society of American Military Engineers Alexandria (EEUU) (<http://themilitaryengineer.com/index.php/staging/item/191-tres-rios-environmental-restoration>)
- IPCC, 2013: “Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J.

- Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Kupfersberger, H. 2009 Managed Aquifer Recharge in Austria as Central Element of Integrated Water Resources Management in ISMAR 7 Proceedings, 243-250, Abu Dhabi (UAE).
 - Lasage, R., Aerts, J., Mutiso, G., & Vries, A. D. (2008). Potential for community based adaptation to droughts: Sand dams in Kitui, Kenya. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(1-2), 67-73. Retrieved February 1, 2016.
 - MARSOL, 2014. Fernández Escalante, E.; Calero Gil, R.; González Herrarte, B.; San Sebastián Sauto, J. and Del Pozo Campos, E. (2015). "Los Arenales demonstration site characterization. Report on the Los Arenales pilot site improvements". MARSOL deliverable 5-1, 2015-03-31.
 - MARSOL, 2016. Fernández Escalante, E.; Calero Gil, R.; Villanueva Lago, M., San Sebastián Sauto, J; Martínez Tejero, O. and Valiente Blázquez, J.A. (2016). Appropriate MAR methodology and tested know-how for the general rural development. MARSOL deliverable 5-3, 2016-07-31. MARSOL.
 - National Water Commission. 2013. Allocating water and maintaining springs in the Great Artesian Basin. Volume VII: Summary of findings for natural resource management of the Western Great Artesian Basin. Canberra: National Water Commission.
 - Navarro, R. (2017). Informe técnico de recarga artificial del acuífero valle de Ica campaña 2016/2017. JUASVI.
 - San Sebastián Sauto, J., Fernández Escalante, E. & González Herrarte, FdB. (2105): La Recarga Gestionada en Santiuste: 13 Años de Usos y Servicios Múltiples para la Comunidad Rural. - Revista Tierras, 234: pg. 78-85; Valladolid.
 - Tragsatec (2010). Propuesta de zonas viables de recarga artificial con dispositivos superficiales y sub-superficiales. Junta de Castilla y León-Tragsatec. Documento técnico no publicado.
 - Trotta, T. (2018). Qué hacer ante la falta de agua. El País, Planeta Futuro, 21 de agosto de 2018. https://elpais.com/elpais/2018/08/21/planeta_futuro/1534859908_605273.html

Accesos web:

- Bayer, 2009. Último acceso: 24 de Octubre de 2018 https://www.ecoportel.net/temas-especiales/agua/la_crisis_del_agua_en_ica_y_como_resolverla/
- Climate.org Clima en Abu Dabi, 2018 <https://es.climate-data.org/asia/emiratos-arabes-unidos/abu-dhabi/abu-dhabi-3217/> 13 de noviembre de 2013
- GRIPP (2018). Groundwater-based Natural Infrastructure (GBNI). <http://gripp.iwmi.org/natural-infrastructure/>. Último acceso: 22 de Octubre de 2018:
- IWMI en GRIPP, 2018. Alok K. Sikka, Paul Pavelic and Karen G. Villholth. Nature-based integrated watershed management solutions.
- IWMI en GRIPP, 2018. Binaya Raj Shivakoti, Tsutomu Ichikawa and Karen G. Villholth. Incentivizing groundwater recharge through payments for ecosystem services (PES). Success factors of an offsetting scheme in Kumamoto, Japan
- IWMI en GRIPP, 2018. E.F. Escalante; Jon San Sebastián Sauto. The Alcazarén-

Pedrajas MAR scheme in Central Spain. <http://gripp.iwmi.org/natural-infrastructure/water-storage/the-alcazaren-pedrajas-managed-aquifer-recharge-mar-scheme-in-central-spain/>

- IWMI en GRIPP, 2018. Frank van Steenberg, Marta Agujetas Perez and Kifle Woldearegay. On the road to water management and climate resilience.
- IWMI en GRIPP, 2018. Mohamed A. Dawoud. A strategic water reserve in Abu Dhabi.
- Reclaim Water-Gabardine Workshop proceedings, Sabadell, Marzo de 2007.
- Tres Rios Restoration <https://www.phoenix.gov/waterservices/tresrios>. 13 de noviembre de 2013.
- Weatherspark.com, 2018. Average Weather in Kitui Kenya <https://weatherspark.com/y/100643/Average-Weather-in-Kitui-Kenya-Year-Round>. 13 de noviembre de 2013

6 AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido redactado por miembros del equipo del Grupo Tragsa del proyecto europeo MARSOL (Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a solution to water scarcity and drought) (WP5), con el apoyo de la European Commission, convocatoria Water Inno-demo (FP 7) con Grant Agreement: GA nº 619.120. El artículo refleja el punto de vista exclusivo de los autores y la Comisión Europea no tiene responsabilidad sobre las opiniones publicadas en el mismo.

Así mismo agradecemos a los técnicos del Grupo Tragsa y de la IAH-MAR Commission el apoyo brindado.