

I. RECARGA ARTIFICIAL DE ACUIFEROS. CONCEPTOS GENERALES

Definición

Objetivos

Aplicaciones

Elementos esenciales que determinan la viabilidad de un proyecto de recarga artificial

Agua de recarga en origen

Evaluación de aportaciones y determinación de excedentes hídricos

Análisis de las características de calidad y variabilidad temporal

Acuífero receptor

Instalaciones de recarga artificial

Método de recarga

Tamaño y diseño de instalaciones

Necesidad y tipo de instalaciones auxiliares

Métodos y equipos de control y seguimiento

Instalación de transporte del agua de recarga

I. RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

CONCEPTOS GENERALES



CONCEPTOS GENERALES

DEFINICIÓN

Se designa como recarga artificial a un conjunto de técnicas que permiten, mediante intervención programada e introducción directa o inducida de agua en un acuífero, incrementar el grado de garantía y disponibilidad de los recursos hídricos, así como actuar sobre su calidad.

OBJETIVOS

Esta tecnología pretende contribuir, siempre que técnica y económicamente sea factible, a una gestión más racional de la potencialidad hídrica que presenta una determinada cuenca hidrográfica o sistema de explotación.

Los objetivos que persigue se engloban en dos tipos, siendo muy frecuente el que ambos aparezcan juntos:

- Aumento y optimización del volumen de los recursos hídricos, y
- Prevención o corrección del deterioro de la calidad del agua.

En líneas generales resulta muy difícil establecer un orden prioritario entre los mismos, ya que la mayor o menor importancia de uno de ellos frente al otro, varía en función de diversos factores, tales como clima, presiones sociales, condicionantes económicos, etc., existentes en el lugar donde se realiza una experiencia concreta. Incluso se ha dado el caso, en ocasiones, de que en un mismo sitio han sido distintos a lo largo del tiempo.

APLICACIONES

Las aplicaciones más usuales de la recarga artificial de acuíferos son:

- Almacenamiento subterráneo de esorrentías superficiales no reguladas.
- Reducción o eliminación del descenso piezométrico.
- Apoyo a determinados esquemas de utilización conjunta o coordinada.
- Mantenimiento hídrico de enclaves ecológicos o medioambientales.
- Reducción de costes de transporte, almacenamiento o bombeo.
- Actuaciones sobre problemas de subsidencia.
- Disminución o corrección de problemas de intrusión marina.
- Aprovechamiento de las propiedades del suelo y de la zona no saturada como elemento de tratamiento tanto para aguas potables como residuales.
- Dilución del excesivo contenido en nitratos, cloruros u otros constituyentes químicos de las aguas de determinados acuíferos.



5

La planificación y realización de proyectos de recarga artificial de acuíferos exigirá la familiarización con una terminología que se podría denominar «Hidrogeología en Obras Hidráulicas». Conceptos, formulaciones, análisis económicos y elementos constructivos reservados hasta ahora a la hidrología superficial, formarán parte en poco tiempo, de la hidrología subterránea.

ELEMENTOS ESENCIALES QUE DETERMINAN LA VIABILIDAD DE UN PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL

Un proyecto de recarga artificial debe considerarse como una alternativa para atender la demanda de agua. A este respecto deben contemplarse, antes de considerar cualquier hipótesis de recarga artificial, los siguientes aspectos:

- Análisis de demandas y usos actuales y futuros.
- Análisis de los elementos de regulación actual y futura, tanto de índole superficial como subterránea.
- Evaluación de las hipótesis de gestión enfocadas al aumento de la regulación, al incremento de la garantía, o a ambas conjuntamente.
- Aplicación de criterios y técnicas de utilización conjunta o gestión coordinada.



6

La tecnología de la recarga artificial de acuíferos no es incompatible con la regulación a través de embalses de superficie, sino complementaria.

Una vez decidido que la técnica de la recarga artificial de acuíferos puede constituir una herramienta útil, válida y competitiva dentro de los distintos sistemas de regulación capaces de satisfacer una determinada demanda hídrica, es preciso evaluar la viabilidad de la operación de recarga artificial mediante el análisis y estudio de los factores que se relacionan a continuación:

- Agua de recarga en origen.
- Características del acuífero receptor.
- Análisis de las diferentes alternativas de instalaciones de recarga, así como de las auxiliares de control, tratamiento y transporte del agua de recarga.
- Agua recargada y destino final.
- Evaluación económica y aspectos legislativos y de gestión.

La duración de un proyecto de recarga artificial, desde que se inician los primeros estudios hidrogeológicos hasta que se termina la construcción de la instalación de recarga artificial de carácter industrial, puede cuantificarse en un tiempo comprendido entre 2 y 5 años. Evidentemente, el grado de conocimiento hidrogeológico que se posee sobre una determinada zona, así como la decisión de no realizar alguna de las etapas que caracterizan a este tipo de estudios, hacen que dicho tiempo se acorte.

Un cronograma tipo de las actividades a realizar en el proyecto es el siguiente:

- | | |
|--|------------|
| • Fase de estudios hidrogeológicos previos | 0-12 meses |
| • Modelización matemática | 6 meses |
| • Fase de construcción de la instalación piloto | 3-12 meses |
| • Fase de seguimiento de la experiencia piloto | 6-12 meses |
| • Nuevos estudios hidrogeológicos de detalle | 0-6 meses |
| • Diseño y construcción de la instalación de carácter industrial | 6-12 meses |

Hay que tener presente que un proyecto de recarga artificial puede englobar numerosos elementos característicos de la regulación superficial. La presencia de estos componentes puede implicar, en ocasiones, un proceso muy largo para la recogida de datos, estudio, toma de decisiones y construcción de los dispositivos aprobados. Además, una vez construidas las instalaciones pueden pasar algunos años hasta que sean totalmente efectivas.

AGUA DE RECARGA EN ORIGEN

En el estudio del agua de recarga en origen se deben contemplar tanto aspectos cuantitativos como cualitativos. Los resultados del estudio deben incorporar no sólo la perspectiva espacial, sino también la distribución temporal.



La disponibilidad de agua tanto en cantidad como en calidad es un factor primordial a considerar en toda operación de recarga artificial de acuíferos.

Evaluación de aportaciones y determinación de excedentes hídricos

Un condicionante totalmente necesario para acometer cualquier tipo de recarga artificial de acuíferos, es disponer de agua excedentaria.

Durante la fase de estudio se deben analizar los siguientes puntos:

- Naturaleza.
- Localización de los puntos de toma.
- Caudal disponible y régimen temporal.
- Características de calidad y variabilidad temporal.

El agua que se emplea en la recarga artificial proviene principalmente de las siguientes fuentes:

- Agua superficial continua (curso fluvial permanente) o discontinua (escorrentía de las aguas de tormenta) tomada directamente o con un cierto grado de tratamiento.
- Agua residual doméstica que, con un cierto grado de tratamiento, es posible reutilizar o mezclar con agua procedente de otra fuente.
- Agua procedente de otro acuífero. Generalmente se refiere a la drenada a través de manantiales.

Es importante precisar que, dado el carácter discontinuo frecuentemente asociado a la escorrentía constitutiva del agua potencialmente recargable, es imprescindible, en numerosas ocasiones, un tratamiento numérico a nivel diario.

También es necesario indicar que no toda la aportación excedentaria de una cuenca es susceptible de aprovechamiento mediante la técnica de recarga artificial de acuíferos, ya que su distribución espacial y temporal no es uniforme, presentando puntas de caudal que obligan a sobredimensionar el tamaño de las instalaciones, con el consiguiente incremento del coste económico, para una utilización reducida y complicada de los dispositivos de infiltración que, incluso, en el caso de una gran avenida, podría conllevar la destrucción de los mismos.

El estudio de las aportaciones y potenciales volúmenes de agua a infiltrar se puede estructurar según la secuencia siguiente:

- *Análisis climático.* Destinado a evaluar las aportaciones más importantes al sistema hídrico. La cuantificación de la lluvia puede, y debe, junto con el análisis de caudales, dar lugar a modelos de precipitación-escorrentía-infiltración, que ofrezcan una potente herramienta de predicción para simular futuras alternativas de gestión.
- *Análisis de la distribución espacial de las aportaciones.* Analiza la distribución espacial de los caudales, así como su cuantía. Siempre que la disposición de las estaciones de aforo lo permita, se realizará un estudio de la infiltración en el cauce por tramos. Este valor de la infiltración puede ofrecer una estimación de la capacidad de infiltración del terreno que, a falta de ensayos o pruebas directas de infiltración en campo, podría, en principio, ser asimilable a la tasa teórica de recarga del futuro dispositivo de recarga.
- *Análisis de la distribución temporal de las aportaciones.* Estudia la forma y cuantía que tienen los caudales de presentarse en el tiempo.
- Análisis de usos y demandas.



La recarga artificial de acuíferos permite la optimización de algunos elementos de la regulación superficial que presentan excedentes en ciertos períodos húmedos.

- Cálculo de excedentes o aportaciones no reguladas.
- *Generación de las series de volúmenes a infiltrar.* Se debe generar y realizar una simulación de los volúmenes potencialmente infiltrables en el periodo analizado, suponiendo unas instalaciones de recarga artificial trabajando en un punto óptimo o teórico de funcionamiento.
- *Análisis de sensibilidad.* Constituye la realización de la anterior simulación, pero con las instalaciones trabajando no ya con un caudal óptimo de funcionamiento, sino con caudales situados en el entorno de dicho caudal teórico óptimo.

Análisis de las características de calidad y variabilidad temporal

Los principales controles periódicos que se han de efectuar sobre la calidad del agua de recarga se centran en los siguientes aspectos:

- Composición físico-química de los principales componentes.
- Compuestos de nitrógeno y fósforo.
- Compuestos orgánicos.
- Metales pesados.
- Bacteriología y virología.
- Elementos radiactivos.



La calidad del agua de recarga debe ser periódicamente controlada mediante las técnicas analíticas adecuadas.

9

La determinación de las características de calidad y su variabilidad temporal, se deben realizar a partir de una serie de campañas de muestreo de la calidad condicionadas por la propia dinámica que afecta la circulación de agua en el punto que constituye la fuente de toma. La presencia de agua en algunos cursos fluviales se caracteriza por una acusada discontinuidad y por importantes fluctuaciones en la cuantía del caudal circulante por los mismos. La toma de muestras de agua en estos cauces se debe efectuar según una ligazón temporal determinada por el régimen de lluvia, así como por la presencia de un mayor o menor contenido de elemento líquido en los cursos fluviales.

En general, el agua que se suministra a una instalación de recarga presenta unas características físicas, químicas y biológicas variables. Por esta razón conviene tener en la entrada de las instalaciones de recarga:

- Dispositivos de pretratamiento que permitan realizar actuaciones sobre todas aquellas sustancias no deseables que se desean eliminar o disminuir.
- Dispositivos de vigilancia y control que permitan rechazar o impedir la entrada a la instalación de recarga del agua que no puede ser tratada con un cierto grado de garantía o que no cumpla unos determinados estándares de calidad. El contenido de sólidos en suspensión es un constituyente del agua de recarga sobre el que se debe efectuar un especial seguimiento, ya que este parámetro se encuentra estrechamente relacionado con la posible colmatación que pueden experimentar las instalaciones de infiltración.

En este sentido, la toma de muestras de agua en los cauces se debe planificar según una secuencia que incluya un mínimo de muestreos coincidentes con periodos de lluvias, así como con el día o días posteriores al cese de las mismas, ya que el contenido de sólidos en suspensión, en un determinado curso natural de agua, es variable con el tiempo y muy condicionado por la pluviosidad, así como por la forma de producirse ésta. La mayor cantidad de aporte sólido se produce en tan sólo muy pocos días que corresponden a las ondas de avenida.



10

La toma de muestras, tanto de agua como de suelo, debe ser minuciosamente programada y ejecutada. A veces es preciso utilizar pequeños laboratorios móviles.

A título de ejemplo se puede citar que, en el río Turia, el 85% de los sólidos en suspensión se transportan durante la fase de avenidas, mientras que el 15% restante se aporta durante la fase considerada como normal. Durante la fase de avenidas se han dado valores de sólidos en suspensión de hasta 33.750 mg/L. El aporte medio diario de materia en suspensión, en época normal, se cuantificó entre 0 y 30 mg/L.

ACUÍFERO RECEPTOR

La recarga artificial se puede practicar, en principio, en cualquier tipo de formación permeable que tenga condiciones para almacenar y transmitir agua.

Ahora bien, no todos los acuíferos son adecuados para realizar una recarga artificial. La efectividad de la misma está estrechamente ligada a las características hidrogeológicas, hidrodinámicas y de almacenamiento del acuífero receptor, así como al régimen de explotación al que se encuentra sometido. En este sentido debe precisarse que el agua recargada tiene que permanecer en el acuífero el tiempo suficiente para permitir su utilización posterior. Asimismo, su calidad final debe ser la adecuada a los usos a los que se destine.



Cualquier formación geológica permeable es, en principio, susceptible de ser objeto de una recarga artificial. No obstante, la efectividad de la operación se encuentra condicionada por la capacidad de almacenamiento e hidrodinamismo que posea el acuífero receptor.

Normalmente la recarga artificial se practica en acuíferos libres con el nivel freático a profundidad intermedia o próxima a la superficie, bien en materiales granulares como depósitos aluviales o areniscas, bien en materiales consolidados como calizas y dolomías fracturadas y/o karstificadas. Sin embargo, también se puede efectuar en acuíferos confinados, o localizados a mayor profundidad, o en materiales granulares relativamente cementados, o en consolidados con ligera fisuración. En estos casos, los caudales de admisión son menores, presentándose además, en general, mayores problemas de colmatación.

Para realizar con éxito actuaciones en el campo de la recarga artificial de acuíferos es preciso disponer de información detallada relativa a los siguientes puntos:

- Litología y aspectos geológicos de los materiales que integran el acuífero.
- Geometría del acuífero.
- Piezometría.
- Hidroquímica y calidad del agua.
- Parámetros hidráulicos (transmisividad, permeabilidad, porosidad eficaz, coeficiente de almacenamiento, capacidad de infiltración).
- Velocidad del agua subterránea y direcciones preferenciales de flujo.
- Volúmenes utilizables o disponibles en el acuífero (reservas útiles).
- Zonas de drenaje o descarga natural.
- Relación río-acuífero.
- Usos, demandas y consumos de agua.
- Balance hídrico.

Probablemente en algunos casos será preciso disponer de los datos discretizados en el espacio y el tiempo.

INSTALACIONES DE RECARGA ARTIFICIAL

Cada experiencia de recarga artificial presenta unas peculiaridades distintas que deben analizarse en detalle para ese caso concreto, ya que determinan la elección de la instalación más correcta tanto bajo aspectos técnicos como económicos.

Los factores que es preciso analizar son los siguientes:

- Análisis de las diferentes alternativas de instalaciones de infiltración.
- Necesidad y tipo de instalaciones auxiliares.
- Métodos y equipos de control y seguimiento.
- Instalaciones de transporte del agua de recarga.

Métodos de recarga

Los procedimientos ideados para poder llevar a la práctica esta técnica son múltiples y variados, aunque resulta muy clásico el establecimiento de dos grandes grupos de métodos (cuadro 1) en función de que la recarga se efectúe bien por infiltración a través de la superficie del terreno, o bien por introducción directa del agua hasta el acuífero mediante una perforación que lo atraviesa.

Cuadro 1 MÉTODOS Y DISPOSITIVOS DE RECARGA ARTIFICIAL			
SUPERFI- CIALES	EN CAUCES	SERPENTEOS Y REPRESAS	Se fundamenta en aumentar el tiempo y la superficie de contacto entre el agua y el terreno, bien mediante la construcción de diques o bien de muros de tierra en forma de L.
		ESCARIFICACIÓN	Consiste en escarificar el lecho del río eliminando finos y mejorando la infiltración.
		VASOS PERMEABLES	Son embalses de superficie cuya cerrada no es totalmente impermeable.
	FUERA DE CAUCES	BALSAS	Son dispositivos alargados, poco profundos, y de gran superficie. La infiltración se produce predominantemente por el fondo.
		FOSAS	Son semejantes a las balsas, pero la superficie lateral es importante. Domina la infiltración por los flancos.
		CANALES	Son dispositivos poco profundos que siguen la topografía del terreno. La infiltración se produce tanto por el fondo como por los flancos.
		CAMPOS DE EXTENSIÓN	Se basan en extender agua por la superficie del terreno, normalmente mediante riego con grandes dotaciones.
EN PROFUNDIDAD	SONDEOS DE INYECCIÓN	Mediante la construcción de sondeos profundos se inyecta el agua en el acuífero.	
	SIMAS Y DOLINAS	Consiste en aprovechar las simas y dolinas de los terrenos calcáreos para introducir agua en el acuífero.	
	DRENEOS Y GALERÍAS	Consiste en realizar en el fondo de un pozo, por el que se introduce el agua, drenes y galerías.	
	ZANJAS Y SONDEOS	Este dispositivo consiste en una gran zanja de infiltración, de escasa profundidad, rellena de grava calibrada, dentro de la cual se ubican sondeos de recarga.	

LOS MÉTODOS DE RECARGA EN SUPERFICIE

Consisten en extender el agua buscando una gran superficie de contacto agua-terreno. Se emplean fundamentalmente en acuíferos libres, que no presentan niveles de baja permeabilidad en las proximidades de la superficie del terreno, lo que permite la llegada del agua al acuífero.

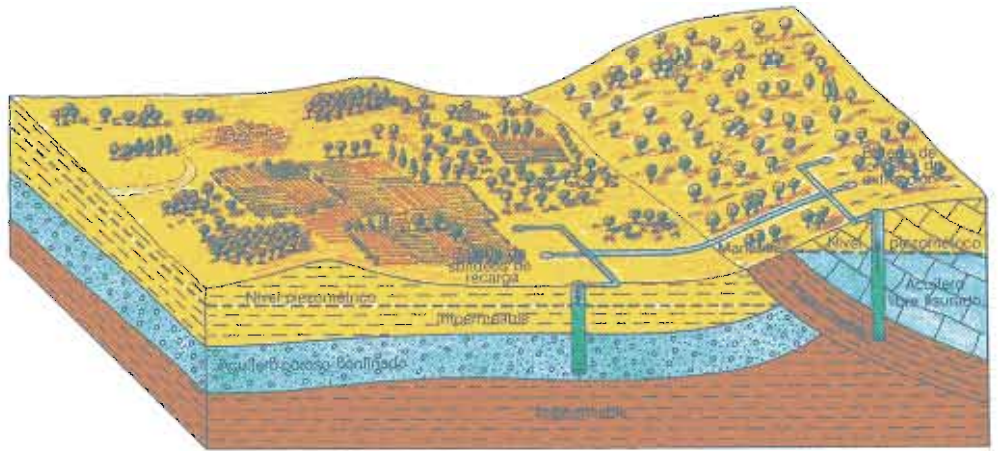
LOS MÉTODOS DE RECARGA EN PROFUNDIDAD

Consisten en la introducción de agua en el acuífero, generalmente mediante pozos, sondeos, etc. Se emplean de una forma generalizada en terrenos formados por una alternancia de niveles permeables e impermeables.

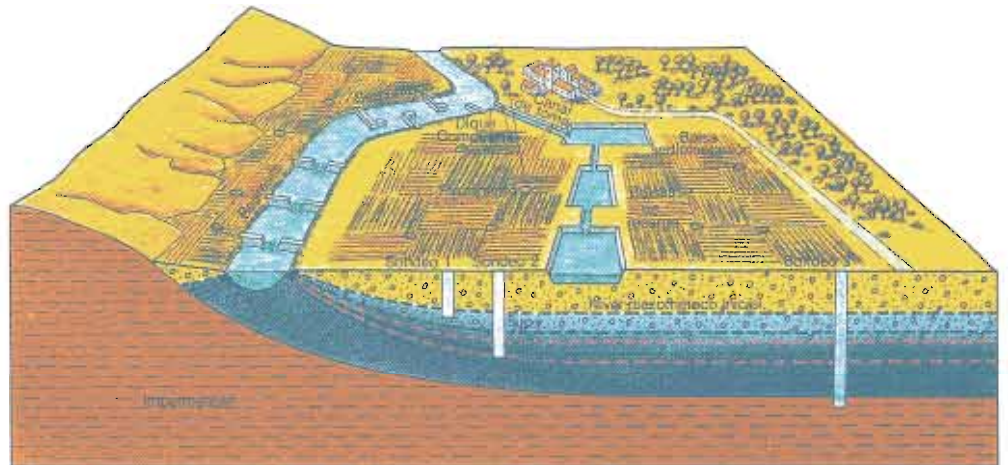
La comparación entre las diversas modalidades de recarga artificial solamente se puede realizar de una forma orientativa, puesto que cada experiencia presenta unas características y un entorno diferente.

Algunos criterios, más o menos generalizados, sobre diversos factores o aspectos que pueden intervenir en la elección de uno u otro método, se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2 VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS DISTINTOS SISTEMAS DE RECARGA ARTIFICIAL		
MÉTODOS FACTOR	SUPERFICIALES	EN PROFUNDIDAD
Precio y disponibilidad del terreno.	Puede ser muy difícil o imposible establecerlos en una zona poblada o muy cultivada por no disponer de espacio o por ser los terrenos muy caros. Precisa en general terrenos baratos, así como de grandes superficies si se quieren infiltrar importantes volúmenes de agua.	Pequeño. Precisan poco espacio.
Factores estéticos y ambientales.	Pueden presentar problemas de proliferación de insectos y roedores. Requieren cercados y vallas para proteger a personas y animales.	Escasos.
Permeabilidad del acuífero.	Media a grande. Permeabilidades bajas exigen grandes extensiones de terreno para poder recargar volúmenes apreciables de agua.	Variable. Se emplean de una forma generalizada en terrenos formados por una alternancia de niveles permeables e impermeables, o cuando existen niveles poco permeables entre la superficie del suelo y el acuífero.
Construcción de instalaciones.	Pueden requerir acondicionamientos previos del terreno para nivelarlo, retirar coberturas poco permeables o arillosas, retirar vegetación, obtener diques resistentes, construir estructuras para la conducción del agua, etc. La construcción de algunas instalaciones, como por ejemplo aquellas que llevan aparejadas un embalse de vaso permeable, puede resultar muy compleja.	No tienen porqué resultar excesivamente complicados.
Caudal recargable.	Puede llegar a ser muy grande.	Notablemente inferior si se compara con el medio de las instalaciones superficiales.
Pérdidas por evaporación.	En determinados casos pueden ser importantes. Dependen del tamaño de las instalaciones. Los valores de evaporación no superan, en general, los 0'005 m/día.	Nulas.
Requisitos de calidad del agua.	Pequeños, ya que se puede aprovechar el poder autodepurador de la zona no saturada.	Grandes, ya que el agua se introduce directamente en el acuífero. A veces implica un coste de pretratamiento importante.
Colmatación.	Los problemas derivados de la colmatación pueden ser importantes. El agua introducida debe presentar un bajo contenido de sólidos en suspensión.	Presentan una gran susceptibilidad a la colmatación.
Grado de depuración del agua en el terreno.	Grande. El paso del agua por el medio no saturado es decisivo para conseguir una buena eliminación de contaminantes.	Pequeño o nulo.



Los pozos y sondeos son los sistemas de recarga artificial más utilizados cuando el acuífero se encuentra a una cierta profundidad. Su uso también es frecuente en los casos en los que la disponibilidad de terrenos es restringida o su precio muy caro.



Los métodos de recarga en superficie presentan menos complicaciones técnicas que los dispositivos de recarga artificial en profundidad. Como regla general se podrá indicar que a igualdad de eficiencia siempre es preferible la técnica constructiva más sencilla.

La **recarga inducida** se puede considerar como un tercer método de recarga artificial o como un caso particular de recarga a través de métodos superficiales. Consiste en provocar la infiltración natural, que tiene lugar desde ríos, lagos o embalses, mediante pozos de bombeo situados relativamente cerca de dichas masas de agua.

NUEVOS MÉTODOS DE RECARGA ARTIFICIAL

Nuevos avances han surgido recientemente en los dispositivos empleados en las operaciones de recarga artificial de acuíferos. Entre los métodos que se están ensayando o perfeccionando es menester citar los pozos secos, las trincheras y los acuíferos artificiales que se emplean para recarga de acuíferos libres.

Los pozos secos o pozos en zona no saturada o pozos colgados son perforaciones o excavaciones de 10 a 50 metros de profundidad y de 1 ó 2 metros de diámetro.

Las trincheras de recarga son excavaciones alargadas de 1 m de ancho y cerca de 10 m de profundidad.

El mayor problema que presentan los pozos secos y las trincheras es la colmatación debida al material sólido que se deposita en el entorno del pozo o de la trinchera. En estos sistemas el efecto de la colmatación se agrava al encontrarse el pozo en seco, ya que la instalación no puede bombearse, desarrollarse o rehabilitarse. No obstante la colmatación se puede minimizar mediante la aplicación de un pretratamiento al agua de recarga, por relleno del interior del pozo o trinchera con arena grosera o grava fina, por colocación de láminas de plástico o tela sobre los horizontes arcillosos al objeto de prevenir desprendimientos o arrastres y por utilización de filtros de tela (geotextiles). Aunque se tomen estas precauciones los pozos secos y las trincheras tienen una vida útil limitada.



Los pozos colgados son dispositivos de recarga artificial en fase experimental cuyo interior se rellena en ocasiones con grava para reducir el efecto de la colmatación.

Los acuíferos artificiales o acuíferos sintéticos (*constructed aquifers*) son básicamente filtros de arena para recargar o tratar aguas negras u otros tipos de agua de calidad deteriorada. Estos sistemas de recarga o tratamiento se construyen por excavación de un foso de unos 2 metros de profundidad que se reviste lateralmente con material plástico. En su fondo se coloca una capa de gravas y tuberías de drenaje. El foso se rellena con arena u otro material permeable. La recarga o el tratamiento se realiza mediante inundaciones con el efluente de aguas negras por cortos períodos de tiempo (unos pocos días). Posteriormente la instalación se seca durante un tiempo suficiente para que la capa colmatada se agriete y se ondule y pueda quitarse mediante rastrillado.

A causa de su simplicidad constructiva los acuíferos sintéticos están multiplicando su uso en el tercer mundo y en las zonas rurales. En estas zonas el tratamiento que usualmente se utiliza es de tipo primario (lagunaje anaerobio o tanques sépticos). La ventaja de los acuíferos artificiales sobre los anteriores sistemas estriba en una mayor eliminación de patógenos. Este método también se utiliza en pequeñas urbanizaciones, hoteles y residencias individuales o particulares. Desde 1995 se han instalado más de cien sistemas de este tipo en Francia. Marruecos ha programado, al sur de Agadir, un proyecto de investigación y demostración de esta tecnología.

Tamaño y diseño de instalaciones

El tamaño de una instalación de recarga artificial (dispositivo de infiltración) está relacionado con el método de recarga empleado (superficial o profundo) y con los aspectos hidráulicos del terreno e hidrodinámicos del acuífero donde se ubiquen los dispositivos de infiltración. En este sentido resulta fundamental, en las obras de superficie, conocer el valor de la tasa de infiltración, ya que este factor condiciona el tamaño y diseño de las obras.

$$\text{Tasa de infiltración} = \frac{\text{Caudal que se infiltra}}{\text{Superficie por la que se realiza la infiltración}}$$

En las instalaciones ligadas a sondeos, para poder conocer el número de pozos operacionales, se precisa evaluar el caudal específico.

$$\text{Caudal específico} = \frac{\text{Caudal de inyección}}{\text{Ascenso de nivel en el pozo}}$$

Es preciso indicar que estos valores no son constantes, ya que la tasa de infiltración o el caudal específico disminuyen, por causa de la colmatación, con cada paso de tiempo. Por tanto, para poder recargar un volumen idéntico de agua para cada unidad de tiempo considerada, se precisará realizar una readaptación del tamaño del número de elementos de cada dispositivo de recarga en funcionamiento.

La tasa de infiltración, por efecto de la colmatación, disminuye según una ecuación exponencial del tipo $I = A e^{-Bt}$ donde I es la tasa de infiltración (m/día) y t el tiempo acumulado (días) en que se realizan operaciones de recarga. A y B son dos valores que se determinan experimentalmente para cada caso concreto.

En las instalaciones superficiales de recarga artificial se trabaja normalmente con ciclos de inundación-secado, de duración variable, para evitar la colmatación debida al hin-

chamiento de las arcillas. Esta forma de proceder exige, como mínimo, el empleo de dos balsas alternativas de infiltración de iguales dimensiones.

Necesidad y tipo de las instalaciones auxiliares

Tanto si la instalación es de tipo superficial como profunda, se precisarán dispositivos de decantación y sedimentación, diseñados por módulos, que pueden ocupar una extensión considerable.

Si las instalaciones de infiltración no alcanzan grandes dimensiones se pueden colocar filtros en su fondo, ya que la inversión económica que se precisa en este supuesto no tiene porqué resultar excesivamente gravosa.

El material filtrante puede variar desde grava, notablemente más permeable que el terreno natural, hasta arena fina de permeabilidad igual o menor que la del terreno.

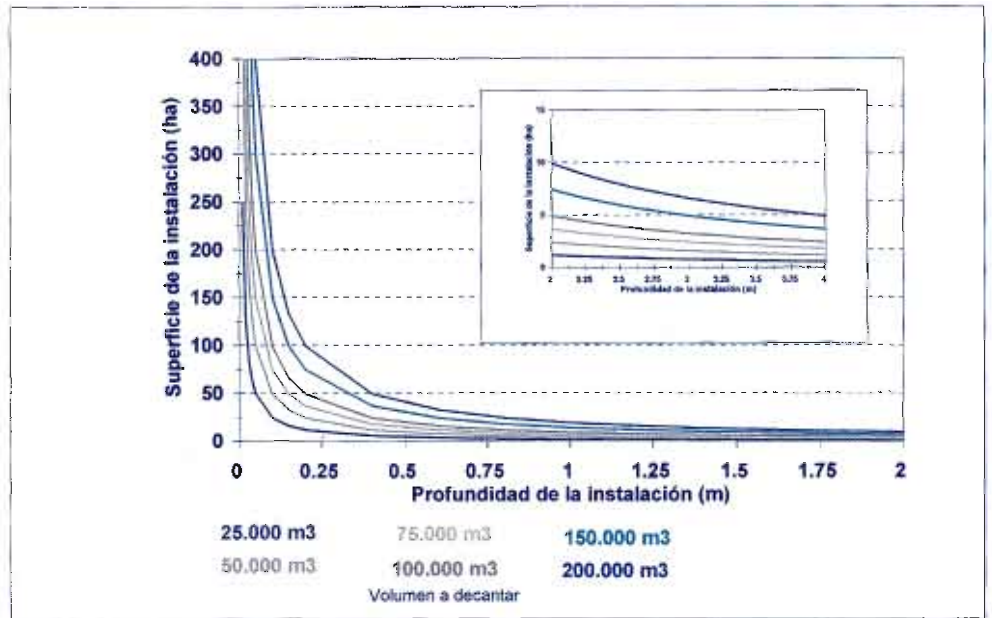
Los filtros muy permeables favorecen una elevada tasa de infiltración a cambio de que algunos colmatantes penetren en el suelo. El resultado final no sólo obliga a retirar y limpiar el filtro, sino también una pequeña porción del terreno subyacente.

Los filtros con una capacidad de infiltración inicial menor pueden provocar una colmatación más rápida, pero la capa colmatante sólo tiene unos pocos centímetros de espesor sobre el lecho del filtro, por lo que basta retirar una pequeña cantidad de material filtrante para restablecer unas condiciones adecuadas de permeabilidad.

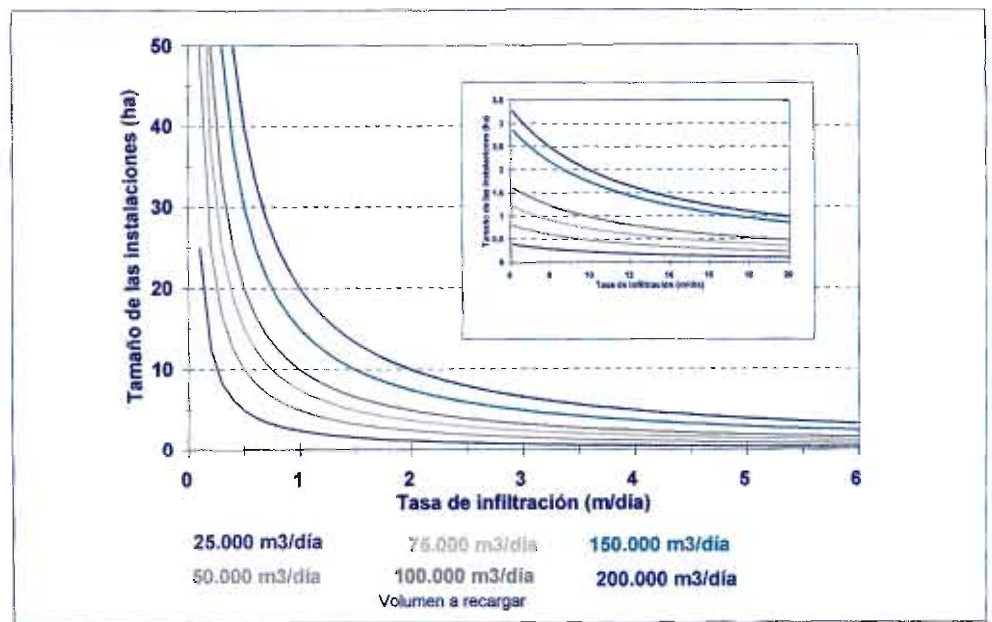


13

En los dispositivos de decantación resulta adecuado incrementar el camino recorrido por el agua a recargar, ya que de esa manera se disminuye su velocidad de circulación y se facilita la deposición de los sólidos en suspensión.



Tamaño de la instalación de decantación en función de su profundidad y del volumen del agua a recargar.



Tamaño de una balsa de recarga en función de la tasa de infiltración y del volumen del agua a recargar.

En instalaciones de tipo profundo se debe evitar, además, la inyección de aire, bien directo o por vaporización, inyectando el agua bajo el nivel piezométrico, evitando las depresiones piezométricas y evacuando el aire mediante ventosas perforadoras.

Métodos y equipos de control y seguimiento

La correcta ejecución y aplicación de la técnica de la recarga artificial de acuíferos precisa de operaciones de control y seguimiento que permitan, por un lado, cuantificar los efectos que se producen en cantidad y calidad sobre las aguas del acuífero y, por otro, una toma de decisión rápida y adecuada para lograr una correcta gestión de la operación de infiltración, así como de la posterior recuperación del agua recargada.

Los parámetros que deben controlarse con una mayor rigurosidad son el nivel piezométrico y la hidroquímica del agua subterránea, así como el caudal y la calidad del agua de recarga.

La medida de estos parámetros puede hacerse de forma continua o discontinua. Si se opera de manera discontinua, habrá que diseñar una campaña de medidas y toma de muestras lo suficientemente amplia, tanto en el tiempo como en el espacio, como para poder disponer de series de datos que permitan analizar el comportamiento de la recarga artificial con un alto grado de confianza.

El control continuo de la recarga artificial proporciona una información más amplia y detallada, y permite conocer reacciones puntuales de corta duración que no pueden detectarse mediante un control discontinuo.

El instrumento a utilizar, para el control continuo de caudales, es el caudalímetro. La tipología y características del aparato a instalar vendrán determinados en función del tamaño y tipo de la conducción por donde circula el agua de recarga, así como por la cuantía volumétrica del caudal circulante y la calidad (sólidos en suspensión) del mismo.

Para el control de los niveles piezométricos se suelen utilizar sondas automáticas de control de nivel o limnigrafos instalados en piezómetros contruidos al efecto. Normalmente, las sondas de registro continuo que se instalan en los pozos o sondeos también pueden controlar la conductividad y la temperatura.

También es necesario contemplar la instalación de turbidímetros. Estos aparatos miden la turbidez del agua que es relacionable con la cantidad de sólidos en suspensión que lleva el fluido. Cuando la cantidad de sólidos en suspensión supere una determinada cuantía preestablecida se desviará el agua que penetra a las instalaciones de infiltración, ya que los sólidos en suspensión condicionan la vida útil de las instalaciones debido al fenómeno conocido como colmatación.

Instalaciones de transporte del agua de recarga

Para conducir el agua de recarga hasta las instalaciones de infiltración es necesario disponer de una infraestructura de conducción adecuada o, en su caso, construirla. Estas conducciones pueden ser tuberías, acequias, canales, etc. En algunos casos será necesario construir depósitos o estructuras de almacenamiento de agua.



14

Los caudalímetros permiten conocer el caudal instantáneo y acumulado que circula por las conducciones que transportan el agua a recargar.



15

A la entrada y a la salida de las instalaciones de recarga artificial es conveniente instalar dispositivos de control de caudal para cuantificar el volumen de agua realmente introducido en el acuífero.

El sistema de transporte a elegir en cada caso concreto dependerá en gran medida de la infraestructura que exista en la zona donde se vaya a realizar la operación de recarga artificial. En muchas zonas en las que esta técnica puede ser aplicable ya existe una red de acequias desarrollada, y en estos casos no cabe duda de que esta red debe usarse y, en su caso, mejorarse o completarse, para las operaciones de recarga artificial.

La infraestructura de conducción, transporte y almacenamiento de agua puede adquirir, en ocasiones, una gran dimensión.

COLMATACIÓN

Con toda seguridad, el mayor problema con el que se enfrenta la recarga artificial de acuíferos es el de la colmatación, entendiéndose por tal el proceso de acumulación de materiales sobre la superficie de infiltración del agua. Su efecto es una reducción de la capacidad de recarga.

La colmatación puede deberse a efectos mecánicos, actividad biológica y procesos químicos.

La recarga artificial, en lo referente a los fenómenos de colmatación, exige unos condicionantes muy rigurosos en lo que respecta al agua de recarga. La afección sobre la tasa de infiltración es tan importante que incluso en los casos donde se opera con una baja concentración de sólidos en suspensión es necesario programar sistemas de limpieza y descolmatación de las instalaciones. Al cabo de un cierto tiempo y volumen de agua recargado es posible que se tengan que abandonar los dispositivos de recarga al no poderse regenerar su capacidad de infiltración con caudales operativos. Este proceso de degeneración de la capacidad inicial de infiltración se traduce en la necesidad de estimar la vida útil de las instalaciones y realizar, en función de la misma, los estudios económicos pertinentes para cuantificar su rentabilidad. Datos proporcionados por instalaciones americanas indican que la vida útil en las balsas es ligeramente superior a diez años y en los pozos de cinco a diez años. No obstante, en las infraestructuras de gran envergadura pueden alcanzarse órdenes de magnitud de hasta veinte años, o incluso superiores.