



Guía Metodológica

MARCO OPERATIVO PARA PROYECTOS
DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS



Mejor Riego
para Chile

yo
cuido
el agua



Contenidos

1	Introducción	3
1.1	Alcance de esta guía	3
1.2	Cómo usar esta guía	6
1.3	Antecedentes del marco legal en Chile	6
2	Métodos de Recarga de Acuíferos Gestionada	8
2.1	Componentes de recarga	8
2.2	Métodos de recarga	9
2.3	Selección de método	14
3	Desarrollo y gestión de Recarga Acuíferos Gestionada	16
3.1	Marco de desarrollo y gestión de proyectos	16
3.2	Fichas descriptivas de métodos de recarga	21
4	Bibliografía	37

1 Introducción

La **Recarga de Acuíferos Gestionada (RAG)**¹ es un término general que designa el conjunto de métodos utilizados para recargar agua adicional a los acuíferos de manera **intencional** para su recuperación y uso posterior o con el propósito de generar un beneficio ambiental (Dillon, 2005). Anteriormente conocido como recarga artificial de acuíferos, RAG incorpora el concepto de **gestión** como un componente clave a su desarrollo. Los acuíferos ofrecen capacidades potenciales de almacenaje con magnitudes similares a los embalses, pero con una menor inversión de capital y menores impactos sociales y medioambientales.

Esta Guía Metodológica es producto del proyecto “Marco operativo para proyectos de recarga artificial de acuíferos” realizado por la Comisión Nacional de Riego a través de CSIRO y proporciona una herramienta práctica para el desarrollo de proyectos RAG en el sector agrícola. El informe final de este proyecto contiene información más detallada sobre el desarrollo de esta guía.

1.1 Alcance de esta guía

Esta Guía Metodológica está principalmente orientada a **los Usuarios(as) y Organizaciones de Usuarios(as) de Agua** para el desarrollo de proyectos de RAG en el **sector agrícola** en Chile. Tiene por objetivo dar a conocer las distintas técnicas de RAG y los requerimientos para implementar un proyecto de este tipo, desde requerimientos técnicos, económicos hasta administrativos. Se proporciona una vía de transición, en la que la información básica fácilmente observable en un sitio de recarga de acuíferos existente o propuesto se utilice para mejorar la seguridad y desempeño de un proyecto.

La implementación de esta Guía para la recarga de **acuíferos no confinados**² con fines de apoyo al riego es un paso hacia un suministro de agua más seguro y hacia una mejor protección de las aguas subterráneas que la práctica actual en Chile. Se espera que la aplicación de esta Guía acelere el progreso de los proyectos de RAG de bajo riesgo, reduzca la incertidumbre y el estancamiento de otros proyectos de recarga, de manera de minimizar fallas futuras.

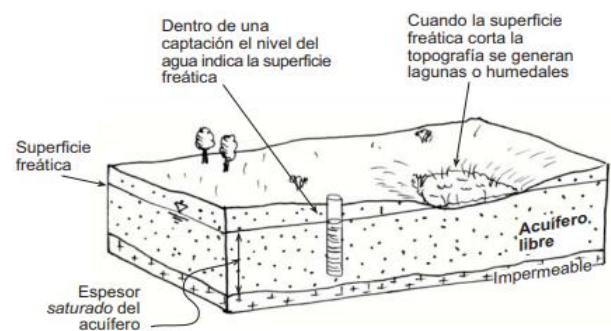


Figura 1. Acuífero no confinado o libre (Sánchez, 2011)

El **alcance** de esta Guía se centra en las aplicaciones de RAG limitadas a las siguientes condiciones:

1. Disponer de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAAs) superficiales posibles de infiltrar.
2. La fuente de agua se restringe a agua superficial sin mayor intervención previa (es decir, agua de lluvia o de ríos).
3. Los acuíferos objetivo son no confinados (o libres) y no saturados.
4. El uso final del agua recuperada se restringe al respaldo para la agricultura de riego.

¹ Managed Aquifer Recharge (MAR) en inglés.

² Acuíferos no confinados (ver **Figura 1**) se caracterizan por ser superficiales y libres. Son aquellos que su límite superior (la superficie freática) está a presión atmosférica (Sanchez, 2011).

A continuación, la **Tabla 1** compara el alcance de esta Guía en relación con las Guías de la Organización Mundial de Salud (OMS) (2011) y las Guías Australianas de RAG (NRMCC-EPHC-NHMRC, 2009).

Tabla 1. Comparación de la cobertura de esta Guía con otras guías internacionales relacionadas a la Recarga de Acuíferos Gestionada (RAG).

Cobertura	Esta Guía (CNR)	Guías de la OMS sobre agua potable	Guías Australianas de RAG
Tipo de Fuente de Agua			
Agua superficial rural sin mayor intervención *	✓	✓	✓
Aguas pluviales urbanas			✓
Aguas residuales tratadas			✓
Aguas desalinizadas			✓
Aguas residuales industriales			✓
Tipo de Acuífero			
No confinado	✓	✓	✓
Confinado		✓	✓
Condición del Agua Subterránea			
Agua subterránea no utilizada para beber**	✓		✓
Agua subterránea utilizada para beber localmente	✓	✓	✓
Agua subterránea utilizada para el suministro público de agua potable		✓	✓
El agua subterránea sostiene ecosistemas sensibles			✓
El agua subterránea es salobre	✓		✓
El agua subterránea está contaminada			
Metodología			
Evaluación de cuenca		✓	✓
Evaluación de escritorio basada en datos disponibles, incluso si es limitada	✓	✓	✓
Evaluación de riesgos basada en investigaciones y datos de monitoreo		✓	✓
Programas de monitoreo	✓	✓	✓
Manejo de obstrucciones	✓		✓
Recuperación en acuíferos salobres	✓		✓
Reacciones biogeoquímicas en acuíferos			✓

Cobertura	Esta Guía (CNR)	Guías de la OMS sobre agua potable	Guías Australianas de RAG
Costo y confianza			
Bajo costo y facilidad de implementación	✓	✓	
Mejora la protección de la salud	✓	✓	✓
Alta confianza en la protección de la salud***		✓	✓
Alta confianza en la protección del medio ambiente***			✓

* Agua lluvia y agua de ríos

** Se refiere a todos los usos de agua con la excepción del uso de agua potable, ej. riego, industrial, ambiental, minero, etc.

*** La guía tiene un enfoque en proyectos de RAG del sector agrícola y por lo tanto no aborda estos aspectos en profundidad, es decir, no garantiza 100% confianza en la protección de la salud o medio ambiente, sin embargo, busca reducir significativamente el riesgo frente a estos aspectos que posiblemente presentan proyectos actuales de RAG

Esta Guía cubre una gama limitada de tipos de fuentes de agua, sistemas de acuíferos y usos del agua debido principalmente a su **enfoque para fomentar proyectos de RAG en el sector agrícola**, por lo que no aborda problemáticas asociadas al agua potable, por nombrar un ejemplo. La **Figura 2** describe el alcance y enfoque de esta Guía.

Recarga de agua subterránea	No Gestionada			Gestionada			
	Descarga de aguas	Recarga incidental	Intencional pero no gestionada	RAG a escala doméstica	RAG a escala comunitaria	RAG a escala comercial	RAG a escala comercial con estricta regulación
Gestión de riesgos	Ninguno	Ninguno	Ninguno	Cualitativo simplificado	Encuesta sanitaria, plan de seguridad del agua	Cuantitativo basado en el riesgo	Basado en riesgo y con criterios
Ejemplo	Pozos secos	Desmante	Modificación del cauce	Infiltración de escorrentía en el techo	Piscinas de infiltración	Aguas pluviales comerciales ASR	Gran escala en acuífero de agua potable
Costo relativo / complejidad	N/a	N/a	N/a	Bajo	Bajo	Medio	Alto
Fuente de agua	N/a	N/a	Aguas naturales	Aguas naturales	Aguas naturales	Cualquier	Cualquier
Tipo de Acuífero	No Confinado	No Confinado	No Confinado	No Confinado	No Confinado	No Confinado/ confinado	No Confinado/ confinado
Uso finales adecuados	Desconocida	Desconocida	Desconocida	Solo agua no potable*	Solo agua no potable*	Cualquier	Cualquier

*a menos que sea tratada y potabilizada

riesgos no gestionados

complejidad, costo, confianza, flexibilidad, nivel de riesgo gestionado

Mayor complejidad y gestión

Figura 2. Enfoque y alcance de esta Guía para fomentar la RAG en Chile para el sector agrícola. Tiene un enfoque en proyectos de recarga intencionales y gestionados desde una escala doméstica hasta una escala comercial.

Existen limitaciones en términos de recopilación de datos que permitirían brindar asesoramiento confiable, particularmente sobre los riesgos para la salud pública y la liberación de metales tóxicos en acuíferos. Por lo tanto, el hecho de seguir esta Guía pretende hacer que la recarga sea **más segura que la práctica actual** y no que sea necesariamente 100% segura.

1.2 Cómo usar esta guía

Esta Guía proporciona una herramienta práctica **orientada a los Usuarios(as) de agua y las Organizaciones de Usuarios(as) de Agua** para desarrollar un proyecto RAG o mejorar su práctica actual enfocado en el **sector agrícola**. Ayuda a identificar los riesgos potenciales de la implementación de proyectos y medidas que los reduzcan, a fin de hacer más segura la reposición de aguas subterráneas. Se puede aplicar a proyectos de recarga no gestionados existentes y al desarrollo de nuevos proyectos. También puede utilizarse junto con otras guías existentes, como requisito previo para la inversión pública.

La Guía incluye una breve introducción a los diferentes **métodos de RAG** que se consideran los más relevantes para el sector agrícola en Chile. También se proporciona información para ayudar a seleccionar el método más apropiado dependiendo de los factores particulares de cada proyecto. Luego se resume el **marco de desarrollo y gestión de proyectos RAG**³ recomendado para su aplicación en Chile en el sector agrícola. Finalmente, se ha desarrollado una serie de **fichas descriptivas** de los diferentes métodos de RAG que entregan una descripción del método, las principales consideraciones para su desarrollo, operación y mantención, y casos de aplicación.

1.3 Antecedentes del marco legal en Chile

La RAG, o la recarga artificial de acuíferos, como es ampliamente conocido en Chile, está recogida en el ordenamiento jurídico chileno a través del Código de Aguas^{4,5} que contempla la realización de obras de RAG (artículos 66 y 67) y regula la gestión de los derechos, y del Reglamento Sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas (artículos 47 a 50, DGA, 2013).

Por otra parte, existen una serie de leyes y normas ambientales que son relevantes a considerar^{6,7,8}, a pesar de que no son específicas a la RAG. A pesar de lo anterior, la legislación actual en Chile al respecto a la RAG tiene un carácter bastante general y confuso.



³ En el Informe Final del proyecto CNR 2020, se encuentra una elaboración completa del marco de desarrollo y gestión de proyectos. Se recomienda seguir este marco proporcionado para el desarrollo de su proyecto RAG.

⁴ Código de Aguas: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=5605>

⁵ D.S 203/2013 Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1060095>

⁶ Ley 19.300 Sobre Bases Generales del Medio Ambiente (1994): <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=30667>

⁷ DS.40/2012 Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1053563>

⁸ DS. 46/2002 Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=206883>

Con el objetivo de abordar esta brecha, en los últimos años la DGA ha publicado una serie de normativas circulares para clarificar algunos aspectos de la legislación existente^{9,10,11}.

Actualmente, existe una Indicación Sustitutiva al Proyecto de Ley presentada al Senado el 31 de enero de 2019, el cual propone incorporar una nueva sección sobre la “Recarga artificial de acuíferos” en el Código de Aguas (Fundación Chile, 2019). Lo cual, en parte, tiene por propósito establecer una gestión coordinada del agua entre la DGA y las Organizaciones de Usuarios de Aguas.

Para más información sobre el marco legal relacionado con la RAG en Chile, revisar el Informe Final del proyecto CNR 2020 (Sección 1.3) y su Anexo respectivo.



⁹ Circular N°4 DGA, Sep 2016:

https://dga.mop.gob.cl/legislacionynormas/normativascirculares/Circulares/circular_4_2016.pdf

¹⁰ Circular N°1 DGA, Feb 2019:

https://dga.mop.gob.cl/legislacionynormas/normativascirculares/Circulares/Circular_1_febrero.pdf

¹¹ Circular N°2 DGA, Abr 2019: https://dga.mop.gob.cl/legislacionynormas/normativascirculares/Circulares/Circular_N2.pdf

2 Métodos de Recarga de Acuíferos Gestionada

2.1 Componentes de recarga

Comúnmente hay seis elementos que están presentes en proyectos de RAG como se muestra en la **Figura 3** y que están descritos usando ejemplos en la **Tabla 2**.



Figura 3. Ejemplo de la recarga de acuíferos gestionada con piscinas de infiltración para el sector agrícola. *Elaboración propia.*

Tabla 2. Componentes de un sistema de recarga de acuíferos gestionada, modificada de NRMCC-EPHC-NHMRC, 2019 ¹².

Componente	Ejemplos
1. Zona de captura	<ul style="list-style-type: none"> • Presa, piscina de detención, humedal, canal
2. Pretratamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas pasivos ej. humedales, biofiltro, balsas de decantación • Sistemas de ingeniería ej. filtro de arena
3. Recarga	<ul style="list-style-type: none"> • Infiltración ej. piscina, canal, zanja, pozo seco, lecho del río • Pozo de inyección
4. Almacenamiento subterráneo	<ul style="list-style-type: none"> • El acuífero donde se almacena el agua
5. Recuperación	<ul style="list-style-type: none"> • Pozo de recuperación • Descarga intencional a un ecosistema dependiente del agua subterránea
6. Uso final	<ul style="list-style-type: none"> • Riego agrícola, agua de proceso industrial*, suministro de agua potable*, beneficio ambiental ej. sostener ecosistemas acuáticos, restaurar acuíferos agotados (un postratamiento, ej. microfiltración o cloración, puede ser necesario según el uso final del agua)

*No cubierto en esta guía

¹² Guías Australianas para el Reciclaje de Agua: Gestión de Riesgos a la Salud y el Medioambiente (Fase 2) Recarga de Acuíferos Gestionada. http://www.nepc.gov.au/system/files/resources/5fe5174a-bdec-a194-79ad-86586fd19601/files/wq-agwr-gl-managed-aquifer-recharge-final-200907_1.pdf

2.2 Métodos de recarga

El método elegido para la recarga depende de las condiciones específicas del sitio y no hay reglas definidas o soluciones únicas para cualquier escenario dado. En definitiva, la decisión sobre qué método aplicar dependerá de una **serie de factores** que incluyen el costo, el suelo y las condiciones hidrogeológicas locales, la calidad de la fuente de agua y el área de terreno disponible, entre otros factores potenciales. **El tipo de acuífero es normalmente la primera consideración** en la selección del método de recarga. Esta guía se centra en técnicas basadas en infiltración para recargar **acuíferos no confinados** con agua superficial.



Hay tres grupos de métodos basados en infiltración para recargar acuíferos no confinados:

- 1) Fuera del cauce
- 2) Dentro del cauce
- 3) Pozos secos

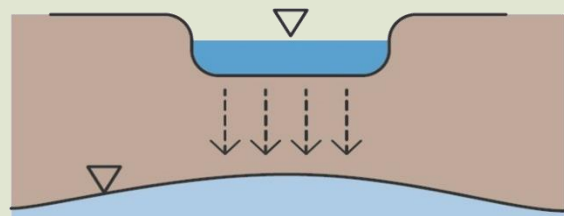
A continuación, se describen los principales métodos de cada grupo que se consideran relevantes para el sector agrícola y que se encuentren abordados por esta guía.

FUERA DEL CAUCE

Piscinas de infiltración

Las **piscinas de infiltración** generalmente se construyen fuera del cauce donde se desvía el agua superficial, ya sea por gravedad o por bombeo, y se recolecta en una o más piscinas de poca profundidad y de gran área de superficie. El agua se infiltra a través de la zona no saturada hacia el acuífero no confinado. Este método requiere una superficie suficiente para ubicar las estructuras de la piscina que generalmente ocupan áreas de unas pocas hectáreas para esquemas que recargan alrededor de 1 hm^3 ¹³ de agua por año, hasta decenas o cientos de hectáreas

para esquemas más grandes que recargan alrededor de 100 hm^3 o 1000 hm^3 de agua por año. La permeabilidad debe permitir tasas de infiltración¹⁴ suficientes para recargar el volumen de agua requerido durante el tiempo que esté disponible, normalmente se requiere $\geq 0.5 \text{ m/día}$.



¹³ El hectómetro cúbico (o hm^3) es una unidad de volumen que representa un millón de metros cúbicos.

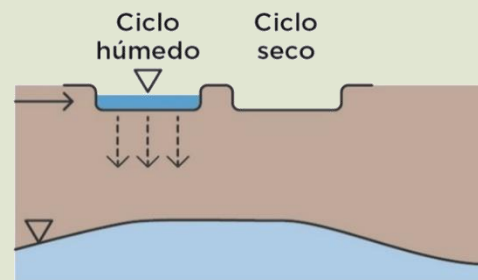
¹⁴ La tasa de infiltración es una medida de la tasa a la cual el suelo es capaz de absorber el agua.

Tratamiento suelo-acuífero

El **tratamiento suelo-acuífero (SAT)** es una variación del método de piscinas de infiltración, que generalmente se aplica (pero no exclusivamente) a la recarga del efluente de aguas residuales tratadas.

El agua se recarga de forma intermitente utilizando ciclos húmedos y secos para facilitar la eliminación de nutrientes y patógenos.

Igual que en el método de piscinas de infiltración, la permeabilidad del suelo es crítica para mantener las tasas de recarga.

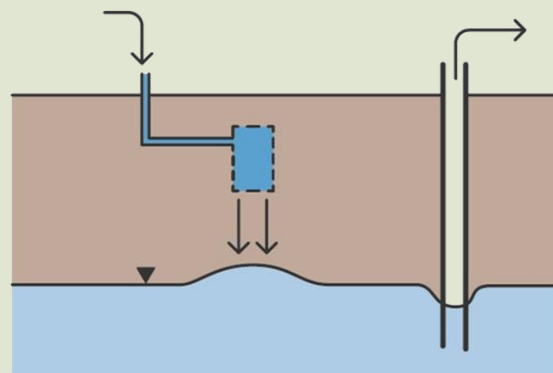


Galerías de infiltración

Las **galerías de infiltración** son, esencialmente, zanjas de percolación cubiertas que contienen un medio (material de suelo) o una estructura de soporte con espacios vacíos internos para facilitar la infiltración (Bekele et al., 2013). Este método ocupa menos espacio que las piscinas de infiltración y utiliza el espacio subterráneo.

Como no hay cuerpos de agua abiertos, se evitan algunos peligros, por ejemplo, crecimiento de algas, problemas de olor,

plagas de insectos y/o problemas asociados a la seguridad pública.



Zanjas de infiltración

Las **zanjas de infiltración** son canales construidos en laderas que tienen el objetivo de captar el escurrimiento de agua, evitar procesos erosivos y conservar el suelo y el agua. Las zanjas son relativamente poco profundas y permiten la infiltración de agua principalmente en el suelo, pero también pueden recargar los acuíferos poco profundos y no confinados. Este método requiere una superficie suficiente para ubicar las estructuras. En las laderas con fuertes pendientes las zanjas suelen ser estrechas y profundas, en pendientes leves pueden tener varios metros de ancho.

La serie de zanjas que conforman la zanja de infiltración están conectadas entre sí por una especie de tabique bajo, el cual facilita el paso del agua entre una y otra zanja, cuando una de ellas se ha llenado.

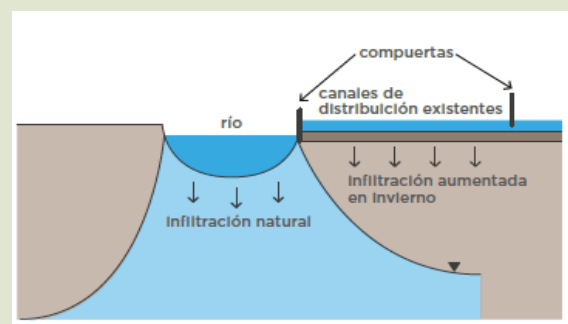


Canales de infiltración

Este método utiliza **canales existentes** no revestidos fuera de la temporada de riego, manteniendo las bocatomas abiertas para permitir la entrada de excedentes de caudales y así aumentar la infiltración de agua a las napas subterráneas.

También se pueden construir **nuevos canales** que desvían y capturan la escorrentía de aguas lluvias proveniente de las laderas altas y zonas afectadas por la erosión, llevándola hasta

áreas protegidas y de baja pendiente, para así conservar el suelo y facilitar la infiltración adicional de agua.

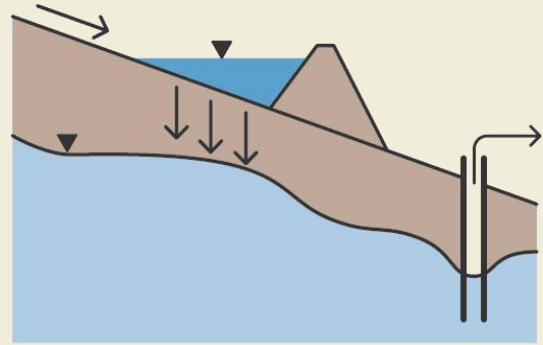


DENTRO DEL CAUCE

Estanques de percolación

Los **estanques de percolación** son construidos en ríos intermitentes¹⁵ donde el agua se detiene y se infiltra en el lecho para aumentar el almacenamiento en acuíferos no confinados, que luego puede ser extraída aguas abajo. Esta técnica es más efectiva cuando el curso del agua es relativamente estrecho y la topografía adyacente permite construir muros de represas. También se puede aplicar en serie en un mismo río para

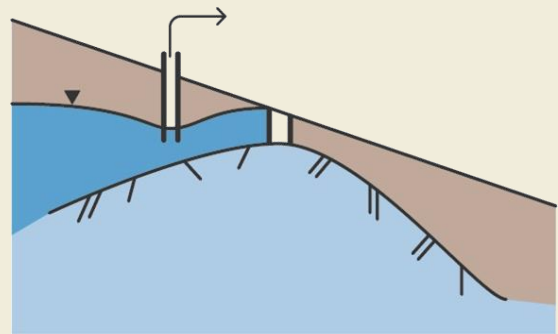
capturar y recargar agua en varios puntos a lo largo del flujo.



Represas subterráneas

Las **represas subterráneas** se aplican en ríos intermitentes donde la roca madre crea restricciones de flujo de agua subterránea. Se construye una zanja a través del lecho del río y se excava en la roca madre que luego se rellena con material de baja permeabilidad para ayudar a retener los flujos en el material aluvial¹⁶ saturado. Esta técnica es útil cuando los gradientes y las velocidades del agua subterránea (conductividad hidráulica) son altas, ya que la presa subterránea retiene el

agua recargada en la zona para que las respuestas de la capa freática y los beneficios se obtengan localmente.



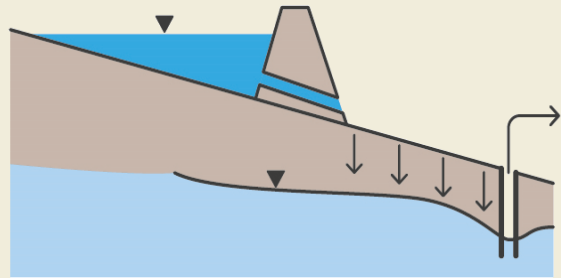
¹⁵ Ríos intermitentes (también conocidos como ríos efímeros) refieren a ríos con un régimen particular, que tienen caudales superficiales de forma temporal durante y después de un período de lluvia en la localidad inmediata.

¹⁶ Material suelto depositado por las aguas de escorrentía superficial.

Descargas de aguas de represas

El método de recarga de **descargas de aguas de represas** contempla la utilización de represas en ríos intermitentes para detener y liberar el agua lentamente aguas abajo, lo que coincide con la capacidad de infiltración a través del lecho del río al acuífero y por ende la recarga aumenta significativamente. La modificación del lecho del río para aumentar la recarga aguas abajo de los embalses puede hacer uso de la infraestructura existente para proporcionar capacidad de almacenamiento adicional y

permitir que el almacenamiento en superficie se gestione de manera diferente, por ejemplo, contar con espacio adicional para fines de mitigación de inundaciones y para capturar flujos adicionales.

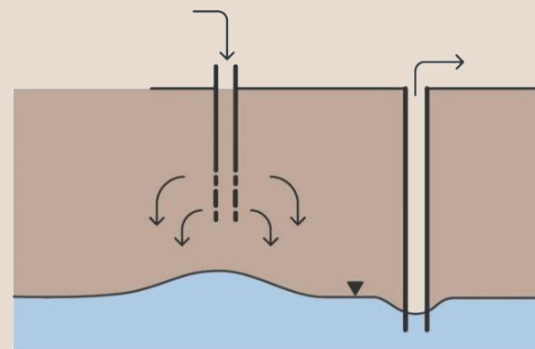


POZOS SECOS

Pozos secos

Los **pozos secos**¹⁷ son una técnica de infiltración que usa pozos de gran diámetro para recargar un acuífero no confinado por gravedad. Este es un método útil para emplear cuando hay capas de suelos de baja permeabilidad (por ejemplo, ricos en arcilla) en los primeros metros de superficie. Los pozos secos también se pueden usar para recargar directamente a través de una zona profunda no saturada, de modo que el agua llegue a la zona saturada más rápidamente

para observar una respuesta más inmediata de la capa freática.



¹⁷ Similares a pozos norias, pero también conocidos como pozos de la zona vadosa o pozos de gravedad.

2.3 Selección de método

Como se mencionó anteriormente, existen varios factores que influyen en la selección de un método de RAG, como **su costo** de implementación, operación y mantenimiento; **la permeabilidad del suelo** (por ejemplo, suelos con una muy baja permeabilidad puede significar la necesidad de utilizar pozos); **la calidad de la fuente de agua**, (por ejemplo, una turbidez alta puede no ser adecuada para métodos con pozos porque se obstruirán rápidamente); **la disponibilidad de terreno** rentable (por ejemplo, si hay espacio limitado será necesario hacer pozos de infiltración); entre otros.

La **Tabla 3** presenta una comparación sencilla entre diferentes criterios de selección para diferentes métodos de RAG.

Tabla 3. Criterios de selección del método de recarga

Método de recarga	Costo de inversión	Baja permeabilidad de suelo	Requerimiento de calidad de agua	Superficie requerida
Fuera del cauce				
Piscinas de infiltración	*	X	**	***
Galerías de infiltración	***	✓	***	**
Tratamiento suelo-acuífero (SAT)	**	X	*	***
Canales de infiltración (existentes)	*	X	*	*
Zanjas de infiltración	*	X	*	**
Dentro del cauce				
Estanques de percolación	**	X	**	**
Represas subterráneas	***	X	*	**
Descarga de agua de represa	*	X	*	*
Pozos secos				
Pozos secos (de la zona vadosa)	***	✓✓	***	*

* Bajo; ** mediano; *** alto; X no adecuado para penetrar capas de baja permeabilidad; ✓ adecuado para penetrar capas poco profundas de baja permeabilidad; ✓✓ adecuado para penetrar capas profundas de baja permeabilidad.

En la **Tabla 4** se proporciona un ejemplo de cómo se aplican y evalúan los criterios de selección (**Tabla 3**) de un método de recarga.

Tabla 4. Ejemplo de evaluación de criterios para el método de recarga a través de canales de riego (distribución).

Criterio	Respuesta	Justificación
Costo de inversión	Bajo	Se utiliza infraestructura existente
Penetración de capas de baja permeabilidad	No adecuado para penetrar capas de baja permeabilidad	Los canales son estructuras superficiales y no evitan capas de baja permeabilidad
Requerimiento de calidad de agua	Bajo	Son relativamente fáciles de limpiar y no obstruyen tan rápido
Superficie requerida	Baja	Se utiliza infraestructura existente

A continuación, se presentan factores generales que puedan afectar la configuración, costo y el tamaño de la obra, los que pueden variar según condiciones locales:

Tabla 5. Factores que pueden afectar el diseño de la obra de recarga

Factor	A considerar
Método de recarga	<ul style="list-style-type: none"> • Métodos dentro del cauce son más baratos que los fuera del cauce • Pozos tienden a ser más caros
Requerimiento de grandes tasas de infiltración	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita material más permeable • Trabajos de tierra más extensos • Estructuras de recarga más grandes
Necesidad de evitar capas de baja permeabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Costos aumentan con profundidad
Área de superficie	<ul style="list-style-type: none"> • Altas tasas de infiltración requieren mayor superficie • Métodos dentro del cauce y pozos requieren menos superficie
Resistencia a la colmatación (calidad de agua)	<ul style="list-style-type: none"> • En Sistemas SAT¹⁸ son más fáciles de mantener y limpiar las capas de obstrucción (en comparación con las galerías de infiltración, por ejemplo) • Pozos tienden a ser más difíciles de manejar y limpiar, por lo requieren una mayor calidad de agua
Facilidad de acceso	<ul style="list-style-type: none"> • Para la construcción, mantención y limpieza
Necesidad de evitar insectos o animales	<ul style="list-style-type: none"> • Plagas de insectos pueden ser más comunes en piscinas de infiltración • Evitar atracción de aves cerca de aeropuertos (ej. a piscinas)

¹⁸ Tratamiento Suelo-Acuífero (ver descripción de método fuera del cauce).

3 Desarrollo y gestión de proyectos de Recarga Acuíferos Gestionada

3.1 Marco de desarrollo y gestión de proyectos

Esta sección tiene por objetivo resumir el marco de desarrollo y gestión metodológica sugerida para el desarrollo de proyectos RAG en Chile en el sector agrícola. En esencia, esta Guía aplica elementos del enfoque de planificación de la seguridad del agua de la Guías de la OMS (2011) para proteger la calidad del agua potable. También se basa en gran medida en la etapa preliminar de la evaluación extraída de las Guías Australianas de RAG (NRMMC-EPHC-NHMRC, 2009) e incorpora una encuesta sanitaria¹⁹ para identificar los peligros probables en el sistema de RAG.

Esta Guía tiene un enfoque de desarrollo por fases, lo que tiene dos principales ventajas:

- i) Inicialmente se requiere un bajo nivel de esfuerzo, inversión y complejidad **que aumenta gradualmente a medida que el proyecto avanza por las fases de desarrollo;**
- ii) Los riesgos financieros se minimizan **al brindar una oportunidad más temprana de detener los proyectos que se revelan como no viables.**

En primer lugar, se evalúa si la Guía es **aplicable** al tipo de proyecto que se está considerando, ya que este documento tiene un alcance de cobertura restringido a los siguientes criterios:

1. Disponer de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAAs) superficiales posibles de infiltrar.
2. La fuente de agua se restringe a agua superficial sin mayor intervención previa (es decir, agua de lluvia o de ríos).
3. Los acuíferos objetivo son no confinados (o libres) y no saturados.
4. El uso final del agua recuperada se restringe al respaldo para el riego agrícola.

La Guía **no aplica** cuando el proyecto es considerado de alto riesgo y no entrega la seguridad requerida para la salud humana y el medio ambiente.

La **Figura 4** ilustra la secuencia a seguir para el desarrollo de un proyecto RAG, según tipo (escala) de proyecto a realizar.

¹⁹ Para más información sobre la encuesta sanitaria para la identificación de peligros probables de un esquema RAG, consultar la sección 6.4.2 Encuesta Sanitaria, en el Informe final CNR 2020.

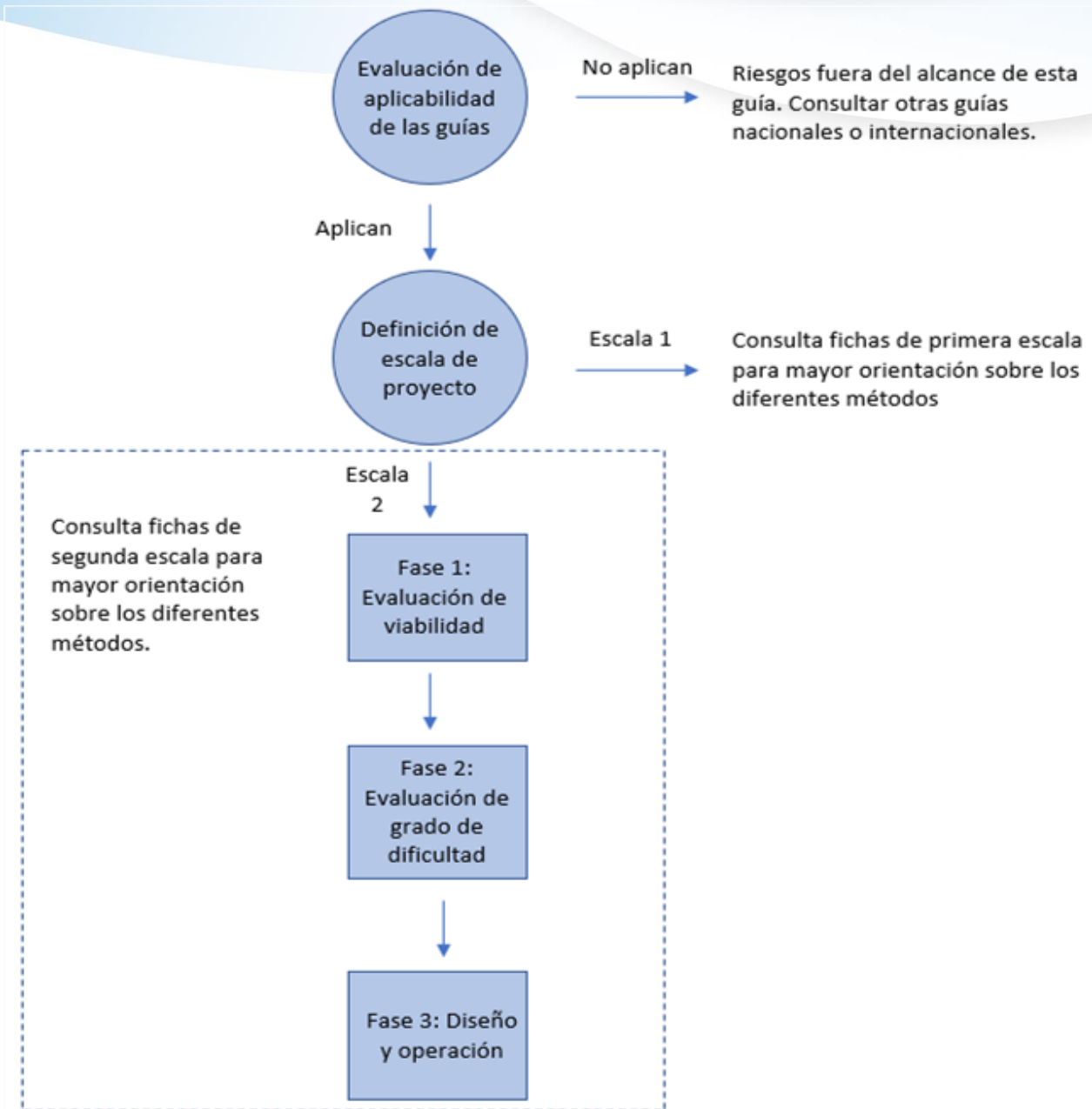


Figura 4. Flujo de trabajo de desarrollo de proyectos para la aplicación de esta Guía.

Si se considera que la Guía es aplicable al proyecto, se procede a la **definición de la escala**, que ayuda entender el nivel de orientación requerida para su desarrollo. Proyectos de **primera escala** son aquellos que son más sencillos (técnica y económicamente) o son de menor riesgo y solo requerían una orientación menor por parte de la Guía. Proyectos de **segunda escala** son aquellos que requieren una mayor orientación y por ende se recomienda seguir el desarrollo por fases.

A continuación, se propone los tipos de proyectos considerados como primera y segunda escala y que a su vez son lo más relevantes para esta Guía y el sector agrícola:

Proyectos de primera escala	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de captación e infiltración de agua lluvia in situ • Canales de infiltración • Zanjas de infiltración
Proyectos de segunda escala	<ul style="list-style-type: none"> • Piscinas de infiltración • Pozos secos • Galerías de infiltración • Métodos de infiltración dentro del cauce

En el caso de esta Guía, se ha definido **3 fases de desarrollo** para los **proyectos de segunda escala**: i) Evaluación de viabilidad; ii) Evaluación de grado de dificultad; y iii) Diseño y operación. En paralelo con el desarrollo de cada fase, se recomienda realizar una **evaluación económica**²⁰, de manera de agregar progresivamente más detalle e información a la evaluación a medida que se avanza a la próxima fase. Este componente es una consideración clave en el desarrollo de un proyecto RAG porque transmite confianza al ejecutor y al inversor que el proyecto es viable.

A continuación, en la Tabla 6 se resumen las tres fases de desarrollo y los principales atributos a evaluar. Con el fin de facilitar al ejecutor a seguir las fases de desarrollo de su proyecto RAG, se ha proporcionada un **formulario que cuenta paso a paso las consideraciones más importantes en el desarrollo de cada fase**²¹. Además, sirve para que el ejecutor puede completar las diferentes secciones de cada fase. Se debería consultar el Informe Final CNR 2020 ²² para facilitar su relleno y se puede usar las fichas descriptivas (Sección 3.2 de esta Guía) para entender más sobre los diferentes métodos de RAG



²⁰ Ver Sección 5 del Informe Final CNR 2020 para más detalles sobre aspectos financieros y económicos de RAG, por ejemplo, análisis de costo-beneficio y el cálculo de costos nivelados (el nivel constante de ingresos necesario cada año para recuperar la inversión, los gastos operativos y de mantenimiento, durante la vida útil del proyecto dividido por el volumen anual del suministro de agua).

²¹ El formulario se encuentra en el Anexo 5 del Informe Final CNR 2020.

²² Ver capítulo 6 del Informe Final CNR 2020.

Tabla 6. Resumen de las fases de desarrollo de un proyecto RAG y los principales atributos a evaluar.

Fase de desarrollo	Descripción	Principales atributos para evaluar
<p>Fase 1: Evaluación de viabilidad</p>	<p>Evalúa la viabilidad aparente de una propuesta de proyecto de recarga utilizando datos e información existente relevante. Su objetivo es informar a los ejecutores de cualquier defecto fatal en el proyecto previsto.</p> <p>En esta fase se espera que el ejecutor tenga una comprensión básica del tipo de proyecto de recarga que se está considerando, por ejemplo, fuente de agua, tipo de acuífero y objetivo de recarga y/o uso final del agua. También se requiere una comprensión de los métodos de recarga posibles y factibles.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Demanda de agua • Disponibilidad de una fuente de agua • Evaluación hidrogeológica • Espacio para capturar y tratar el agua • Capacidad y experiencia • Gobernanza y sostenibilidad económica • Evaluación económica preliminar
<p>Fase 2: Evaluación de grado de dificultad</p>	<p>Evalúa aspectos técnicos con resultados de investigaciones en terreno que serán programadas en función de los resultados del estudio de información existente de la Fase 1, centrándose en las áreas de mayor riesgo e incertidumbre.</p> <p>Se identifica potenciales riesgos asociados al proyecto y se preparan medidas de prevención. Incluye la realización de una encuesta sanitaria para evaluar los peligros potenciales para la salud pública que puedan surgir.</p> <p>Se recomienda realizar una evaluación económica detallada y continuar con la evaluación de viabilidad en esta fase 2, actualizando las realizadas en Fase 1, cuando el sistema implica</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad de la fuente de agua (obstrucción) • Capacidad de almacenamiento del acuífero • Impactos en vecinos y ecosistemas • Presencia de roca reactiva / fracturada (potencial movilización de arsénico) • Encuesta sanitaria (fuentes y rutas potenciales de contaminación) • Aprobación de desarrollo • Evaluación económica detallada

Fase de desarrollo	Descripción	Principales atributos para evaluar
	<p>un costo importante (ej. requiere un esquema piloto antes de su operación final), así determinar si el proyecto requiere una mayor inversión.</p>	
<p>Fase 3: Diseño y operación</p>	<p>Se recomienda realizar un piloto²³ o al menos pruebas de recarga²⁴ en el sitio elegido antes de su operación final, particularmente si es un esquema relativamente grande, permitiendo un escalamiento más controlado.</p> <p>Los datos recopilados en terreno se utilizarán para realizar evaluaciones similares a las descritas anteriormente (Fase 1 y 2), pero a un nivel de evaluación más detallado.</p> <p>Los resultados permitirán la formación de un plan de operación y mantenimiento para la ejecución del esquema a largo plazo, así como un plan de gestión de riesgos.</p> <p>El diseño y la construcción generalmente representa la mayoría de los gastos de un proyecto de RAG. Las fases de diseño se pueden dividir en diseño 'funcional' y 'detallado', un insumo clave para la evaluación económica final (actualizada de Fase 1 o Fase 2).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Piloto o pruebas de recarga • Diseño funcional y detallado • Evaluación económica final • Plan operacional preliminar • Gestión de proyecto a escala operacional • Plan de Seguridad del Agua (PSA)

²³ Un esquema piloto es un ensayo de un sistema de recarga (generalmente durante varias temporadas) que utiliza la misma fuente de agua que el esquema final. El piloto incluye la construcción/prueba del proceso de pretratamiento de agua.

²⁴ Una prueba de recarga suele utilizar la fuente de agua más cercana y fácilmente disponible para su inyección. Generalmente es de menor duración (semanas a meses) en comparación con un plan piloto (meses a años).

3.2 Fichas descriptivas de métodos de recarga

En esta sección se adjunta las fichas descriptivas desarrolladas para diferentes métodos de infiltración que se considera **más relevantes para esta Guía y el sector agrícola** en Chile.

Las fichas proporcionan información relevante sobre cada método, que incluyen una descripción general, plazos de implementación y costos, requerimientos para su diseño, construcción y monitoreo, y ejemplos de casos de aplicación en Chile o internacionalmente.

Las fichas han sido agrupadas en dos tipos de proyectos, según la definición de escalas en la sección anterior. La secuencia de las fichas sigue la numeración indicada en la cuadro a continuación:

Proyectos de **primera** escala

- 1.1** Sistemas de captación e infiltración de agua lluvia in situ
- 1.2** Canales de infiltración
- 1.3** Zanjas de infiltración

Proyectos de **segunda** escala

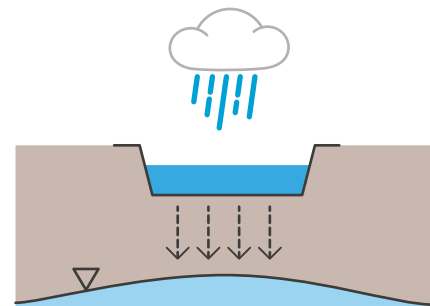
- 2.1** Piscinas de infiltración
- 2.2** Pozos secos
- 2.3** Galerías de infiltración
- 2.4** Métodos de infiltración dentro del cauce

Sistemas de captación e infiltración de aguas lluvias *in situ*

Descripción

Los sistemas de aguas lluvias *in situ* se refieren a aquellos que no requieren una infraestructura mayor para desviar el agua hacia su almacenamiento e infiltración. Es una técnica ampliamente utilizada en zonas rurales para la acumulación superficial de agua y es cada vez más utilizada para aumentar la infiltración natural de acuíferos. Se usa en todos los niveles, desde el doméstico hasta el de predio y existen diferentes métodos para ello.

Los techos impermeables son ampliamente utilizados para volúmenes menores de agua, desviando las aguas lluvias hacia un tanque o noria de almacenamiento. Para volúmenes mayores de agua, se puede recolectar las aguas lluvias en tranques o piscinas de infiltración. Las aguas lluvias se almacenan temporalmente hasta que se infiltran a través del fondo y los lados. Generalmente son poco profundas y aprovechan la existencia de depresiones naturales en suelos permeables o excavados en el terreno.



Fuentes de agua



Agua de lluvia



Desviación de ríos



Escorrentía

Plazos y costos

Rápida construcción e instalación → Días a semanas

Costos relativamente bajos (en comparación con otros métodos de recarga)

Recolección en techos y acumulación por tanques entre \$3.200.000 \$4.600.000

Recolección y acumulación en tranques hasta \$8.000.000 (entre 700 y 2.000 m³)¹

Tranques de aguas lluvias incentivados por INDAP²

→ Contribuyen hasta \$6.000.000 ó 90% de la inversión³

Mínimos gastos operativos →

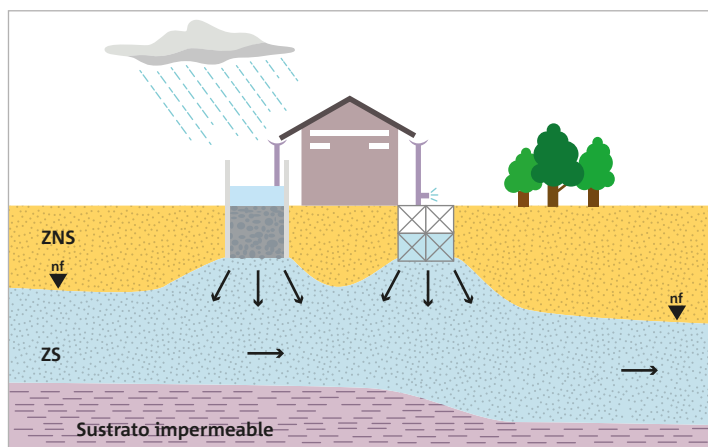
Limpieza periódica del sistema (ej: canaletas, tuberías y norias, etc.)

Diseño y construcción

La utilización de techos para la recolección e infiltración de aguas lluvias consiste en conectar los conductos de salida del desagüe del techo a un sistema que desvíe las aguas lluvias hacia pozos preexistentes u otros sistemas de recarga, como piscinas o galerías de infiltración.

Se recomienda utilizar tanques o norias de 1 a 2 metros de ancho y de 2 a 3 metros de profundidad, pero pueden variar dependiendo de la precipitación potencial de la zona. Las estructuras deberían ser cerradas para prevenir posibles accidentes y generalmente se rellenan con piedras, grava y arena.⁴

Para evitar la contaminación del agua, los materiales utilizados (ej: cañerías de desagüe, techos y tanques de reserva) deben ser construidos a partir de químicos inertes; por ejemplo, plástico, aluminio y hierro galvanizado⁵.



Esquema de recolección e infiltración de agua lluvia con techos. Fuente: Fernández et al., (2010)

¹ PNUD (2016). Captación y Aprovechamiento de Agua de lluvia en América Latina. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Santiago Chile. Ediciones e Impresiones Copygraph. Recuperado de: https://www.undp.org/content/dam/chile/docs/medambiente/undp_cl_medioambiente_Captacion-agua-lluvia-AL.pdf

² Instituto de Desarrollo Agropecuario

³ INDAP (2019) Operación temprana: abren postulaciones a programas de riego en Maule por \$1.705 millones:

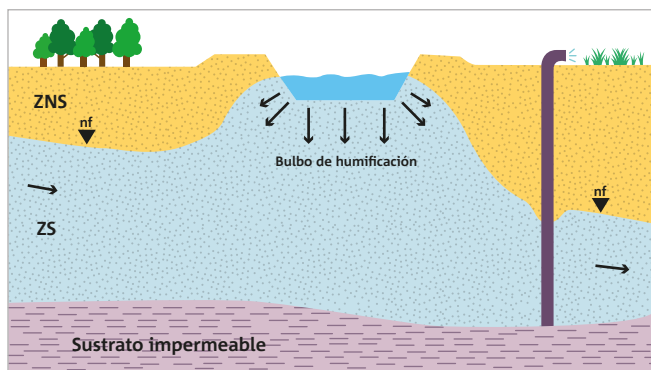
[https://www.indap.gob.cl/noticias/detalle/2019/10/16/abren-postulaciones-de-operaci%C3%B3n-temprana-para-programas-de-riego-en-maule-\\$1.705-millones](https://www.indap.gob.cl/noticias/detalle/2019/10/16/abren-postulaciones-de-operaci%C3%B3n-temprana-para-programas-de-riego-en-maule-$1.705-millones)

⁴ CHAITANYA (2018). Recharge Pits – A Widely Used Artificial Method for Recharging Ground Water. Consultado en: 05/02/2020

<http://www.chaitanyaproducts.com/blog/recharge-pits-a-widely-used-artificial-method-for-recharging-ground-water/>

⁵ Fernández et al., (2010). DINA-MAR. La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Desarrollo Tecnológico; Serie: Hidrogeología Hoy. Título 6. <http://www.dina-mar.es/pdf/dina-mar-2007-2011-libro.pdf> ISBN: 978-84-614-5123-4

1.1 Sistemas de captación e infiltración de agua lluvia *in situ*



Esquema de tranque o piscina de infiltración de agua lluvia. Fuente: Fernández et al., (2010)

Generalmente los **tranques de infiltración** tienen una profundidad de 1 hasta 4 metros, para evitar que aparezcan plantas acuáticas y algas de forma excesiva. Una profundidad mayor a 4 metros propicia el desarrollo de condiciones anaeróbicas que permiten el crecimiento de organismos en el fondo del tranque. Las paredes son inclinadas y su fondo debe estar lo más uniforme posible. Además, su tamaño debe estar en función del área de captación de aguas lluvias y de la cantidad de veces que se rellene por año.^{6 7}

INDAP promueve la construcción de tranques de agua lluvia que varían entre 700 y 2.000 m³.⁸

Condiciones relevantes

- **Calidad del agua.** Generalmente, la calidad de las aguas lluvias es adecuada para la recarga.
- **Características del acuífero.** El acuífero debe ser capaz de recibir y almacenar agua adicional. La recarga no será viable si no hay espacio libre en el acuífero al momento de infiltración. Norias o tranques de infiltración son apropiados para acuíferos poco profundos y no confinados. Las formaciones aluviales, las dunas de arena o los sistemas de grava, son generalmente los más adecuados para este método de infiltración.
- **Características del suelo.** Las piscinas son apropiadas cuando los suelos presentan una permeabilidad media o alta, cuando el suelo tiene una baja permeabilidad se recomiendan otros métodos, que puedan atravesar estas capas (ej. arcilla) y así lograr la infiltración.

Monitoreo

Al igual que en otros proyectos de primera escala⁹, generalmente no se gestiona la cantidad y calidad de agua infiltrada en los sistemas de aguas lluvias.

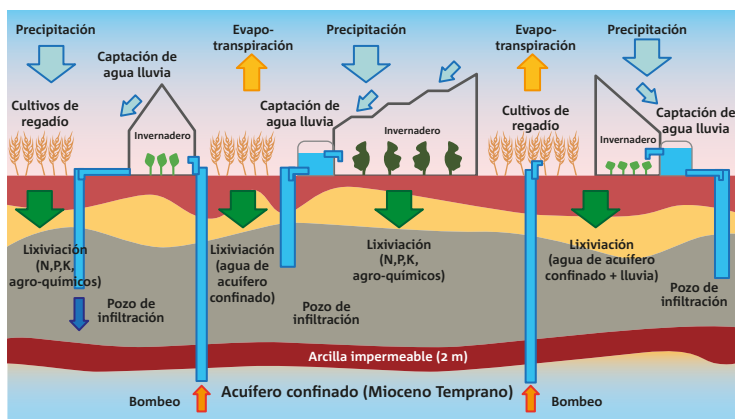
Sin embargo, el monitoreo del desempeño de las tasas de infiltración es muy útil si se desean cuantificar los beneficios y optimizar el rendimiento. Una reducción marcada en las tasas indicará la necesidad de realizar un mantenimiento al sistema.

También se necesita al menos un pozo de monitoreo dentro de la zona de influencia de la recarga para medir su impacto en el

nivel freático. Es importante recopilar datos de línea base para separar las fluctuaciones naturales del nivel freático de las operaciones de recarga.

Cuando se implementan varios esquemas en una cuenca se recomienda que la autoridad local (ej. la DGA¹⁰) monitoree los niveles freáticos regionales para asegurar que los riesgos acumulativos asociados (ej. las inundaciones y anegamiento) no se eleven más allá de los niveles aceptables.

Caso de aplicación – Sitio de demostración Algarve (Río Seco), Portugal



Perfil del sistema de Invernaderos de Campina de Faro, sitio de demostración del Algarve, Portugal. Fuente: Fernández et al., (2016)

El sistema de captación de agua lluvia del Algarve es un sitio demostrativo compuesto por invernaderos de 2,74 km², conectados a pozos de recarga de gran diámetro. Existen cerca de 60 pozos en la zona con diámetros de 2 a 5 metros y profundidades de 20 a 30 metros. La capacidad de infiltración de los pozos se estimó entre 50 y 180 m³/día.

Algunos de los pozos de recarga son operados como pozos secos. La topografía es generalmente plana y se caracteriza por bajas tasas de recarga y el drenaje es un problema serio en esta área. La cosecha potencial de lluvia se calcula cercana al 20% del balance hídrico promedio.¹¹

6 Fernández et al., (2010). DINA-MAR. La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Desarrollo Tecnológico; Serie: Hidrogeología Hoy. Título 6. <http://www.dina-mar.es/pdf/dina-mar-2007-2011-libro.pdf> ISBN: 978-84-614-5123-4

7 Para más información ver: MINVU (S.F) Técnicas Alternativas para Soluciones de Aguas Lluvias en Sectores Urbanos Cap4. Diseño, selección y presentación de obras: <http://serviu10.minvu.cl/documentos/Urbanismo%20y%20Construccion/Normativa%20Tecnica/aguas%20lluvias/Capitulo4.pdf>

8 PNUD (2016). Captación y Aprovechamiento de Agua de lluvia en América Latina. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Santiago Chile. Ediciones e Impresiones Copygraph. Recuperado de: https://www.undp.org/content/dam/chile/docs/medambiente/undp_cl_medioambiente_Captacion-agua-lluvia-AL.pdf

9 Proyectos que son más sencillos (técnica y económicamente) o son de menor riesgo y solo requerían una orientación menor por parte de la Guía. Ya están implementados en Chile, pero generalmente no son gestionados.

10 Dirección General de Aguas

11 Fernández et al., (2016). MARSOL. Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. MAR design and construction criteria. MARSOL deliverable 13.3, versión 4, 31/10/2016.

Canales de infiltración

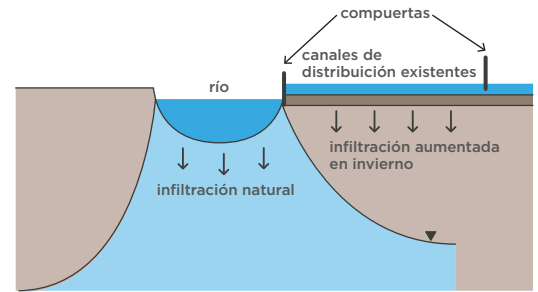


Descripción

Este método utiliza *canales existentes no revestidos* (los que suman alrededor de 150.000 km en Chile^{1 2}) fuera de la temporada de riego, manteniendo las bocatomas abiertas para permitir la entrada de excedentes de caudales y así aumentar la infiltración de agua a las napas subterráneas. Esta técnica cuenta con una regulación por parte de la DGA³, que permite la apertura de bocatomas en temporada de no riego y aumentar el almacenamiento del agua subterránea durante el invierno.

También se pueden construir *nuevos canales* que desvían y capturan la escorrentía de aguas lluvias proveniente de las laderas altas y zonas afectadas por la erosión, llevándola hasta áreas protegidas y de baja pendiente, para así conservar el suelo y facilitar la infiltración adicional de agua.

Si bien esta técnica es similar a la de las piscinas de infiltración, se diferencia en que el agua que se infiltra está en “movimiento”. Para un mejor control del flujo del caudal se recomienda incluir infraestructura, tal como compuertas.⁴



Fuentes de agua



Agua de lluvia



Desviación de ríos



Escorrentía

Plazos y costos

Canales existentes → De uso inmediato y sin costo de inversión inicial (a menos de que se requiera infraestructura adicional para controlar el flujo)

Nuevos canales → En comparación con otros métodos de recarga, es de bajo costo y de rápida implementación (toma sólo meses desde el diseño, hasta la operación)

Costos de nuevos canales varían principalmente debido a ↗ Tipo de terreno
↘ Método de excavación (manual / mecánica)

Costo de excavación mecánica (zona centro-norte y centro-sur) → \$1.683 – \$2.375 CLP/m³ ⁵

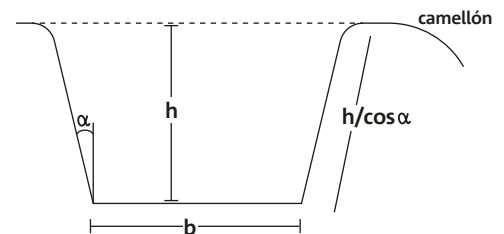
Costos de operación, mantención y renovación de canales incluyen → Consumo de energía y materiales, mano de obra, renovación periódica de infraestructura, etc.

Los gastos operacionales tienden a ser mínimos; la principal actividad adicional es la limpieza del material de obstrucción. Para utilizar los canales con fines de recarga durante el invierno, es necesario realizar limpieza del canal y evitar revestirlo completamente para mantener las tasas de infiltración. Hay que considerar que dejar de revestir los canales en zona crítica podría implicar una pérdida de eficiencia en la conducción del agua en verano.

Diseño y construcción

Los *canales existentes* sin revestimiento no necesitan de construcción adicional, a menos que se requiera algún tipo de intervención para un mejor control del flujo.

El diseño y construcción de *nuevos canales* de desviación e infiltración deben considerar su capacidad hidráulica para determinar su caudal máximo. Se realiza en forma transversal a la pendiente y presenta una sección con un ancho mínimo en la base de 0,2 m y una altura efectiva mínima de 0,2 m, y con un largo máximo recomendado de 100 m. ⁶



Configuración de un canal de desviación aguas lluvias

¹ Saldías, J.F. (2019); Taller de Recarga de Acuíferos CNR; Junta de Vigilancia del Río Diguillín y sus Afluentes; 20/06/2019.

² Peralta, F. (2018); Presentación: Gobernanza del Agua Subterránea en la Gestión Hídrica: Experiencias en la Gestión y Recarga Artificial de las Aguas Subterráneas; Nov 2018

³ Dirección General de Aguas DGA (2019); Circular N°1: Sobre las obras hidráulicas permeables en la recarga de acuíferos.

https://dga.mop.gob.cl/legislacionynormas/normativascirculares/Circulares/Circular_1_febrero.pdf Circular N°2 Establece condiciones para exceptuarse de cumplir la orden de cierre de bocatomas ante peligro de grandes avenidas. Recarga o infiltración artificial de acuíferos.

https://dga.mop.gob.cl/legislacionynormas/normativascirculares/Circulares/Circular_N2.pdf

⁴ Fernández et al., (2010). DINA-MAR. La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Desarrollo Tecnológico; Serie: Hidrogeología Hoy. Título 6. <http://www.dina-mar.es/pdf/dina-mar-2007-2011-libro.pdf> ISBN: 978-84-614-5123-4

⁵ Gobierno de Chile (s/f). Precios unitarios mínimos y máximos para proyectos de canales (revestimiento y construcción), embalses y obras de arte presentados a la bonificación de la Ley N° 18.450.

⁶ Para más información de diseño y construcción revisar: Pizarro, R; Flores, J; Sangüesa, C; Martínez, E; García, J (2004a). Diseño de obras para la conservación de aguas y suelos. http://ctha.utralca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/libros/diseño_de_obras_para_la_conservación_de_aguas_y_suelos.pdf y Pizarro, R; Flores, J; Sangüesa, C; Martínez, E (2004b). Monografías Canales de Desviación; http://ctha.utralca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/libros/Canales_de_Desviacion.pdf

1.2 Canales de infiltración

Los principales factores que afectan a las tasas de infiltración son:

- La morfología y permeabilidad del suelo (de las laderas y del lecho)
- La hidrología (duración e intensidad del flujo)
- La calidad del agua (principalmente los sólidos en suspensión)

Algunos de estos factores pueden optimizarse mediante:

- La regulación del flujo.
- La escarificación de los lechos y paredes del canal.
- La construcción de un surco a través de la parte más profunda del canal para acumular sedimentos y facilitar la limpieza.
- El uso de geotextiles permeables y sustituibles en el lecho del canal para acumular sedimentos y facilitar la limpieza.⁷
- Plantar herbáceas (malezas) en el camellón de tierra para darle mayor estabilidad y soporte al canal.

Condiciones relevantes

- **Calidad del agua de la fuente.** La infiltración a través de los canales de riego es más efectiva si el agua de la fuente es baja en sólidos suspendidos y nutrientes, reduciendo así el potencial de obstrucción. El agua de baja calidad puede disminuir rápidamente las tasas de infiltración en los canales y requerirían un mantenimiento más frecuente.
- **Características del acuífero.** El acuífero en el sitio de recarga debe ser capaz de recibir y almacenar agua adicional. Si no hay espacio disponible en el acuífero en el momento de la recarga, las tasas de infiltración disminuirán a cero y pueden incluso ser negativas (el canal gana agua) cuando el nivel freático es más alto que la base del canal.
- **Características del suelo.** Este método es apropiado cuando hay suelos de alta conductividad debajo del canal que permiten la infiltración (como los suelos arenosos). No se recomienda en suelos arcillosos, de grano fino y compactados.

Monitoreo

Al igual que en otros proyectos de primera escala⁸, generalmente no se gestiona la cantidad y calidad de agua infiltrada en los canales de infiltración.

Sin embargo, el monitoreo del desempeño de las tasas de infiltración es muy útil si se desea cuantificar los beneficios y optimizar el rendimiento. Una reducción marcada en las tasas indicará la necesidad de realizar un mantenimiento al sistema. También se necesita al menos un pozo de monitoreo dentro de

la zona de influencia de la recarga para medir su impacto en el nivel freático. Es importante recopilar datos de línea base para separar las fluctuaciones naturales del nivel freático de las operaciones de recarga.

Cuando se implementan numerosos esquemas en una cuenca se recomienda que la autoridad local (ej. la DGA⁹) monitoree los niveles freáticos regionales para asegurar que los riesgos acumulativos asociados (ej. las inundaciones y anegamiento) no se eleven más allá de los niveles aceptables.

Caso de aplicación: La Junta de Vigilancia del Río Diguillín y sus Afluentes, Región de Ñuble.



Fotografía de Bocatoma y Pirca en la Región de Ñuble. Fuente: Saldías, J.F. (2019)

Se han utilizado los canales de distribución en su territorio durante 8 años para recargar agua al acuífero.

Mediante un acuerdo con la DOH se lleva a cabo la unión de canales operativos y abandonados (15 km), los cuales actualmente se deben mantener con agua durante todo el año, lo que se estima que permitirá una recarga de 6-7 m³/s aproximadamente. Esta técnica está actualmente en evaluación para comprobar el volumen infiltrado.

Al reabrir las bocatomas durante invierno se ha evidenciado que las napas o el nivel freático presenta una recuperación observada en pozos cercanos. Esto ha sido posible gracias al trabajo conjunto de la comunidad que participa activamente.¹⁰

⁷ Fernández et al., (2016). MARSOL. Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. MAR design and construction criteria. MARSOL deliverable 13.3, versión 4, 31/10/2016.

⁸ Proyectos que son más sencillos (técnica y económicamente) o son de menor riesgo y solo requerirían una orientación menor por parte de la Guía. Ya están implementados en Chile, pero generalmente no son gestionados.

⁹ Dirección General de Aguas

¹⁰ Saldías, J.F. (2019); Taller de Recarga de Acuíferos CNR; Junta de Vigilancia del Río Diguillín y sus Afluentes; 20/06/2019.

Zanjas de infiltración

Descripción

Las zanjas de infiltración son canales construidos en laderas que tienen el objetivo de captar el escurrimiento de agua, evitar procesos erosivos y conservar el suelo y el agua. Las zanjas son relativamente poco profundas y permiten la infiltración de agua principalmente en el suelo, pero también pueden recargar los acuíferos pocos profundos y no confinados.



Fuente de agua



Agua de lluvia



Desviación de ríos



Escorrentía

Plazos y costos¹

Rápida construcción → Días a semanas

Costo de inversión depende principalmente de ↗ Tipo de terreno
↘ Método de excavación (manual/mecánica)

Costo de excavación mecánica (zona centro-norte y centro-sur) → \$1.683 – \$2.375 CLP/m³ ²

Costos adicionales debidos a ↗ Elevación de camellones con el material retirado
↘ Desecho de los excedentes del terreno

Mínimos gastos operativos ↗ Limpieza periódica del sistema (remover sedimentos finos y/o vegetación excesiva)
↘ Reparación de camellones erosionados

Si la obra está contenida dentro de los límites de la propiedad privada del ejecutor del proyecto, generalmente no se requiere de aprobaciones específicas ni de enfrentar barreras regulatorias para su construcción.

Diseño y construcción

Suelen construirse perpendiculares a la pendiente del terreno, con un trazado paralelo a las curvas de nivel, dejando un pequeño terraplén en un margen construido con el material excavado y normalmente estabilizado mediante la plantación de vegetación.

El espaciamiento entre zanjas debe permitir un control adecuado de la erosión y generalmente tienen un derrame sobre el canal para evitar que se sobrepase la zanja.

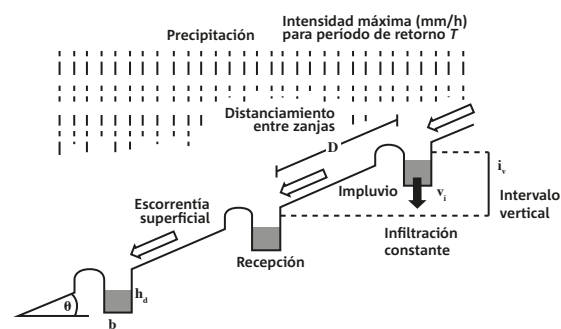
Para un diseño adecuado, se requiere un buen conocimiento de lo siguiente:

- Topografía;
- Características del suelo (potencial de erosión y tasas de infiltración);
- La intensidad y período de retorno de las lluvias;
- El coeficiente de escorrentía; y
- Las características hidrogeológicas del acuífero.

Generalmente se recomienda esta técnica en pendientes de 10% a 40% inclinación. En las laderas con fuertes pendientes las zanjas suelen ser estrechas y profundas, en pendientes leves pueden tener varios metros de ancho. Típicamente las dimensiones son 40 cm de ancho de la base y 40 cm de profundidad.³

Se puede determinar la tasa de infiltración probable a través de la construcción de una zanja piloto a la profundidad de diseño prevista y realizar una prueba de permeabilidad⁴. Los resultados de una o más de estas pruebas guiarán las dimensiones finales de las zanjas y el ejercicio debe repetirse para diferentes lugares (ej. diferentes pendientes, coberturas de vegetación y tipos de suelos). La tasa de infiltración determinará el volumen de agua que se puede recargar.

La siguiente figura supone que la precipitación es uniforme en cada zanja y se utiliza la intensidad máxima de precipitación para un período de retorno adecuado para la zona.⁵



Esquema de zanjas de infiltración en ladera. Fuente: Flores (2011)

¹ Para una comparación de costos y tiempos de proyectos en Chile ver: Hans Robert. (2016). Comparación de costos y tiempo de construcción para el uso de zanja de infiltración con distintas alternativas de rellenos en diferentes tipos de suelos.

<http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1052/Hans%20Robert%20Urrutia%20Mart%3%adnez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

² Gobierno de Chile (s/f). Precios unitarios mínimos y máximos para proyectos de canales (revestimiento y construcción), embalses y obras de arte presentados a la bonificación de la Ley N° 18.450.

³ Para más información sobre su diseño ver: i) Ministerio de Agricultura (2014). Zanjas de infiltración.

http://agroaldia.minagri.gob.pe/biblioteca/download/pdf/manuales-boletines/suelos/2014/zanjas_infiltracion.pdf

ii) Fernández et al., (2016). MARSOL. Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. MAR design and construction criteria. MARSOL deliverable 13.3, versión 4, 31/10/2016;

iii) Flores-Villanelo, Juan Pablo (2014). Diseño de zanjas de infiltración bajo criterios de ingeniería hidrológica.

http://eias.atalca.cl/Docs/pdf/manuales/diseño_zanja.pdf

⁴ Para información sobre métodos para estimar tasas de infiltración ver: i) Alvarado Batres C. y Barahona-Palomo M. (2017). Comparación de tres métodos de infiltración para calcular el balance hídrico del suelo, en la Cuenca del río Suquiapa, El Salvador. Cuadernos de Investigación UNED (ISSN: 1659-4266) Vol. 9(1): 23-33. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/cin-n/v9n1/1659-4266-cinn-9-01-00023.pdf>; o ii) Elhakin A. F. (2016) Estimation of soil permeability. Alexandria Engineering Journal. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.034>

⁵ Flores-Villanelo, Juan Pablo. (2012). Diseño de zanjas de infiltración en zonas no aforadas usando SIG. Tecnología y ciencias del agua, 3(2), 27-39. Recuperado en 13 de julio de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000200002&lng=es&tling=es.

Condiciones relevantes

- **Calidad del agua.** Se mantendrán tasas de infiltración más altas (y por más tiempo) cuando la escorrentía es baja en sólidos suspendidos. La presencia de vegetación, surcos u otras prácticas de manejo de suelo y agua, particularmente en laderas más empinadas, mejorará la calidad de la escorrentía.
- **Características del acuífero.** El suelo y el acuífero no confinado deben ser capaces de recibir y almacenar agua adicional. Si las tasas de infiltración son demasiado bajas o el suelo no saturado o el espesor del acuífero son insuficientes para el almacenamiento en el momento de la recarga prevista, las tasas de infiltración disminuirán a cero y las zanjas se llenarán y se derramarán.
- **Características del suelo.** El suelo es un factor crítico que influye en la capacidad de infiltración, que varía dependiendo de su estructura, textura, contenido de arcilla, materia orgánica, etc. Así, cuanto más grueso sea el suelo, mayor será la tasa de infiltración y menor la distancia que se requiere entre las zanjas.⁶
- **Tasas de infiltración.** La mantención debe realizarse permanentemente y en especial cuando la zanja se haya llenado de agua (y probablemente de tierra y restos de plantas) luego de un evento de lluvias intensas, para así asegurar su capacidad de captación de agua.

Monitoreo

Al igual que en otros proyectos de primera escala⁷, generalmente no se gestiona la cantidad y calidad de agua infiltrada en las zanjas de infiltración.

Sin embargo, el monitoreo del desempeño de las **tasas de infiltración** es muy útil si se desea cuantificar los beneficios y optimizar el rendimiento. Una reducción marcada en las tasas indicará la necesidad de realizar un mantenimiento al sistema.

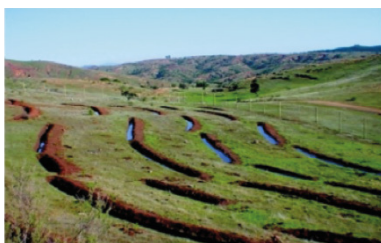
También se necesita al menos un **pozo de monitoreo** dentro de la zona de influencia de la recarga para medir su impacto en el nivel freático. Es importante recopilar datos de línea base para separar las fluctuaciones naturales del nivel freático de las operaciones de recarga.

A su vez, es importante comprender la **calidad de la fuente de agua**, en particular la turbidez o el nivel de Sólidos Suspendidos Totales (SST), para el buen diseño de los esquemas, incluyendo el pretratamiento de agua para reducir los agentes de obstrucción. La calidad del agua aceptable varía de un sitio a otro, generalmente dependiendo de condiciones locales del acuífero. En Australia se aplica un valor guía máximo de 10 mg/l para sólidos suspendidos totales, carbono orgánico total y nitrógeno total para la fuente de agua a recargar, esto para evaluar los riesgos de colmatación en las fases tempranas de la investigación.⁸

Cuando se implementan numerosos esquemas en una cuenca se recomienda que la autoridad local (ej. la DGA⁹) monitoree los niveles freáticos regionales para asegurar que los riesgos acumulativos asociados (ej. las inundaciones y anegamiento) no se eleven más allá de los niveles aceptables.

Caso de aplicación: Determinación de estándares de ingeniería, Chile

A partir del año 2002 la Sociedad EIAS Ltda. ejecuta el proyecto FDI - CORFO "Determinación de estándares de ingeniería en obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos para la mantención e incremento de la productividad silvícola". Zanjas de infiltración: Pumanque VI Región, Hidango VI Región, Parrón VII Región, Botacura VII Región, Llohué VIII Región, Manzanares VIII Región.¹⁰



Zanjas de infiltración: Pumanque VI Región. Fuente: Pizarro (2004)

Caso de aplicación: Estimación de efecto de zanjas de infiltración, Perú

En la cuenca del río Shullcas, en Perú, se estimó que las zanjas de infiltración aumentaban la recarga en un 3,5%, lo que podría contribuir a la provisión de agua para más de 800 personas adicionales durante la estación seca.¹¹



Zanjas de infiltración en Perú: a) Construcción de zanjas. Foto: Comunidad Andina; b) Zanja de infiltración con agua. Foto: Lauren Somers.

⁶ Fernández et al., (2016). MARSOL. Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. MAR design and construction criteria. MARSOL deliverable 13.3, versión 4, 31/10/2016.

⁷ Proyectos que son más sencillos (técnica y económicamente) o son de menor riesgo y solo requerían una orientación menor por parte de la Guía. Ya están implementados en Chile, pero generalmente no son gestionados.

⁸ NRMCC-EPHC-NHMRC (2009). Australian Guidelines for Water Recycling (Phase 2): Managed Aquifer Recharge. (Natural Resource Ministerial Management Council, Environment Protection and Heritage Council and National Health and Medical Research Council), Canberra.

<https://www.waterquality.gov.au/guidelines/recycled-water#augmentation-of-drinking-water-supplies-phase-2>

⁹ Dirección General de Aguas

¹⁰ Pizarro, R; Flores, J; Sangüesa, C; Martínez, E; García, J (2004). Diseño de obras para la conservación de aguas y suelos.

http://ccha.utaclca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/libros/diseño_de_obras_para_la_conservación_de_aguas_y_suelos.pdf

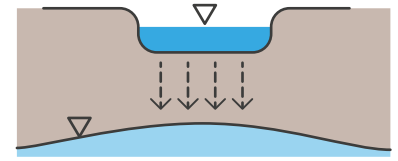
¹¹ Somers, L.D., McKenzie, J.M., Zipper, S.C., Mark, B.G., Lagos, P., Baraet, M. (2017). Does hillslope trenching enhance groundwater recharge and baseflow in the Peruvian Andes? Hydrological Processes, 32, 3, 318-331.

Piscinas de infiltración



Descripción

Las piscinas, o balsas, de infiltración son generalmente depresiones poco profundas con una gran área de superficie diseñadas para infiltrar agua a través del suelo hacia un acuífero no confinado. Generalmente, se construyen fuera del cauce desde donde el agua superficial se desvía, ya sea por gravedad o por bombeo. El área de superficie debe ser suficiente para ubicar la estructura, ocupando entre unas pocas hectáreas hasta cientos de hectáreas.



Fuentes de agua



Agua de lluvia



Desviación de ríos



Escorrentía

Plazos y costos

Tiempo de ejecución (antes de construcción a escala operacional) →

3-12 meses (incluye etapa de investigación y fase de prueba o piloto), dependiendo del nivel de información disponible y del grado de complejidad del proyecto.

Costo relativamente menor en comparación con pozos (por volumen recargado) →

Costo total nivelado¹ durante vida útil \$152 CLP/m³ (inversión: \$616 CLP/m³)² (Costo total pozos: \$360 CLP/m³)

Costos de operación, mantenimiento y renovación ↔

Costo nivelado \$104 CLP/m³³ Incluye consumo de energía y materiales, mano de obra, renovación periódica

Los tiempos de ejecución dependen del nivel de información ya disponible y del nivel de complejidad del proyecto. Se calcularon los costos de la vida útil (inversión inicial, mantenimiento y operación durante 30 años) asociados a algunos proyectos de piscinas de infiltración en Chile, cuyos montos se encuentran entre \$2 y \$38 por m³ recargado.

Diseño y construcción

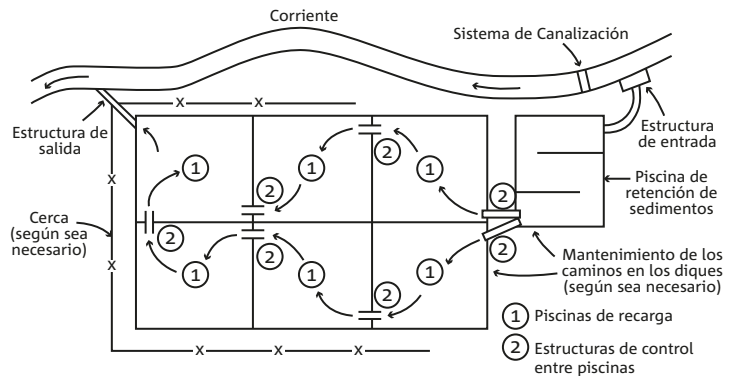
Las piscinas de infiltración son una depresión en el suelo, ya sea natural o artificial, con el fondo lo más uniforme posible para promover una infiltración homogénea. Sin embargo, a veces se utilizan surcos/zanjas para facilitar operaciones de limpieza, ya que se aumenta la superficie de la piscina y los sólidos suspendidos de obstrucción en el agua quedan depositados o retenidos en los surcos.^{4 5}

Normalmente, las piscinas se construyen fuera del cauce, pero a veces es conveniente ubicarlas aledañas al lecho del río cuando este es intermitente, para aprovechar de infiltrar agua de crecidas o agua abundante en periodos húmedos.

Hay varias alternativas, pero la mayoría requieren diseños para evitar la obstrucción de la superficie de la piscina, que puede ser causada por diversos factores (ej. deposición de partículas finas o crecimiento de vegetación y algas). Las investigaciones en terreno pueden revelar el potencial de obstrucción mecánica, biológica y química.⁶

La pendiente del terraplén puede variar dependiendo del tipo de suelo y de acuífero. Una dimensión típicamente utilizada para la terraplén interna es 3H:2V.⁷

Superficie requerida (ha)	Volumen de agua a recargar (hm ³ /año)
Unas pocas	1
Decenas	100
Cientos	1000



Plan típico de un proyecto de recarga de múltiples piscinas que desvía agua de un río. Fuente modificada de: American Society of Civil Engineers (1972)⁸

¹ Los costos nivelados se definen como el nivel constante de ingresos necesario cada año para recuperar la inversión, los gastos operativos y de mantenimiento, durante la vida útil del proyecto dividido por el volumen anual del suministro de agua. Se convirtieron los valores de USD a CLP, utilizando una tasa de cambio de \$800 CLP (02/20). Para mayor información sobre esta metodología para estimar el costo del esquema RAG, consultar la sección 5.1.2 Costo nivelado del suministro de agua, en el Informe Final de CNR 2020.
^{2 3} Ross, A., Hasnain, S. (2018). Factors affecting the cost of managed aquifer recharge (MAR) schemes. Sustainable Water Resources Management 4: 179-190.
^{4 7} Fernández et al., (2016). MARSOLE. Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. MAR design and construction criteria. MARSOLE deliverable 13.3, versión 4, 31/10/2016.
⁵ Existen diferentes opciones de diseño, tales como, piscinas múltiples, filtros de grava y arena, capas reactivas, piscinas divididas, etc.
⁶ Para más información, ver evaluaciones de Fase 2 del Informe Final del proyecto.
⁸ American Society of Civil Engineers (1972). Ground Water Management, Man. and Repts. On Engrng, Practice 40.

2.1 Piscinas de infiltración

Durante la fase de diseño del esquema, se requieren mediciones en terreno para determinar las tasas de infiltración. Generalmente se utiliza un infiltrómetro de doble anillo⁹ o un permeámetro Guelph¹⁰, que permitan calcular el tiempo que requiere una cantidad determinada de agua (por área de superficie) para penetrar el suelo. En base a los resultados medidos, se puede calcular la tasa de infiltración utilizando la ley de Darcy. También se pueden utilizar modelos analíticos y numéricos realizados por hidrogeólogos, pedólogos o ingenieros debidamente capacitados.¹¹

Tanto el fondo como las paredes de las piscinas de infiltración deben tener altas tasas de infiltración (ej. > 0.5 m/d). Es posible que los taludes también deban cubrirse con geotextil permeable para evitar la erosión. Para aumentar la permeabilidad, una capa de arena puede usarse para revestir la base y las paredes de un estanque, que actúe como un filtro primario para reducir la incidencia de obstrucción, y ser una capa de material que puede ser limpiada o reemplazada según sea necesario para mantener las tasas de infiltración.¹² Esta cubierta debe reemplazarse cuando se obstruya.¹³

Condiciones relevantes

- **Calidad del agua.** El estancamiento de agua en la piscina puede resultar en el crecimiento de bacterias, siendo la profundidad de la piscina un factor clave de su diseño para reducir este problema. Es deseable construir un sistema de pretratamiento para promover el asentamiento de sólidos suspendidos antes de que lleguen a la piscina principal de infiltración. Para remover el material de obstrucción puede ser suficiente hacer una escarificación o remoción de los primeros 25 cm de suelo periódicamente (ej. antes de cada temporada de recarga).
- **Características del acuífero.** El acuífero debe ser capaz de recibir y almacenar agua adicional; si no hay espacio disponible en el momento de la recarga, entonces no es viable. Este método depende de suelos permeables, acuíferos poco profundos (para reducir pérdidas de humedad del suelo) y no confinados (la recarga se realiza desde la superficie). Las características más adecuadas para este método son formaciones aluviales, dunas de arena o sistemas de grava; sin embargo, una alta transmisibilidad puede significar la rápida dispersión del agua recargada y puede limitar el volumen de agua que se puede recuperar. Es necesario evaluar si otros usuarios de aguas subterráneas o ecosistemas conectados podrían verse afectados negativamente por las operaciones de recarga, a fin de reducir los potenciales impactos y riesgos asociados.
- **Tasas de infiltración.** Las tasas de recarga deberían ser adecuadas para infiltrar el volumen de agua objetivo y así promover un flujo apropiado desde el fondo de la piscina. Un factor crucial es la profundidad del agua en la piscina, ya que el peso excesivo compacta el fondo, comprime los granos de arena y disminuye la tasa de infiltración. Por otro lado, agua poco profunda no induce la presión necesaria para mejorar y forzar la capacidad de infiltración. Las profundidades típicas de piscinas varían entre 80 y 140 cm para acuíferos arenosos y hasta 4 m cuando la piscina se encuentra directamente sobre rocas sedimentarias arcillosas.¹⁴

Monitoreo

El parámetro de monitoreo más crítico es la tasa de infiltración, ya que permite determinar si el sistema está logrando los objetivos de rendimiento y cuantificar el beneficio de su operación. Para estimar la infiltración se requiere un caudalímetro en la entrada y la salida (si es necesario) de la piscina, además del cálculo (o estimación) de tasas de evaporación. Para calcular la tasa de infiltración, se recomienda instalar un medidor de presión en la piscina y otro fuera del agua (para la corrección ambiental) que permite calcular la profundidad del agua en el tiempo. Una reducción marcada en las tasas de infiltración indicará la necesidad de remover la capa de obstrucción del suelo, y es posible que se requiera un mayor nivel de pretratamiento del agua antes de la infiltración.

Es importante comprender la calidad de la fuente de agua, en particular la turbidez o los Sólidos Suspendidos Totales (SST), para diseñar el esquema de recarga. La calidad del agua aceptable varía de un sitio a otro generalmente dependiendo de condiciones locales del acuífero. En Australia se aplica un valor guía máximo de 10 mg/l para sólidos suspendidos totales, carbono orgánico total y nitrógeno total para la fuente de agua a recargar, esto para evaluar los riesgos de colmatación en las fases tempranas de la investigación.¹⁵

Si bien es ideal contar con más de un pozo de monitoreo dentro de la zona de influencia de la recarga para medir su impacto en el nivel freático, es indispensable contar al menos con uno. Los medidores de presión *in situ* se pueden usar para recopilar de manera eficiente datos útiles en series de tiempo sobre los niveles de agua. Es importante recopilar datos de línea base para separar las fluctuaciones naturales del nivel freático de las señales de las operaciones de recarga.

Caso de aplicación: Piscinas de infiltración en Toledo, Región de Atacama

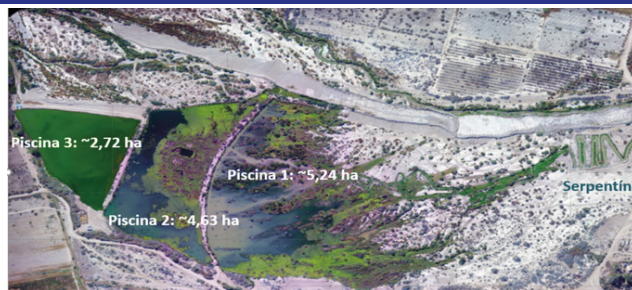


Imagen aérea de las piscinas de infiltración en la cuenca del río Copiapó (CASUB, S.F.) modificado por CSIRO

En 2017 la Comunidad de Agua Subterránea (CASUB): Copiapó –Piedra Colgada– Desembocadora, construyó tres piscinas de infiltración aledañas al cauce del río. Se construyó un serpentín decantador para incrementar el tiempo de residencia y así disminuir la turbidez del agua que entra a la primera piscina de infiltración. El proyecto utilizó los excedentes del agua generados producto de los eventos extremos de precipitación en la cuenca del río Copiapó durante 2017. Se estimó una recarga de 200 l/s siendo un volumen total de infiltración de aproximadamente 9.500.000 m³ durante el periodo de recarga y con un costo aproximado de CLP 5/m³ infiltrado.^{17 18}

9 Universidad Politécnica de Valencia (s.f) Características del infiltrómetro de doble anillo. Revisado en: 28-02-2020

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7840/AD%20Infiltrometro.pdf>

10 El permeámetro Guelph es un instrumento fácil de utilizar para realizar una medición *in situ* rápida y precisa de la conductividad hidráulica. Las mediciones se pueden hacer en el rango de 15 a 75 cm por debajo de la superficie del suelo.

11 Farthing, M. W., & Ogden, F. L. (2017). Numerical solution of Richards' Equation: a review of advances and challenges. *Soil Science Society of America Journal*, 81(6), 1257-1269

12 Fernández et al., (2016). MARSOL. Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. MAR design and construction criteria. MARSOL deliverable 13.3, versión 4, 31/10/2016

13 En los Anexos del Informe Final del proyecto se puede encontrar información útil sobre experiencias de proyectos realizados en Chile para ayudar en el diseño y construcción de su esquema.

14 Martin R. (ed.) (2013) Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods. IAH Commission on Managing Aquifer Recharge, Australia.

15 NRMCC-EPHC-NHMRC (2009). Australian Guidelines for Water Recycling (Phase 2): Managed Aquifer Recharge. (Natural Resource Ministerial Management Council, Environment Protection and Heritage Council and National Health and Medical Research Council), Canberra.

<https://www.waterquality.gov.au/guidelines/recycled-water#augmentation-of-drinking-water-supplies-phase-2>

16 CASUB, Infiltración CASUB (2019), presentación para la Comisión Nacional de Riego <https://www.cnr.gob.cl/wp-content/uploads/2019/08/INFILTRACION-CASUB.pdf>

17 Video aéreo del esquema: <https://www.youtube.com/watch?v=uSTOqg5pFrA>

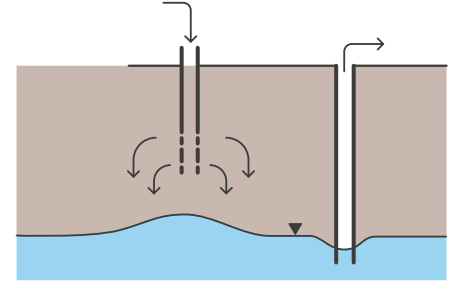
Pozos secos

Descripción

Los pozos secos (también conocidos como pozos de la zona vadosa o pozos de gravedad) corresponden a una técnica de infiltración que utiliza pozos poco profundos y de gran diámetro para recargar un acuífero no confinado por gravedad. Los pozos secos se pueden usar para recargar directamente a través de una zona profunda no saturada, de modo que el agua llegue a la zona saturada (acuífero) más rápidamente.

En comparación con la recarga a través de pozos profundos, requieren una menor inversión y presentan riesgos menores debido principalmente a que no se infiltra agua directamente a la zona saturada. Por su parte, en contraste con las piscinas o galerías de infiltración, es un método útil cuando se cuenta con poca disponibilidad de terreno y/o hay capas de suelos de baja permeabilidad en los primeros metros de superficie (ej. ricos en arcilla).

Se puede reutilizar estructuras existentes en desuso (ej. pozos norias), adaptándolas para la recarga de acuíferos, lo que reduce los costos considerablemente.¹



Fuente de agua



Agua de lluvia



Desviación de ríos



Escorrentía

Plazos y costos

Tiempo de ejecución (antes de construcción a escala operacional) → 3-12 meses (incluye investigación de escritorio y fase de prueba o piloto).

Costo relativamente menor en comparación con pozos profundos (por volumen recargado) → Costo total nivelado² durante vida útil \$124 CLP/m³ (valor tomado de piscinas de infiltración ya que se espera que estos métodos impliquen costos similares o más baratos que pozos profundos).³ (Costo total pozos profundos: \$293 CLP/m³)

Costos de operación, mantención y renovación incluyen → Consumo de energía y materiales, mano de obra, renovación periódica de infraestructura, etc.

Diseño y construcción

Los pozos secos de infiltración consisten en uno o más pozos de "gran diámetro" (escala de metros) y poca profundidad (aproximadamente de 5 a 15 metros). Se aconseja llenar el pozo con grava y una capa de filtro de arena gruesa, para favorecer la infiltración y reducir los costos de mantenimiento en caso de obstrucción (de todos modos, los filtros deben ser retirados y limpiados periódicamente).

El agua de recarga se transfiere desde la superficie (o desde redes de conductos) evitando cualquier efecto cascada que introduzca burbujas de aire en el acuífero, las que pueden provocar efectos de obstrucción en los medios porosos. Se recomienda proteger la parte superior del pozo para así evitar la luz solar y reducir el crecimiento de algas. Esto también ayuda a evitar accidentes con animales o personas.⁴

Se puede requerir una obra de captura de agua para balancear la tasa de infiltración con la disponibilidad de agua (ej. piscina de detención o estanque) o para mejorar la calidad de agua (ej. reduciendo la turbidez a través de tiempo de residencia en un cámara de sedimentación, como se muestra en la figura de la siguiente página).

Se estima que un pozo seco puede infiltrar hasta 6.000 m³ por año al acuífero, dependiendo de las características del suelo.⁵ La velocidad de infiltración se ve afectada por los cambios en el contenido de agua a medida que el agua recargada se desplaza a través de la zona no saturada y por cambios en la presión hidráulica (nivel freático) como resultado de la infiltración.

¹ Fernández et al., (2016). MARSOL. Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. MAR design and construction criteria. MARSOL deliverable 13.3, versión 4, 31/10/2016

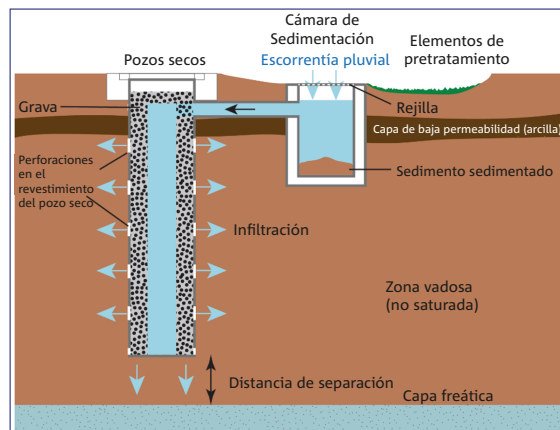
² Los costos nivelados se definen como el nivel constante de ingresos necesario cada año para recuperar la inversión, los gastos operativos y de mantenimiento, durante la vida útil del proyecto dividido por el volumen anual del suministro de agua. Para mayor información sobre esta metodología para estimar el costo del esquema RAG, consultar la sección 5.1.2 Costo nivelado del suministro de agua, en el Informe final CNR 2020.

³ Ross, A., Hasnain, S. (2018). Factors affecting the cost of managed aquifer recharge (MAR) schemes. Sustainable Water Resources Management 4: 179-190.

⁵ E. Edwards, B. Washburn and B. Lock (2017). Factsheet: Dry wells for stormwater management. Wells used to drain stormwater and recharge groundwater supplies. American Geosciences institute. https://www.americangeosciences.org/sites/default/files/CI_Factsheet_2017_4_drywellbasics_170906.pdf

2.2 Pozos secos

Durante la fase de diseño del esquema, se requieren mediciones en terreno para determinar las tasas de infiltración. Idealmente, la permeabilidad o conductividad hidráulica de los acuíferos cuando se está considerando la aplicación de la técnica de pozos secos se pueden determinar a través de *medidas puntuales de permeabilidad*⁶ o *pruebas de bombeo* en perforaciones existentes en acuíferos similares en el área. Las propiedades también se pueden estimar en función de la distribución del tamaño de grano de los medios donde hay información litológica disponible que permiten calcular el tiempo que requiere una cantidad determinada de agua (por área de superficie) para penetrar el suelo. En base a los resultados medidos, se puede calcular la tasa de infiltración utilizando la ley de Darcy. También se pueden utilizar cálculos computacionales más avanzados (ej. métodos basados en la ecuación de Richards⁷) realizados por hidrogeólogos, pedólogos o ingenieros debidamente capacitados.



Esquemática de un pozo seco. Fuente: E. Edwards y B. Mandle⁸

Condiciones relevantes

- **Calidad del agua.** Requieren una fuente de agua de calidad adecuada para reducir la incidencia de las obstrucciones, lo que generalmente significa un proceso para reducir la turbidez (ej. estanque de sedimentación o humedal, o la aplicación de filtración mecánica).
- **Características del acuífero.** El acuífero debe ser capaz de recibir y almacenar agua adicional; si no hay espacio disponible en el momento de la recarga, entonces ésta no es viable. Las tasas de recarga deben ser adecuadas para infiltrar el volumen de agua objetivo. Es necesario evaluar si otros usuarios de aguas subterráneas o ecosistemas conectados podrían verse afectados negativamente por las operaciones de recarga, a fin de reducir los potenciales impactos y riesgos asociados.
- **Características del suelo.** Los pozos secos son apropiados cuando los suelos de baja permeabilidad se presentan a una mayor profundidad que la requerida por una piscina de infiltración u otros métodos superficiales de infiltración. Sin embargo, cuanto más profundas son las capas de suelo de baja permeabilidad, más profundo debe excavarse el pozo, aumentando el costo del proyecto.

Monitoreo

El parámetro más crítico para monitorear es la tasa de infiltración para determinar si el sistema está logrando sus objetivos de desempeño y cuantificar el beneficio de la operación. Esto implica saber cuánta agua se captura y recarga, y cuánta se recupera (cuando corresponda). Una reducción marcada en las tasas de infiltración indicará la necesidad de remediación del suelo para remover la obstrucción. También es posible que se requiera un mayor nivel de pretratamiento del agua antes de la infiltración.

Es importante analizar la calidad de la fuente de agua, en particular la turbidez o los Sólidos Suspendedos Totales (SST), para diseñar el esquema de recarga. La calidad del agua aceptable varía de un sitio generalmente dependiendo de condiciones

locales del acuífero. En Australia se aplica un valor guía máximo de 10 mg/l para sólidos suspendidos totales, carbono orgánico total y nitrógeno total para la fuente de agua a recargar, esto para evaluar los riesgos de colmatación.⁹

Se necesita al menos un pozo de monitoreo dentro de la zona de influencia de la recarga para medir su impacto en el nivel freático. Idealmente, se requiere más de un pozo de monitoreo disponible para la medición. Los medidores de presión *in situ* se pueden usar para recopilar de manera eficiente datos útiles en series de tiempo sobre los niveles de agua. Es importante recopilar datos de línea base para separar las fluctuaciones naturales del nivel freático de las operaciones de recarga.

Caso de aplicación: Pozo seco, sitio de demostración Menashe, Israel

La compañía Mekorot operó un sitio de demostración en Israel para entender más sobre la técnica. Se destacan los siguientes aspectos: a) la caída libre de agua se evita mediante una tubería cerrada con un diseño especial (SAT); y b) el agua se vierte debajo del nivel freático y se recarga a velocidades lentas evitando la agitación del agua y el efecto cascada, de modo de reducir la aireación del agua.¹⁰



Pozos secos en Menashe, Israel por la compañía Mekorot. Fuente: E. Fernández, en MARSOL 2016

⁶ Medidas puntuales de permeabilidad conocidas como Slug Test. Fuente: F. Javier Sánchez San Román—Dpto. Geología—Univ. Salamanca (España) (2011) http://hidrologia.usal.es/temas/Slug_tests.pdf

⁷ Farthing, M. W., & Ogden, F. L. (2017). Numerical solution of Richards' Equation: a review of advances and challenges. *Soil Science Society of America Journal*, 81(6), 1257-1269

⁸ E. Edwards, B. Washburn and B. Lock (2017). Factsheet: Dry wells for stormwater management. Wells used to drain stormwater and recharge groundwater supplies. American Geosciences Institute. https://www.americangeosciences.org/sites/default/files/CI_Factsheet_2017_4_drywellbasics_170906.pdf

⁹ NRMHC-EPHC-NHMRC (2009). Australian Guidelines for Water Recycling (Phase 2): Managed Aquifer Recharge. (Natural Resource Ministerial Management Council, Environment Protection and Heritage Council and National Health and Medical Research Council), Canberra. <https://www.waterquality.gov.au/guidelines/recycled-water#augmentation-of-drinking-water-supplies-phase-2>

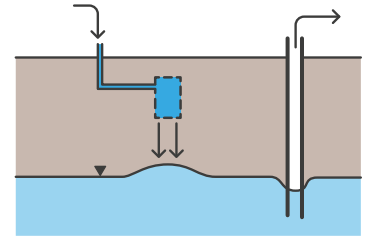
¹⁰ Fernández et al., (2016). MARSOL. Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. MAR design and construction criteria. MARSOL deliverable 13.3, versión 4, 31/10/2016

Galerías de infiltración

Descripción

Las galerías de infiltración suelen tener una profundidad de hasta 2 ó 3 metros y corresponden a zanjas de percolación cubiertas que contienen un medio o una estructura de soporte con espacios vacíos internos para facilitar la infiltración.¹

Este método ocupa menos espacio que las piscinas de infiltración y puede hacer uso del espacio subterráneo (ej: debajo de parques, carreteras, aceras y estacionamientos). Evitan algunos peligros (crecimiento de algas, problemas de olor, plagas de insectos y seguridad pública) al no haber agua descubierta.



Fuente de agua



Agua de lluvia



Desviación de ríos



Escorrentía

Plazos y costos

Tiempo de ejecución (antes de construcción a escala operacional) → 3-12 meses (incluye investigación de escritorio y fase de prueba o piloto)

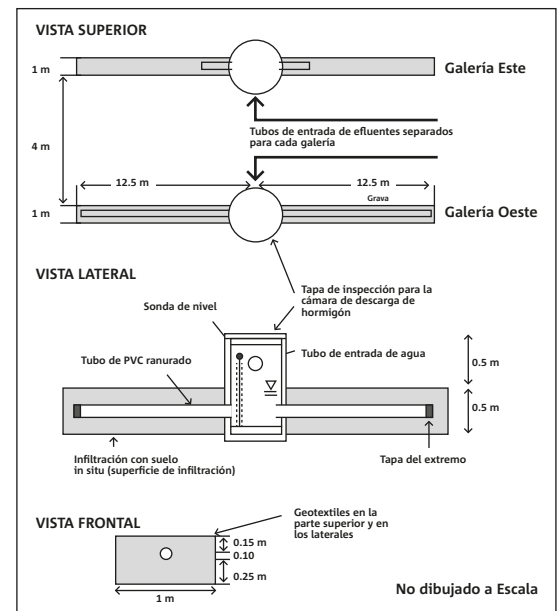
Costo relativamente menor en comparación con pozos (por volumen recargado) → Costo nivelado² \$0.19 USD/m³. Los costos pueden variar dependiendo de si se usa de infraestructura existente o una nueva construcción, la topografía, el subsuelo y el grado y extensión del paisaje.³

Costos de operación, mantención y renovación incluyen → Consumo de energía y materiales, mano de obra, renovación periódica de infraestructura, etc.

Diseño y construcción

Las galerías comúnmente se forran con geotextil permeable⁴ en la parte superior y en los laterales de la cámara (ver esquemática), luego se rellenan con grava u otros áridos y finalmente se cubren con tierra vegetal encima. A menudo una tubería perforada corre a través de la parte superior del medio o estructura de soporte para asegurar la distribución efectiva del agua a través del sistema. Puede ser necesario instalar barras alrededor de las secciones de las galerías para evitar que las raíces crezcan en el sistema y causen bloqueos. Una variación del medio o estructura de soporte utiliza un sistema de cajas plásticas modulares con celdas abiertas que pueden ser colocadas en una zanja o tanque rectangular, típicamente alrededor de 0,5 a 1,5 metros de profundidad.

Durante la fase de diseño del esquema, se requieren mediciones en terreno para determinar las tasas de infiltración. Cuando las galerías se disponen en una zona de recarga superficial, generalmente se utiliza *infiltrómetro de doble anillo*⁵, para zonas de recarga más profundas puede ser necesario realizar *pruebas de medidas puntuales de permeabilidad*⁶ o *pruebas de bombeo* en perforaciones existentes en acuíferos similares en el área.



Esquemática de galerías de infiltración. Fuente: Bekele et al. (2013)

¹ También pueden tomar forma de pozos o tranques subterráneos.

² Los costos nivelados se definen como el nivel constante de ingresos necesario cada año para recuperar la inversión, los gastos operativos y de mantenimiento, durante la vida útil del proyecto dividido por el volumen anual del suministro de agua. Para mayor información sobre esta metodología para estimar el costo del esquema RAG, consultar la sección 5.1.2 Costo nivelado del suministro de agua, en el Informe final CNR 2020.

³ Ross, A., Hasnain, S. (2018). Factors affecting the cost of managed aquifer recharge (MAR) schemes. Sustainable Water Resources Management 4: 179-190.

⁴ Un geotextil, es un material textil polimérico, sintético y permeable que tiene aplicación Geotécnica y/o Hidráulica en diferentes obras civiles.

⁵ Universidad Politécnica de Valencia (s.f) Características del infiltrómetro de doble anillo. Revisado en: 28-02-2020

<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7840/AD%20Infiltrometro.pdf>

⁶ Medidas puntuales de permeabilidad conocidas como Slug Test. Fuente: F. Javier Sánchez San Román-Dpto. Geología-Univ. Salamanca (España) (2011) http://hidrologia.usal.es/temas/Slug_tests.pdf

⁷ Farthing, M. W., & Ogden, F. L. (2017). Numerical solution of Richards' Equation: a review of advances and challenges. Soil Science Society of America Journal, 81(6), 1257-1269.

⁸ Argue, J. R. (Editor) 2013, Water Sensitive Urban Design: basic procedures for 'source control' of stormwater – a handbook for Australian practice, Urban Water Resources Centre, University of South Australia, Adelaide, South Australia, in collaboration with Stormwater Industry Association and Australian Water Association. <https://www.unisa.edu.au/siteassets/epi-server-6-files/documents/itee/afmg/johnargue-wsud-basic-procedures-for-source-control-student-edition.pdf>

⁹ Department of Water (2007), Best Planning Practice for Stormwater Management, Stormwater Management Manual for Western Australia, Department of Water, Perth, Western Australia https://www.water.wa.gov.au/_data/assets/pdf_file/0018/5355/84985.pdf

¹⁰ Bekele, E., Toze, S., Patterson, B., Fegg, W., Shackleton, M., & Higginson, S. (2013). Evaluating two infiltration gallery designs for managed aquifer recharge using secondary treated wastewater. Journal of environmental management, 117, 115-120.

2.3 Galerías de infiltración

En base a los resultados medidos, se puede calcular la tasa de infiltración utilizando la ley de Darcy. También se pueden utilizar cálculos computacionales más avanzados (ej. métodos basados en la ecuación de Richards⁷) realizados por hidrogeólogos, pedólogos o ingenieros debidamente capacitados. Existe una gran variedad de literatura que presenta criterios de diseño más detallados para las galerías de infiltración y estructuras similares.^{8 9 10}

Condiciones relevantes

- **Calidad del agua.** Requieren una fuente de agua de calidad adecuada para reducir la obstrucción. Se prefiere el agua de baja turbidez ya que el mantenimiento (limpieza) de las galerías es más costoso que para estructuras abiertas (ej. piscinas o canales).
- **Características del acuífero.** El acuífero debe ser capaz de recibir y almacenar agua adicional; si no hay espacio disponible en el momento de la recarga, entonces ésta no es viable. Las tasas de recarga deben ser adecuadas para infiltrar el volumen de agua objetivo. Para este método, la presencia de capas de baja permeabilidad debajo de la estructura puede afectar las tasas de infiltración. Este método se aplica comúnmente en suelos arenosos que cubren un acuífero transmisivo (sedimentos no consolidados, arena, grava). Es necesario evaluar si otros usuarios de aguas subterráneas o ecosistemas conectados podrían verse afectados negativamente por las operaciones de recarga, a fin de reducir los potenciales impactos y riesgos asociados.

Monitoreo

El parámetro más crítico para monitorear es las tasas de infiltración, ya que permite determinar si el sistema está logrando objetivos de rendimiento y cuantificar el beneficio de su operación. Esto implica saber cuánta agua se captura y recarga, y cuánta se recupera (cuando corresponda). Una reducción marcada en las tasas de infiltración indicará la necesidad de remediación del suelo para remover la obstrucción. También es posible que se requiera un mayor nivel de pretratamiento del agua antes de la infiltración.

Es importante comprender la calidad de la fuente de agua, en particular la turbidez o los Sólidos Suspendedos Totales (SST), para diseñar el esquema de recarga. La calidad del agua aceptable varía de un sitio a otro generalmente dependiendo de condiciones locales del acuífero. En Australia se aplica un

valor guía máximo de 10 mg/l para SST, carbono orgánico total y nitrógeno total para la fuente de agua a recargar, esto para evaluar los riesgos de colmatación en las fases tempranas de la investigación.¹¹

Se necesita al menos un pozo de monitoreo dentro de la zona de influencia de la recarga para medir su impacto en el nivel freático. Idealmente, debe haber más de un pozo de monitoreo disponible para la medición. Los medidores de presión *in situ* se pueden usar para recopilar de manera eficiente datos útiles en series de tiempo sobre los niveles de agua. Es importante recopilar datos de línea base para separar las fluctuaciones naturales del nivel freático de las señales de las operaciones de recarga.

Caso de aplicación: Galerías de infiltración en Perth, Australia



Galerías de infiltración utilizando un sistema de cajas para la cosecha y la recarga de escorrentía urbana en la ciudad de Mandurah, Australia. Fuente: Foto iz: Department of Water, Western Australia (2007); Foto der: Grahame Heal, City of Mandurah (2004);¹²



Existen muchos ejemplos de galerías de infiltración en Perth, Australia, donde los suelos y los acuíferos arenosos son excesivamente extensos en gran parte de la ciudad. La escorrentía superficial se dirige al sistema de recarga atravesando algún material filtrante como pretratamiento. Las galerías generalmente tienen una tubería de desbordamiento para eventos de tormentas considerables. Hay una gama de productos que tienen varias capacidades de soporte de peso para que la superficie del sistema pueda ser usada para áreas de parque o estacionamiento de vehículos. Estos sistemas pueden combinarse para tratar una gran área. Un buen ejemplo es de la localidad de Mandurah en el sur de Perth, que utiliza un sistema de cajas debajo de un parque.¹²

¹¹ NRMCC–EPHC–NHMRC (2009). Australian Guidelines for Water Recycling (Phase 2): Managed Aquifer Recharge. (Natural Resource Ministerial Management Council, Environment Protection and Heritage Council and National Health and Medical Research Council), Canberra. <https://www.waterquality.gov.au/guidelines/recycled-water#augmentation-of-drinking-water-supplies-phase-2>

¹² Department of Water (2007), Best Planning Practice for Stormwater Management, Stormwater Management Manual for Western Australia, Department of Water, Perth, Western Australia https://www.water.wa.gov.au/_data/assets/pdf_file/0018/5355/84985.pdf

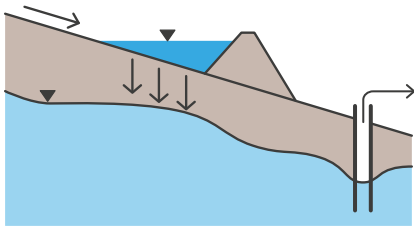
Métodos de infiltración dentro del cauce

Descripción

Los métodos de infiltración dentro del cauce comprenden una gama de técnicas diseñadas para interceptar y retener el agua dentro de la línea del curso de agua y promover la infiltración a través del lecho del río hacia el acuífero no confinado. Estos métodos pueden desplegarse en serie para reducir las pérdidas y recargar áreas más grandes. A continuación, se presentan tres métodos comúnmente aplicados dentro del cauce:

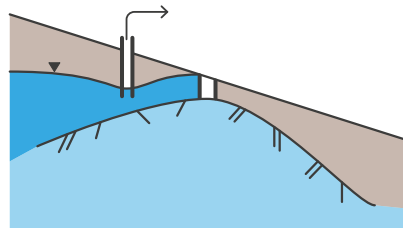
Estanques de percolación

Se construyen sobre el cauce de un río intermitente¹ para retener escurrimiento superficial (micros embalses), aumentando la infiltración a través del fondo del río a acuíferos no confinados, que luego puede ser extraída aguas abajo. Esta técnica también puede aplicarse en serie para capturar y recargar el agua en varios puntos a lo largo de un río. Este método reduce la energía mecánica de la escorrentía superficial y la tasa de flujo, mejorando así la infiltración y reduciendo la erosión.



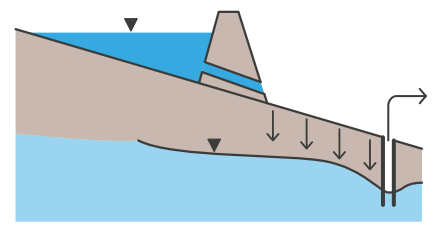
Represas subterráneas

Se aplican en cauces intermitentes donde el basamento de roca limita al flujo del agua subterránea. Se construye una zanja a través del fondo del cauce y se excava en el basamento. Luego se rellena con material de baja permeabilidad para ayudar en la retención de flujos en el depósito aluvial saturado, facilitando así la infiltración y elevando el nivel piezométrico.



Descarga / liberación de agua de represa

Utiliza represas en cauces intermitentes para detener el agua y así hacer más lenta su liberación aguas abajo, lo que mejora significativamente la recarga a los acuíferos. Esto puede hacerse utilizando una represa existente, lo que debe ser reflejado en las reglas de operación de la misma.



Fuentes de agua



Agua de lluvia



Desviación de ríos



Escorrentía

Plazos y costos

Tiempo de ejecución (desde el diseño hasta la puesta en operación) → 3-12 meses (incluye investigación de escritorio y fase de prueba o piloto)²

Costos relativamente menores en comparación con pozos de infiltración (por volumen recargado) → Costo total nivelado³ durante vida útil \$152 CLP/m³ (valor tomado de piscinas de infiltración ya que se espera que estos métodos atraigan costos similares o más baratos)⁴

Costos de operación, mantenimiento y renovación incluyen → Consumo de energía y materiales, mano de obra, renovación periódica de infraestructura, etc.

La inversión inicial para la descarga de agua de represa, utilizando las represas existentes, es prácticamente nula. La inversión inicial para los nuevos sistemas dentro del cauce varía de acuerdo con el tamaño, capacidad, características topográficas, hidrogeológicas e hidrológicas locales, así como con respecto a la accesibilidad al sitio y a los costos de materiales de construcción. En general, se utilizan estructuras de ingeniería, materiales básicos y técnicas de construcción relativamente sencillos.

¹ Cauces intermitentes (también conocidos como cauces efímeros) refieren a ríos con un régimen particular, que tienen caudales superficiales de forma temporal durante y después de un período de lluvia en la localidad inmediata.

² Los tiempos dependen en el nivel de información ya disponible y el nivel de complejidad del proyecto.

³ Los costos nivelados se definen como el nivel constante de ingresos necesario cada año para recuperar la inversión, los gastos operativos y de mantenimiento, durante la vida útil del proyecto dividido por el volumen anual del suministro de agua. Se convirtieron los valores de USD a CLP, utilizando una tasa de cambio de \$800 CLP (02/20). Para mayor información sobre esta metodología para estimar el costo del esquema RAG, consultar la sección 5.1.2 Costo nivelado del suministro de agua, en el Informe final CNR 2020.

⁴ Ross, A., Hasnain, S. (2018). Factors affecting the cost of managed aquifer recharge (MAR) schemes. Sustainable Water Resources Management 4: 179-190.

Diseño y construcción

Los **estanques de percolación** son más eficaces cuando los cauces son relativamente estrechos y la topografía permite la construcción eficiente de presas u otras estructuras de retención. Se diseñan en base a una sección transversal del cauce que normalmente no supera los 3 metros de altura. La construcción debe incorporar un vertedero hidráulico para que los desbordes no se liberen de forma descontrolada. Es importante que la calidad del agua de la fuente sea suficiente para que este método sea sostenible a largo plazo. El mantenimiento de la permeabilidad del lecho del arroyo (ej. la remoción mecánica de las capas de sedimentos) puede ser costoso. Una modificación adicional del cauce (ej. la remoción de material de baja permeabilidad del lecho del río o el ensanchamiento del cauce) puede mejorar el potencial de recarga.⁵

Las **represas subterráneas** utilizan el perfil de la geología del basamento y el acuífero aluvial para crear un tipo de estructura de retención subterránea. Este método es ideal cuando las conductividades hidráulicas del acuífero y los gradientes y velocidades de agua subterránea son altas, ya que retiene el agua recargada en el área circundante, de modo que el comportamiento del nivel freático y, por consiguiente los beneficios, se materializan localmente.

Las **descargas de agua de represas** generalmente utilizan infraestructura (presas) existente para aumentar la infiltración aguas abajo y proporcionar una capacidad de almacenamiento adicional. También permiten que el almacenamiento superficial se gestione de manera diferente, por ejemplo, reteniendo espacio adicional en la presa para la mitigación de crecidas y para la captación de flujos adicionales. Este método también puede ser incorporado en la planificación de nuevas presas teniendo en cuenta la capacidad de almacenamiento subterráneo (a través de recarga adicional). Lo anterior puede optimizar los costos de construcción, ya que un almacenamiento superficial más pequeño en conjunto con el almacenamiento subterráneo puede proporcionar una capacidad similar de una presa más grande y costosa.

La velocidad de infiltración varía a medida que el agua recargada se desplaza a través de la zona no saturada y por cambios en la presión hidráulica (nivel freático) como resultado de la infiltración. Durante la fase de diseño del esquema, se requieren mediciones en terreno para determinar las tasas de infiltración. Generalmente se utiliza un infiltrómetro de doble anillo⁶ que permite calcular el tiempo que requiere una cantidad determinada de agua (por área de superficie) para penetrar el suelo. En base a los resultados medidos, se puede calcular la tasa de infiltración utilizando la ley de Darcy. También se pueden utilizar modelos analíticos y numéricos realizados por hidrogeólogos, pedólogos o ingenieros debidamente capacitados.⁷

Caso de aplicación: Tanque de percolación en Alicante, España



Pared de un tanque de percusión en la provincia de Alicante, España.
Fuente: E. Fernández, en MARSOL 2016

Este estanque de percolación utilizó hormigón armado para los cimientos y la construcción de las estructuras. Cada uno tiene una forma trapezoidal y una altura de 3,5 m. El primer depósito es de 10,7 x 2,7 metros con una capacidad de drenaje de 147 m³/s, que se corresponde al caudal máximo para un período de retorno de 50 años. El segundo depósito es de 15,8 x 0,8 m y permite un caudal de 31,4 m³/s que corresponde al caudal máximo para un período de retorno de 100 años. En este sitio la flora y la fauna típica de los suelos más húmedos y profundos comenzaron a poblar el área alrededor del sitio, lo que constituye un servicio ecosistémico que se suma al de almacenamiento de agua subterránea y al control de la erosión.⁸

Condiciones relevantes

- **Calidad del agua.** Requieren una fuente de agua de calidad adecuada para reducir la incidencia de las obstrucciones (deposición de Sólidos Suspendidos Totales /SST), pero generalmente son menos sensibles que los métodos fuera del cauce, ya que sus estructuras proporcionan un tratamiento natural (sedimentación) y pueden limpiarse eficientemente (escarificación mecánica y/o hidráulica).
- **Características del acuífero y del suelo.** El acuífero debe ser capaz de recibir y almacenar agua adicional; si no hay espacio disponible al aumentar la recarga, entonces la recarga no es viable. Además, las tasas de recarga deberían ser adecuadas para infiltrar el volumen de agua objetivo. Es necesario evaluar si otros usuarios de aguas subterráneas o ecosistemas conectados podrían verse afectados negativamente por las operaciones de recarga, a fin de reducir los potenciales impactos y riesgos asociados. Son apropiados para formaciones aluviales, dunas de arena o sistemas de grava; sin embargo, los acuíferos con una alta transmisibilidad pueden significar la rápida dispersión del agua recargada y puede limitar el volumen de agua que se puede recuperar. Dependen de lechos de ríos (o represas) que están encima de acuíferos no confinados y cuentan con pocas capas de suelo de baja permeabilidad que impiden la infiltración.

⁵ Fernández et al., (2016). MARSOL. Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. MAR design and construction criteria. MARSOL deliverable 13.3, versión 4, 31/10/2016.

⁶ Universidad Politécnica de Valencia (s.f) Características del infiltrómetro de doble anillo. Revisado en: 28-02-2020 <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7840/AD%20Infiltrometro.pdf>

⁷ Farthing, M. W., & Ogden, F. L. (2017). Numerical solution of Richards' Equation: a review of advances and challenges. Soil Science Society of America Journal, 81(6), 1257-1269.

Monitoreo

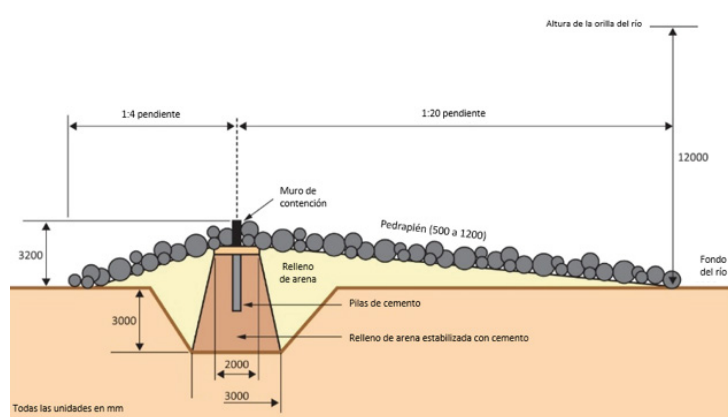
El parámetro más crítico para monitorear es la tasa de infiltración, la que permite determinar si el sistema está logrando objetivos de rendimiento y cuantificar el beneficio de su operación. Esto implica saber cuánta agua se captura y recarga, y cuánta se recupera (cuando corresponda). Una reducción marcada en las tasas de infiltración indicará la necesidad de remediación del suelo para remover la obstrucción. También es posible que se requiere un mayor nivel de pretratamiento del agua antes de la infiltración.

Para diseñar el esquema de recarga, es importante comprender la calidad de la fuente de agua, en particular la turbidez o los SST. La calidad del agua aceptable varía de un sitio a otro generalmente dependiendo de condiciones locales del acuífero. En Australia se aplica un valor guía máximo de 10 mg/l para SST, carbono

orgánico total y nitrógeno total para la fuente de agua a recargar, esto para evaluar los riesgos de colmatación en las fases tempranas de la investigación.⁹

Se necesita al menos un pozo de monitoreo dentro de la zona de influencia de la recarga para medir su impacto en el nivel freático. Idealmente hay más de un pozo de monitoreo disponible para la medición. Los medidores de presión *in situ* se pueden usar para recopilar de manera eficiente datos útiles en series de tiempo sobre los niveles de agua. Es importante recopilar datos de línea base para separar las fluctuaciones naturales del nivel freático de las señales de las operaciones de recarga. Estar comunicados con los usuarios de los alrededores y aguas abajo del sistema de recarga es importante, para estar informados en tiempo real y tomar medidas inmediatas en caso de que ocurran cambios o impactos negativos.

Caso de aplicación: Represa subterránea en el Río Ashburton en Pilbara, Australia



Esquema de la presa subterránea de Minderoo en Australia Occidental.
Fuente: Pennington Scott (2014)

La represa subterránea fue instalada y operada por el Grupo Minderoo¹⁰ en la Estación del mismo nombre. Los modelos de flujo de agua subterránea y de balance hídrico sugieren que la represa proporciona aproximadamente 250.000 a 400.000 m³ de recarga adicional por año, bajo condiciones hidráulicas conectadas. El modelo de balance hídrico resalta la importancia de la desconexión hidráulica para inducir la recarga¹¹. Bajo estas condiciones es factible que la represa de recarga pueda contribuir con una recarga adicional de 1.000.000 m³ de agua por año. El mantenimiento de niveles más bajos de agua subterránea aumentará la recarga durante el inicio del flujo e incrementará la efectividad de la recarga de la presa. Sin embargo, aumentos adicionales en la extracción más allá del mantenimiento de las condiciones desconectadas no aumentarán más la recarga.

Caso de aplicación: Descarga de agua de la Represa Ophthalmia en Newman, Noroeste de Australia

La represa fue construida en 1981 como parte de un esquema de almacenamiento conjunto de aguas superficiales y subterráneas para apoyar las operaciones mineras y la comunidad local. Comprende de una represa de 31 Mm³ de capacidad, cuatro piscinas de infiltración, dos piscinas dentro del cauce y un canal a cielo abierto, todos los cuales pueden ser inundados (según necesidad) desde la represa usando descargas reguladas.



La Represa Ophthalmia, cerca de Newman en el Noroeste de Australia, recarga eficazmente el acuífero. Fuente: Comisión de Desarrollo de Pilbara (s.f.)¹³

En un área con una evaporación anual de 3 m/año, este esquema ha asegurado con éxito el suministro de agua de la comunidad durante décadas. Desde la construcción del esquema, no se ha observado una reducción de largo plazo en los niveles de agua subterránea, mientras que anteriormente los niveles habían estado cayendo como resultado de un bombeo no sostenible. Fugas desde el fondo de la presa son significativas (~12 Mm³/año) y han sido suficientes para mantener los altos niveles del acuífero en los últimos años sin el uso de las descargas de la represa.¹²

⁸ Fernández et al., (2016). MARSOL. Demonstrating Managed Aquifer Recharge as a Solution to Water Scarcity and Drought. MAR design and construction criteria. MARSOL deliverable 13.3, versión 4, 31/10/2016.

⁹ NRMCC-EPHC-NHMRC (2009). Australian Guidelines for Water Recycling (Phase 2): Managed Aquifer Recharge. (Natural Resource Ministerial Management Council, Environment Protection and Heritage Council and National Health and Medical Research Council), Canberra, <https://www.waterquality.gov.au/guidelines/recycled-water#augmentation-of-drinking-water-supplies-phase-2>

¹⁰ Pennington Scott (2014). Minderoo Group Ashburton River Managed Aquifer Recharge Scheme Technical Feasibility Assessment. Perth.

¹¹ Vanderzalm JL, Page DW, Gonzalez D, Barry KE, Dillon PJ, Taylor AR, Dawes WR, Cui T and Knapton A (2018) Assessment of managed aquifer recharge (MAR) opportunities in the Fitzroy, Darwin and Mitchell catchments. A technical report to the Australian Government from the CSIRO Northern Australia Water Resource Assessment, part of the National Water Infrastructure Development Fund: Water Resource Assessments. CSIRO, Australia.

¹² Department of Water (2009). Newman Water Reserve drinking water source protection plan. Government of Western Australia, Department of Water. Water resource protection series. Report No. 97. June 2009. https://www.water.wa.gov.au/_data/assets/pdf_file/0012/5151/107903.pdf

¹³ Pilbara Development Commission (S.F). Ophthalmia Dam Newman. <https://www.pdc.wa.gov.au/news-media-2/gallery>

4 Bibliografía

- Bekele, E., Toze, S., Patterson, B., Fegg, W., Shackleton, M., & Higginson, S. (2013). Evaluating two infiltration gallery designs for managed aquifer recharge using secondary treated wastewater. *Journal of environmental management*, 117, 115-120.
- Dillon, P.J. (2005). Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 13 (1) 313-316.
- Dirección General de Aguas (DGA) (2013). Análisis y Síntesis Preliminar de Iniciativas Sobre Recarga Artificial en Chile.
- Fundación Chile (2019). Escenarios Hídricos 2030. Transición Hídrica: El Futuro del Agua en Chile.
- NRMCC–EPHC–NHMRC (2009). Australian Guidelines for Water Recycling (Phase 2): Managed Aquifer Recharge. (Natural Resource Ministerial Management Council, Environment Protection and Heritage Council and National Health and Medical Research Council), Canberra;
<https://www.waterquality.gov.au/guidelines/recycled-water#augmentation-of-drinking-water-supplies-phase-2>
- N° Pizarro, R; Flores, J; Sangüesa, C; Martínez, E; García, J (2004). Diseño de obras para la conservación de aguas y suelos;
http://ctha.atalca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/libros/disenio_de_obras_para_la_conservacion_de_aguas_y_suelos.pdf
- Ross A and Hasnain S (2018). Factors affecting the cost of managed aquifer recharge (MAR) schemes. *Sustainable Water Resource Management*;
<https://recharge.iah.org/files/2018/09/2018-p179-191-Ross-and-Hasnain-final-corrected.pdf>
- Sánchez, J. (2014). Conceptos Fundamentales de Hidrología; <https://docplayer.es/5767013-Conceptos-fundamentales-de-hidrogeologia.html>
- OMS (2011). Guidelines for Drinking Water quality 4th edition. Organización Mundial de Salud, Geneva.



**Mejor Riego
para Chile**

yo
cuido
el agua



www.cnr.gob.cl

www.csiro.cl