

**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

**DIAGNÓSTICO DE METODOLOGÍA
PARA LA PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS
DE PROYECTOS DE RECARGA
ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS**

INFORME FINAL

**REALIZADO POR:
AMPHOS 21 CONSULTING CHILE LTDA
S.I.T. N°343**

Santiago, Diciembre 2014

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas (TP)
Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe de División Estudios y Planificación
Sr. Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Sr. Juan Atán Díaz

Inspector Fiscal Subrogante
Sra. Andrea Osses Vargas

AMPHOS 21 CONSULTING CHILE LTDA

Dr. Jordi Guimerà Solà
Jefe de Proyecto
Hidrogeólogo

Profesionales:

Ingeniero Civil Hidrólogo Reynaldo Payano, MSc
Abogada Silvia Gallardo

Dra. Hidrogeología Ester Vilanova Muset
Ingeniero Forestal Daniel Montaner Fernández
Hidrogeólogo Jordi Escorcía Torres, MSc
Dr. Hidrogeología Jorge Molinero
Dr. Hidrogeología Jordi Font Capó

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVOS Y ALCANCE	2
1.2 CONSIDERACIONES DGA – AMPHOS 21	3
1.3 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	4
SIGLAS	6
2. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....	7
2.1 LA RECARGA ARTIFICIAL	7
2.2 METODOLOGÍA	7
2.3 LA RECARGA ARTIFICIAL EN CHILE.....	10
2.3.1 Síntesis y análisis de la experiencia de recarga artificial en Chile	16
2.4 LA RECARGA ARTIFICIAL A NIVEL INTERNACIONAL	21
2.4.1 Introducción	21
2.4.2 Revisión y análisis de la recarga artificial a nivel internacional.....	22
2.5 SÍNTESIS DE EXPERIENCIAS PARA LA SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS Y ZONAS PARA LA RECARGA ARTIFICIAL	52
2.5.1 Criterios y parámetros para la selección de potenciales cuencas, subcuencas y/o acuíferos para la recarga artificial	57
2.5.2 Cuencas y/o acuíferos con condiciones potenciales para la recarga artificial en Chile	77
2.5.3 Dimensión medioambiental en las experiencias internacionales	91
3. ANÁLISIS TÉCNICO DE LA RECARGA ARTIFICIAL	93
3.1 INTRODUCCIÓN	93
3.2 TIPOS DE DISPOSITIVOS	93
3.2.1 Introducción	93
3.2.2 Diferentes dispositivos de recarga artificial	94
3.2.3 Características de los principales tipos de dispositivos	97
3.2.4 Principales tipos de dispositivos a considerar	105
3.3 TOMA DE DECISIONES EN UN PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL.....	108
3.3.1 Proceso de decisión	108

3.3.2	Demanda de agua	110
3.3.3	Agua de recarga.....	110
3.3.4	Características del acuífero	114
3.3.5	Características del emplazamiento.....	128
3.3.6	Complejidad del dispositivo	129
3.4	SELECCIÓN DEL TIPO DE DISPOSITIVO	130
3.5	PLAN DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL	132
3.5.1	Técnicas de monitoreo y verificación de la efectividad de la recarga.....	132
3.5.2	Evaluación de la dilución en los puntos de muestreo	134
3.5.3	Consideraciones ambientales: posibles contaminaciones eventuales y detección de impactos.....	134
3.5.4	Aspectos operacionales: colmatación o “clogging”	137
4.	ANÁLISIS LEGAL DE LA RECARGA ARTIFICIAL	147
4.1	NORMATIVA REFERIDA A LA RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS.....	147
4.1.1	Procedimiento para ejecutar obras de recarga artificial.....	147
4.1.2	Procedimiento de constitución del respectivo derecho provisional	150
4.2	IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS DONDE LA LEGISLACIÓN PERMITE LA RECARGA ARTIFICIAL Y ÁREAS DONDE LA PROHÍBE O RESTRINGE.....	151
4.2.1	Ámbito de aplicación.....	151
4.2.2	Características de las aguas a recargar	151
4.3	NORMATIVA AMBIENTAL.....	154
4.3.1	Ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental	154
4.3.2	Protección ambiental del respectivo sector hidrogeológico de aprovechamiento común	155
5.	GUÍA METODOLÓGICA PARA PRESENTAR PROYECTOS DE RECARGA ARTIFICIAL	156
5.1	PROCESO DE SOLICITUD DE UNA OBRA DE RECARGA Y UN DERECHO DE APROVECHAMIENTO CON CARGO A LA RECARGA	156
5.2	FUNCIONAMIENTO INTERNO DE DGA EN EL PROYECTO DE RECARGA ARTIFICIAL	161
5.2.1	Facultades, funciones y atribuciones de las unidades de la DGA vinculadas en el proyecto de recarga artificial	162

5.3	PROCEDIMIENTO GENERAL DE TRAMITACIÓN DE SOLICITUDES	168
5.3.1	Etapas de este procedimiento general	168
5.3.2	Primera Etapa: Presentación	169
5.3.3	Segunda Etapa: Ingreso del expediente al catastro público de aguas (CPA)	171
5.3.4	Tercera Etapa: Publicaciones y aviso radial	171
5.3.5	Cuarta Etapa: Oposiciones.....	173
5.3.6	Quinta Etapa: Revisión formal.....	173
5.3.7	Sexta Etapa: Solicitud de antecedentes técnicos y legales	175
5.3.8	Séptima Etapa: Solicitud de fondos	175
5.3.9	Octava Etapa: Inspección a terreno	177
5.3.10	Novena Etapa: Elaboración del informe técnico	177
5.3.11	Décima Etapa: Etapa resolutive	179
5.3.12	Décima Primera Etapa: Recursos de reconsideración y reclamación	180
5.4	AUTORIZACIÓN PARA LA EJECUCIÓN DE OBRAS DE RECARGA ARTIFICIAL	181
5.4.1	Fuente legal.....	181
5.4.2	Ámbito de aplicación.....	182
5.4.3	Quienes pueden solicitarlo	182
5.4.4	Procedimiento de tramitación. Etapas	182
5.5	FASE PILOTO PREVIA A LA OBRA DE RECARGA Y A LA SOLICITUD DE DERECHO CON CARGO A LA RECARGA	193
5.6	CUMPLIMIENTO DE REQUISITOS MEDIOAMBIENTALES	194
5.6.1	Ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental	194
5.6.2	Protección ambiental del respectivo sector hidrogeológico de aprovechamiento común	195
5.7	CONSTITUCIÓN DEL DERECHO DE APROVECHAMIENTO PROVISIONAL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS CON CARGO A LA RECARGA.....	196
5.7.1	Fuente legal.....	196
5.7.2	Ámbito de aplicación.....	196
5.7.3	Quienes pueden solicitarlo	197
5.7.4	Procedimiento de tramitación. Etapas	197
6.	GUÍA METODOLÓGICA PARA ANALIZAR PROYECTOS DE RECARGA	204
6.1	REQUISITOS DE LA SOLICITUD	204

6.2	EVALUACIÓN LEGAL.....	205
6.2.1	Derecho de aprovechamiento.....	205
6.2.2	Propiedad del suelo	206
6.2.3	Afecciones a terceros	207
6.2.4	Normativa aplicable	207
6.3	EVALUACIÓN AMBIENTAL.....	207
6.3.1	Existencia de restricciones ambientales	207
6.3.2	Impactos sobre calidad del agua	208
6.3.3	Identificación de potenciales ecosistemas asociados	209
6.4	EVALUACIÓN TÉCNICA.....	209
6.4.1	Descripción del proyecto de recarga artificial	209
6.4.2	Descripción y características geológicas e hidrogeológicas del sector de la recarga	214
6.5	PLAN DE OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y COMUNICACIÓN.....	220
6.5.1	Plan de operación: inyección.....	220
6.5.2	Plan de mantenimiento	221
6.5.3	Plan de comunicación con la DGA	222
6.5.4	Plan de monitoreo y control de recarga	223
6.5.5	Pautas para la evaluación de la efectividad de la recarga.....	227
6.6	PLAN DE ALERTA TEMPRANA (PAT) PARA EL DERECHO PROVISIONAL CON CARGO A LA RECARGA: EXTRACCIÓN.....	229
6.7	PLAN DE GESTIÓN DE UNA EVENTUAL CONTAMINACIÓN	230
6.8	PLAN DE CIERRE	231
6.9	FASE PILOTO	231
6.10	EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	232
6.11	APROBACIÓN DEL PROYECTO U OBRA DE RECARGA	232
6.12	APROBACIÓN DEL DERECHO DE APROVECHAMIENTO DE CARÁCTER PROVISIONAL CON CARGA A LA RECARGA	233
6.13	PLAN DE SEGUIMIENTO Y FISCALIZACIÓN DE LOS PROYECTOS POR PARTE DE LA DGA	234
7.	APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS GUÍAS METODOLÓGICAS	239
7.1	RESUMEN DE LA APLICACIÓN DE LA GUÍA	239
7.2	APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO CHOAPA	240

7.2.1 Fase previa o de preselección	240
7.2.2 Fase de viabilidad.....	241
7.2.3 Fase de evaluación y diseño	241
7.2.4 Fase implementación (escala industrial)	242
7.3 APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL RÍO QUILIMARÍ	243
7.3.1 Fase previa o de preselección	243
7.3.2 Fase de viabilidad.....	243
7.3.3 Fase de evaluación y diseño	244
7.3.4 Proyecto Piloto.....	244
7.3.5 Fase implementación (escala industrial)	244
7.4 APLICACIÓN EN EL VALLE DEL RÍO ACONCAGUA.....	245
7.4.1 Requisitos de la solicitud	245
7.4.2 Evaluación Legal	245
7.4.3 Evaluación ambiental	246
7.4.4 Evaluación técnica.....	248
7.4.5 Plan de operación y mantenimiento	250
7.4.6 Contenidos de la memoria técnica	251
8. CONCLUSIONES.....	252
8.1 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE ANTECEDENTES DE RECARGA ARTIFICIAL.....	252
8.2 CONCLUSIONES DE LAS GUÍAS METODOLÓGICAS DE PRESENTACIÓN Y EVALUACIÓN DE PROYECTOS DE RECARGA.....	254
8.3 CONCLUSIONES DE LA APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LAS GUÍAS METODOLÓGICAS.....	255
9. REFERENCIAS.....	256

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Mapa de Actores Institucionales para la gestión de los recursos hídricos.....	8
Figura 2-2 Esquema conceptualización de recarga de acuíferos mediante los dos tipos principales de dispositivos usados en Chile. Ejemplo: río Aconcagua.	20
Figura 2-3 Construcción anual de nuevas instalaciones de recarga artificial en Europa ...	23
Figura 2-4 Procedimiento para la identificación de zonas favorables	64
Figura 2-5 Cuencas estudiadas como potenciales para la recarga artificial en Chile	79
Figura 2-6 Esquema de información SIG.....	80
Figura 2-7 Esquema ejemplo de generación de índice multicriterio.....	83
Figura 2-8 Áreas favorables para la recarga artificial	90
Figura 3-1 Catálogo de dispositivos de recarga artificial en Europa.....	97
Figura 3-2 Tipos de dispositivos más habituales	104
Figura 3-3 Proceso de toma de decisión para el inicio de un proyecto de recarga artificial	109
Figura 3-4 Viabilidad de realizar recarga artificial en un determinado acuífero	115
Figura 3-5 Flujograma recomendado para elaborar un estudio geológico	120
Figura 3-6 Flujograma recomendado para elaborar un estudio hidrogeológico	121
Figura 3-7 Tests de infiltración	126
Figura 3-8 Diagrama de flujo para identificar el método o dispositivo de recarga más adecuado.....	131
Figura 5-1 Alcance de las Guías Metodológicas en el proceso de solicitud de un proyecto de Recarga Artificial de Acuíferos (cuadro gris de la Figura).	157
Figura 5-2 Alcance de las Guías Metodológicas y Formulario en el proceso de solicitud de un derecho de aprovechamiento de agua con cargo a la Recarga Artificial de Acuíferos (cuadro gris de la Figura).	160
Figura 6-1 Identificación de impactos ambientales	218

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Ejemplo del tipo de ficha usada para el análisis de antecedentes	9
Tabla 2-2 Resumen de las experiencias más importantes de recarga artificial evaluadas en Chile	18
Tabla 2-3 Resumen de las experiencias más importantes de recarga artificial en Europa occidental	24
Tabla 2-4 Resumen de las experiencias más importantes de Recarga Artificial en Europa Central y Oriental	32
Tabla 2-5 Resumen de las experiencias más importantes de recarga artificial en África ...	35
Tabla 2-6 Resumen de las experiencias más importantes de recarga artificial en Asia	38
Tabla 2-7 Emplazamiento de recarga relevantes en los EE.UU.	41
Tabla 2-8 Resumen de las experiencias más importantes de recarga artificial en América	42
Tabla 2-9 Resumen de las experiencias más importantes de recarga artificial en Oceanía	49
Tabla 2-10 Criterios y cantidad de clases utilizadas en diferentes referencias	62
Tabla 2-11 Propuesta de valores de los parámetros en base a las referencias bibliográficas para dispositivos superficiales y profundos.....	68
Tabla 2-12 Parámetros que se tendrán en cuenta a cada escala de trabajo para cada tipo de dispositivo	74
Tabla 2-13 Cuencas estudiadas como potenciales para la recarga artificial en Chile.....	77
Tabla 2-14 Listado de coberturas SIG recopiladas	81
Tabla 2-15 Cuencas Potenciales de Recarga Artificial.....	85
Tabla 3-1 Métodos o dispositivos de recarga artificial	95
Tabla 3-2 Principales problemas y ventajas de los dispositivos más comunes de recarga	103
Tabla 3-3 Selección de los principales tipos de recarga artificial.....	106
Tabla 3-4 Tipos principales de recarga artificial seleccionados	108
Tabla 3-5 Procedencia del agua, métodos de captura y pre- y post-tratamientos	112
Tabla 3-6 Rango de conductividades hidráulicas (m/d)	116
Tabla 3-7 Técnicas de prevención de la colmatación y descolmatación en dispositivos de inyección	143
Tabla 5-1 Índice de contenidos mínimos para la Memoria Técnica de solicitud de un proyecto de recarga artificial.....	187
Tabla 6-1 Índice de contenidos mínimos para la memoria técnica de solicitud de un proyecto de recarga artificial.....	213
Tabla 6-2 Índice de contenidos mínimos del informe de seguimiento del PAT	235
Tabla 6-3 Posibles tipos de análisis del sistema (por punto y sector en función de si se han definido sectores)	237

ÍNDICE ANEXOS Y APÉNDICES

Anexos

Anexo A: Fichas de antecedentes en Chile.

Anexo B: Fichas de antecedentes en Internacionales.

Anexo C: Ejercicio de aplicación de la guía de presentación de proyectos.

Anexo D: Antecedentes.

Anexo Digital:

- Proyecto SIG.
- Herramienta de evaluación proyectos RA-DGA.

Apéndices

Apéndice A: Guía metodológica para confeccionar la memoria técnica de obra de recarga.

Apéndice B: Modelo de informe técnico para la obra de recarga artificial – RA.

Apéndice C: Ejemplo de aplicación del modelo de informe técnico para la obra de recarga artificial (RA).

Apéndice D: Formulario tipo para la solicitud de derechos de aprovechamientos de agua con cargo a la recarga.

Apéndice E: Modelos tipos de procedimientos administrativos para obra de recarga artificial.

1. Introducción

La recarga artificial de acuíferos se presenta como una alternativa hídrica frente a la escasez de los recursos hídricos subterráneos en algunas zonas del país, gracias al desarrollo exitoso de esta técnica en diversos lugares del mundo.

En Chile, en estos últimos años, se han llevado a cabo diversos proyectos e iniciativas a nivel público y privado, con el fin de establecer zonas con potenciales condiciones para el desarrollo de recarga artificial de acuíferos. Al mismo tiempo se han impulsado experiencias de recarga a nivel nacional e internacional, análisis de los aspectos técnicos, legales, criterios de selección de zonas y alternativas de financiamiento. Sin embargo, no existe un manual o metodología oficial que indique cómo presentar y evaluar los distintos tipos de proyectos de recarga artificial en el país.

La implantación de sistemas de Recarga Artificial de Acuíferos requiere de la autorización de la Dirección General de Aguas (DGA) la cual debe asegurar el buen estado cualitativo y cuantitativo de las aguas superficiales y subterráneas.

En este contexto, la Dirección General de Aguas (DGA), dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP) adjudicó a AMPHOS 21 CONSULTING CHILE LTDA (Consultor) el proyecto "Diagnóstico de Metodología para la Presentación y Análisis de Proyectos de Recarga de Acuíferos" con el objetivo de desarrollar una Guía metodológica para la presentación, evaluación y análisis de proyectos de recarga artificial de acuíferos en Chile, de manera de dar cumplimiento al mandato legal establecido Decreto Supremo N° 203 y en el Código de Aguas.

Por lo tanto, lo presentado en este estudio corresponde a una propuesta del Consultor que la DGA analizará para su posterior utilización.

1.1 Objetivos y alcance

El objetivo principal de este estudio es desarrollar una guía metodológica para la presentación, evaluación y análisis de proyectos de recarga artificial de acuíferos en Chile.

Esta guía metodológica intenta responder tanto a las necesidades de los interesados en construir una instalación de recarga artificial como a las de la administración responsable de regular esta actividad, quien la utilizará como base para revisar este tipo de proyectos. La Guía establecerá los contenidos mínimos que debe tener un proyecto de recarga artificial en el momento de presentarse (en coherencia con el Art. 48 del DS N° 203), incluyendo los aspectos de caracterización de calidad de las aguas de recarga, plan de monitoreo y plan de acción frente a una eventual contaminación relacionada con la recarga. Además, incluirá una revisión de todas las iniciativas desarrolladas en Chile.

Los objetivos específicos planteados para lograr el objetivo general del estudio son:

- Realizar una revisión bibliográfica, tanto a nivel nacional como internacional, de proyectos e iniciativas diversas de recarga artificial de acuíferos. Se incluyen tanto experiencias finalizadas como en desarrollo y de todo tipo de recarga artificial (almacenamiento y recuperación en acuíferos –ASR, *Aquifer Storage and Recovery*, en sus siglas en inglés- o Tratamiento e Infiltración a través del Suelo –SAT, *Soil Aquifer Treatment*).
- Analizar aspectos técnicos y legales asociados a la recarga artificial en Chile, incluyendo tanto los aspectos relacionados con la recarga como los derivados de los usos del agua recargada.
- Establecer una propuesta de guía metodológica para la presentación de proyectos de recarga inducida la cual fije el estándar mínimo para los proyectos a presentar.
- Realizar una propuesta de guía metodológica a ser utilizada por la DGA para analizar y evaluar los proyectos de recarga artificial, tanto en la fase de diseño como de seguimiento y fiscalización de proyectos asociados principalmente a monitoreo de calidad y comportamiento de las aguas recargadas en el acuífero.

- Aplicar y validar la metodología propuesta para la presentación y análisis de proyectos de recarga de acuíferos en tres cuencas, subcuencas y /o acuíferos de Chile.

1.2 Consideraciones DGA – AMPHOS 21

AMPHOS 21 CONSULTING CHILE LTDA como equipo consultor ha considerado necesario hacer presente que los resultados expuestos en este estudio, son producto de una serie de actividades realizadas a lo largo del desarrollo del proyecto, en conjunto con la Dirección General de Aguas, como recopilación de antecedentes, visita a terreno y principalmente, reuniones y talleres de trabajo con las diferentes divisiones o departamentos de la DGA vinculadas en el proyecto de recarga artificial (DARH, DEP, DCPRH, Fiscalización y División Legal), donde se compartieron las opiniones técnicas por parte de la DGA y la experiencia del equipo consultor.

Las diferentes actividades que se fueron realizando, conforme al progreso del estudio, estuvieron encaminadas a aportar información para la elaboración de las Guías Metodológicas para la presentación y evaluación de proyectos de recarga artificial.

Hoy en día, en Chile se están desarrollando proyectos de recarga artificial cuyos resultados son muy satisfactorios. A pesar de que el marco normativo es muy disperso en el tema de recarga artificial, se han venido haciendo esfuerzos y avances significativos en materia de regularización de los proyectos de recarga artificial, donde las Guías Metodológicas desarrolladas serán una herramienta clave tanto para la autorización de ejecución de las obras de recarga como la constitución del derecho de agua con cargo a la recarga artificial de acuífero.

1.3 Estructura del documento

Como informe final del proyecto, este documento se ha estructurado de la forma siguiente:

Capítulo 1. Introducción, donde se presentan los objetivos y alcances del proyecto.

Capítulo 2. Recopilación, análisis y síntesis de antecedentes, que apuntan a: 1) Experiencias de recarga artificial en Chile y en el mundo, 2) Criterios y parámetros para la selección de cuencas, subcuencas y/o acuíferos con potencial para la recarga artificial, 3) Cuencas y/o acuíferos con condiciones potenciales para la recarga artificial y 4) Proyecto SIG, que incluye el análisis realizado con el Sistema de Información Geográfico para identificar las áreas favorables en Chile para la recarga artificial en base a los criterios y parámetros.

Capítulo 3. Análisis técnico de la recarga artificial en Chile, donde se ha realizado un análisis de diferentes aspectos de la recarga artificial, tales como: tipo de técnica o dispositivo usado para la recarga, categorización de proyectos según objetivos, efectividad de la recarga, análisis de impactos, aspectos de diseño, operación y mantenimiento, caracterización hidrogeológica de formaciones acuíferas (parámetros característicos de los rellenos, volumen disponible en el acuífero para almacenar la recarga, permeabilidad), entre otros aspectos.

Capítulo 4. Análisis legal de la recarga artificial en Chile, donde se ha realizado un análisis de diferentes aspectos legales de la recarga artificial, tales como: consideraciones ambientales, afecciones a terceros, calidad de agua a infiltrar y en el acuífero receptor, análisis legal respecto a la materialización y operación, disposiciones legales aplicables directamente a la recarga artificial, normativas y reglamentos vigentes en Chile, obtención del derecho provisional con cargo a la recarga, entre otros aspectos.

Además, se ha considerado un análisis de los proyectos de recarga artificial que se presentan en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental - SEIA (EIAS, DIAs) como medidas de mitigación, reparación o compensación.

Capítulo 5. Guía metodológica para presentar proyectos de recarga, donde se recomiendan las pautas que debe seguir cualquier usuario para elaborar y solicitar la

autorización de ejecución de un proyecto de recarga artificial en Chile. Esto incluye, la elaboración de un Formulario tipo para solicitud de derechos de aprovechamientos de agua con cargo a la recarga.

Capítulo 6. Guía metodológica para analizar y evaluar proyectos de recarga, que se propone como una herramienta para facilitar el proceso de evaluación de proyectos de recarga artificial por parte de la Dirección General de Aguas (DGA).

Capítulo 7. Aplicación y validación de las guías metodológicas, en el cual se ha realizado un ejercicio metodológico en tres cuencas de Chile con características distintas: río Choapa, río Quilimarí y valle del río Aconcagua. En este capítulo se presenta un resumen o *check list* de lo que tiene cada proyecto en función de lo que establecen las guías metodológicas.

Capítulo 8. Conclusiones, en el cual se presentan los aspectos más relevantes que se identificaron a lo largo del estudio, resaltando el estado actual y futuro de la recarga artificial en Chile.

Capítulo 9. Referencias, donde se presentan los diferentes antecedentes nacionales e internacionales (artículos científicos, libros, tesis doctoral, informes, estudios, proyectos, etc.) que se han consultado sobre la recarga artificial de acuíferos.

Finalmente, cabe señalar que los anexos y apéndices que forman parte de este Informe, han sido enumerados alfabéticamente y mencionándolos en cada capítulo, con el objetivo de facilitarle la búsqueda al lector. Dichos anexos y apéndices contienen información que ha sido recopilada y que ayudan a entender lo presentado en los diferentes capítulos.

SIGLAS

ASR: Aquifer Storage and Recovery (Almacenamiento y recuperación de agua en el acuífero).

ASTR: Aquifer Storage, Transfer and Recovery (Almacenamiento de agua en el acuífero, transferencia hacia otro punto y recuperación).

CIRH: Centro de Información de Recursos Hídricos.

CPA: Catastro Público de Aguas.

DARH: Departamento de Administración de Recursos Hídricos.

DCPRH: Departamento de Conservación y Protección de los Recursos Hídricos.

DEP: División de Estudios y Planificación.

DGA: Dirección General de Aguas.

DIFROL: Dirección de Fronteras y Límites del Estado.

IGM: Instituto Geográfico Militar.

ITT: Informe Técnico del Titular.

ITTA: Informe Técnico del Titular de Actualización.

MAR: Managed Aquifer Recharge (Gestión de la recarga al acuífero).

PAT: Plan de Alerta Temprana.

RA: Recarga Artificial.

SAT: Soil Aquifer Treatment (Tratamiento e Infiltración a través del Suelo).

SEA: Servicio de Evaluación Ambiental.

SEIA: Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental.

Sernageomin: Servicio Nacional de Geología y Minería.

SES: Sistema Electrónico de Solicitudes.

SHAC: Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común.

SISS: Superintendencia de Servicios Sanitarios.

2. Recopilación y análisis de antecedentes

2.1 La recarga artificial

La recarga artificial de acuíferos se ha constituido como una herramienta de gestión hídrica económica y de gran efectividad con respecto a las grandes obras hidráulicas (embalses, trasvase de cuencas, desalinizadoras, ect.). Actualmente, es una actividad de primer orden en varios países como Holanda, Estados Unidos, Australia e Israel.

La recarga de los acuíferos puede producirse de forma natural a través de la precipitación, de forma accidental mediante pérdidas en las redes (Bouwer, 2002), riego y urbanización (Lerner, 2002), o de manera intencionada mediante la aplicación de métodos de recarga artificial.

En el presente estudio se hace referencia al término "Recarga Artificial" como la técnica para incrementar intencionadamente los recursos hídricos subterráneos. Este es el término más utilizado en el entorno anglosajón, siendo también referido como "Gestión de la Recarga" o "Recarga Gestionada" (en inglés MAR: *Managed Aquifer Recharge*). Este término tiene su origen en el Grupo de Trabajo para el Estudio de Operaciones de Recarga Artificial fundado por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH) en el año 1998. En noviembre del 2000, con motivo del 30 aniversario de la AIH, se decidió modificar el término AR (*Artificial Recharge*) para referirse a operaciones de Recarga Artificial por MAR (*Management of Aquifer Recharge o Managed Aquifer Recharge*) o Gestión de la Recarga de Acuíferos, incorporando los procesos naturales de recarga y configurando una herramienta vital para el desarrollo sustentable de los recursos hídricos del planeta (Fernández-Escalante, 2010).

2.2 Metodología

La recopilación y análisis de los antecedentes se ha realizado a dos niveles. Por un lado, se han analizado todas las experiencias llevadas a cabo en Chile y por otro lado, se han estudiado y evaluado las experiencias internacionales, sus procedimientos y las guías publicadas al respecto.

En Chile, las consultas han sido dirigidas a los diferentes actores institucionales involucrados en la gestión de los recursos hídricos (DGA, DOH, CNR, CIREN, Universidades, Centros de Investigación, Publicaciones Científicas, Libros, entre otros). Ver Figura 2-1.

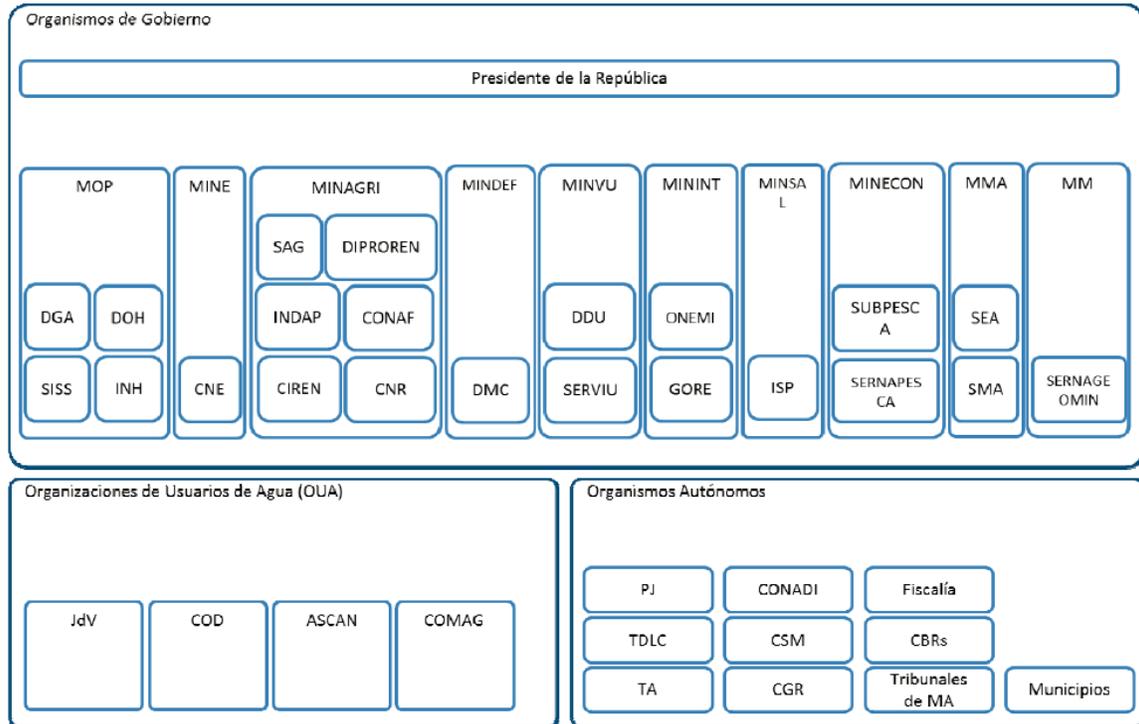


Figura 2-1 Mapa de Actores Institucionales para la gestión de los recursos hídricos.

Fuente: Banco Mundial y Gobierno de Chile, 2013.

Al mismo tiempo, las consultas a nivel internacional han sido focalizadas en organismos públicos y privados (Ministry of Water and Irrigation-Jordan, Arizona Hydrological Society, American Society of Civil Engineers, International Hydrological Programme of UNESCO, Commission on Managing Aquifer Recharge-Australia, IAH-International Association of Hydrogeologists, IGME, entre otros), en Artículos científicos de Revistas de alto impacto (Science Direct/Elsevier, Springer, Environment Geology, Earth Science, Water Science and Technology, Journal of Environmental Management, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, entre otras), en Portales web de proyectos emblemáticos como el DINA-MAR (<http://www.dina-mar.es/>), Actas de congresos y simposios (International Symposium on Managed Aquifer Recharge and Symposium on Artificial Recharge of Groundwater), Tesis de Doctorado, Libros, entre otros.

Con cada uno de los antecedentes consultados se elaboró una ficha que incluye: título, autor, año, institución, país, temática, subtemas, localización, *keywords*, destacado, tipo de documento y/o referencia, resumen, localizador/link y nombre del archivo. La Tabla 2-1 muestra un ejemplo de la ficha utilizada. La temática hace referencia al objetivo principal del documento mientras que los Subtemas indican aquellos aspectos adicionales que también se han tratados en el documento en cuestión. Se incluye la localización del documento en internet, si es el caso y el nombre de archivo en la estructura de datos creada para el proyecto.

Tabla 2-1 Ejemplo del tipo de ficha usada para el análisis de antecedentes.

TITULO	Estudio básico "Análisis alternativas piloto Recarga Artificial Ligua - Petorca, V Región"
AUTOR/ES	Comisión Nacional de Riego, Aqualogy Medioambiente Chile S.A.
AÑO	2013
INSTITUCIÓN	CNR
REGIÓN	V Región de Valparaíso
TEMÁTICA	Casos de estudio
SUBTEMAS	Fase exploratoria
LOCALIZACIÓN	Cuencas del Río Petorca y Río Ligua
KEYWORDS	Optimización del recurso, Alternativas hídricas, Recarga Artificial, Hidrogeología, Ligua y Petorca, Chile.
DESTACADO	Construcción de uno de los primeros proyectos pilotos en Chile sobre Recarga Artificial de acuíferos mediante lagunas de infiltración.
TIPO DE DOCUMENTO / REFERENCIA	Informe final del proyecto
RESUMEN	Presenta el diseño y construcción de un proyecto piloto de Recarga Artificial mediante lagunas de infiltración considerando la disponibilidad y calidad de los recursos de aguas, la idoneidad e hidrogeología del acuífero, los aspectos legales del agua en Chile y los usuarios-beneficiarios.
LOCALIZADOR	http://bibliotecadigital.ciren.cl/gsdlexterna/collect/estudios/index/assoc/HASHba47.dir/CNR-0366_V1.pdf
NOMBRE DEL ARCHIVO	CNR & Aqualogy 2013b. Recarga Ligua y Petorca Informe Final.pdf

2.3 La recarga artificial en Chile

A continuación, se describen los aspectos más relevantes de los antecedentes mínimos nacionales sugeridos en las bases técnicas. El resto de las literaturas a nivel país e internacionales se encuentran resumida en las fichas de los anexos A y B.

1. Comisión Nacional de Riego, Aqualogy Medioambiente Chile S.A. Estudio Básico Alternativas Piloto Recarga Artificial Ligua - Petorca V Región. Agosto 2013.

Presenta el diseño y construcción de un proyecto piloto de recarga artificial mediante lagunas de infiltración. El diseño consideró la disponibilidad y calidad de los recursos de agua, la idoneidad e hidrogeología del acuífero, los aspectos legales del agua en Chile y los usuarios-beneficiarios.

2. Comisión Nacional de Riego, GCF Ingenieros Ltda. Estudio Diagnóstico de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos en las Regionales de Arica y Parinacota a la Región del Maule. Marzo 2013.

El objetivo general de este trabajo fue la determinación de zonas potenciales para aplicar recarga artificial de acuíferos, en las principales cuencas ubicadas entre la región de Arica y Parinacota y la región del Maule. Se presentó un análisis conceptual de las 14 zonas más favorables para el desarrollo de proyectos de recarga artificial de acuíferos en las cuencas de: Río Lluta, Río San José (Valle de Azapa), Río Copiapó, Río Huasco, Río Elqui, Pan de Azúcar, Río Limarí, Río Choapa, Río Ligua, Río Petorca, Río Aconcagua, Río Maipo, Río Rapel y Río Maule. Se aplicó un Índice de Recarga Compuesto - IR (de 0 a 100) que considera tres variables: profundidad de la napa, coeficiente de permeabilidad y superficie del relleno o área de la subcuenca acuífera. Con este índice lograron priorizar los sectores acuíferos y se determinaron las cuencas o subcuencas con mayor potencial para la recarga artificial.

3. Comisión Nacional de Riego, GCF Ingenieros Ltda. Mejoramiento de Agua Subterránea para Riego Ligua y Petorca. Enero 2013.

Estudio a nivel de prefactibilidad para la instalación de un proyecto de recarga artificial de acuíferos en las cuencas de La Ligua y Petorca. La metodología consistió en la recopilación de antecedentes (hidrológicos, hidrogeológicos, calidad de agua, usos del

suelo, oferta y demanda de agua) y la selección preliminar de los sitios idóneos para la recarga mediante la caracterización hidrogeológica, balance hídrico actual y futuro. Además, se realizaron trabajos de terreno (catastro de captaciones, geofísica y prueba de bombeo) y modelación, considerando diferentes alternativas hídricas y criterios de carácter técnico y económico. El análisis y los balances realizados con el modelo permitieron establecer favorablemente las magnitudes de los caudales de recarga y excedencia. Finalmente, se desarrolló un programa para la medición de caudales en los pozos existentes y se propusieron las obras más factibles para la recarga artificial.

4. Comisión Nacional de Riego, Jorquera y Asociados S.A. Mejoramiento del Sistema de Aguas Subterráneas para su utilización en Riego en la cuenca del río Copiapó. Noviembre 2012.

Se analizaron diferentes alternativas a nivel de prefactibilidad de obras de recarga artificial de acuíferos en la cuenca del río Copiapó con el fin de utilizar el agua infiltrada en agricultura de riego. La modelación de las alternativas se realizó en base al modelo hidrogeológico desarrollado por SERNAGEOMIN, pese a la generalidad espacial y temporal del mismo. Los resultados indicaron que el acuífero del río Copiapó era susceptible de ser recargado con aguas superficiales provenientes de épocas de crecidas hasta por un volumen de 456 Mm³, adicionales a la recarga natural, considerando un periodo de 20 años. La técnica o alternativa más factible fue mediante lagunas de infiltración en los cuatro sectores elegidos por el estudio, aunque era necesario un estudio de factibilidad más acabado y proyectos pilotos de infiltración para lograr una mayor precisión en los modelos.

5. Cortez Salvo, Freddy Javier. Recarga Artificial de Acuíferos Mediante Pozos de Infiltración. Memoria para optar al título de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2012.

El propósito de este trabajo fue estudiar el potencial para efectuar recarga artificial de acuíferos con aguas provenientes del río Maipo, que son transportadas por la red de canales de la Sociedad del Canal del Maipo dentro de la Región Metropolitana. Se seleccionó un sitio que cumplía con dichos criterios y se recolectó toda la información necesaria para la construcción de un modelo hidrogeológico. Finalmente, se desarrolló un modelo numérico a partir del modelo hidrogeológico Maipo-Mapocho del año 2000. Con ese modelo se calcularon las tasas de recarga tentativas para el sector mediante un

sistema de pozos de infiltración gravitacional. Los resultados del modelo fueron una tasa de infiltración gravitacional del orden de 20 l/s cuando los pozos se llenan de 10 metros de agua aproximadamente.

6. Dirección de Obras Hidráulicas, Ernesto Brown F. Estudio de Recarga Artificial de Acuíferos en el Valle del Aconcagua Usando Derechos Eventuales del Fisco. Enero 2012.

El informe presenta un resumen de los principales avances logrados con el proyecto de recarga artificial (o recarga inducida) en la cuenca del río Aconcagua durante el segundo semestre de 2011. En dicho informe se entregaron los resultados de los principales análisis hidrológicos realizados, concepciones de proyectos alternativos y complementarios que podrían desarrollarse y concepción de las etapas iniciales necesarias para construir un buen proyecto de recarga artificial de acuíferos.

7. Dirección de Obras Hidráulicas, GeoHidrología Consultores. Asesoría Técnica para Plan de Alerta Temprana Pozos DOH Aconcagua y para Análisis de Potencialidad de Recarga Artificial, Informe Final, Tomo II: Análisis de potencialidad de Recarga Artificial acuíferos primera y tercera sección valle del Aconcagua. Julio 2012.

En este informe se realizó un análisis de la factibilidad hidrogeológica para realizar proyectos de recarga artificial en los acuíferos de la primera y tercera sección del río Aconcagua. Para ello se utilizó el último modelo numérico de simulación de los acuíferos del valle del río Aconcagua, implementado por la DOH (Visual Modflow ACN). Las simulaciones realizadas sobre la recarga artificial mostraron que era posible infiltrar más agua en una superficie menor respecto de zonas con conductividad hidráulica más baja. La primera sección fue más factible para la realización de un proyecto de recarga artificial. En este escenario, el volumen que potencialmente era posible de extraer del acuífero producto de la infiltración artificial variaba entre 125 y 740 millones de m³/año (1era sección), que correspondía al aumento que experimentaba el almacenamiento del acuífero sobre la simulación base a lo largo del tiempo de simulación.

8. Dirección de Obras Hidráulicas, GeoHidrología Consultores. Estudio e Implementación de un Plan Piloto de Recargas Artificiales a los Acuíferos del Valle del Aconcagua. En ejecución.

La finalidad del proyecto es aprovechar la capacidad de los acuíferos de la 1era sección del valle del Aconcagua para almacenar volúmenes de agua excedentes que se generan en años normales y húmedos, para luego aprovecharlos en periodos que se requieran. Las actividades del proyecto se dividieron en cinco etapas: I) Recopilación de antecedentes, evaluación y diseño de trabajos de terreno; II) Trabajos de terreno y diseño de ingeniería del plan piloto; III) Implementación y puesta en marcha; IV) Monitoreo, control, medición y evaluación de variables (Esta etapa se encuentra dividida en 4 subetapas que tienen por objetivo la entrega de informes parciales para reportar resultados a la DOH en periodos de tiempo más acotados que la duración de la etapa completa y V) Análisis, conclusiones, recomendaciones e informe final. Actualmente, el proyecto se encuentra en la primera fase de la etapa 4, pero no ha comenzado la operación del sistema de recarga artificial. Los dispositivos que se pretenden implementar son balsas y pozos de infiltración.

9. Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, AC Ingenieros Consultores Ltda. Investigación Recarga Artificial Acuíferos Cuencas del Río Choapa y Quillimarí, Región de Coquimbo, SIT N° 292. Diciembre 2012.

El documento incluye una recopilación y análisis de antecedentes técnicos, legales y económicos relacionados con proyectos de recarga artificial de acuíferos en Chile hasta el año 2012. En dicho documento se realizó un catastro de las captaciones de aguas subterráneas, prospecciones geofísicas, excavaciones de pozos someros, muestreos y análisis de calidad de agua (superficiales y subterráneas). Se identificaron tres sectores con mayor potencialidad para implementar la recarga artificial en cada una de las cuencas estudiadas (Choapa y Quillimarí). Cada uno de estos sectores fue modelado para diferentes tipos de obras de recarga artificial de acuerdo a criterios técnicos, económicos y legales obteniéndose indicadores de rentabilidad (privada y social) y aspectos negativos. Finalmente, se desarrollaron las "Especificaciones Técnicas para la implementación de un Proyecto Piloto de Recarga Artificial de Acuífero".

10. Galecio Valdés, Juan Enrique. Métodos de Aforo para la Estimación de la Recarga de Acuíferos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2007.

El objetivo de este trabajo fue analizar distintos métodos de aforo, prestando especial atención al método de aforos químicos con trazadores, ya que tendría un nivel de exactitud adecuado. El trazador evaluado fue el Cloruro de Sodio, el cual presenta ventajas económicas de manejo, almacenamiento, etc. En laboratorio se analizó el método de inyección instantánea de trazador, comparando este método con los caudales obtenidos a partir de una placa orificio conectada al canal. En terreno se trabajó en un canal de bajo caudal y de pequeñas dimensiones, para poder aplicar distintos métodos de medición. No fue posible validar las metodologías aplicadas para la estimación de la recarga de un acuífero, debido a problemas con los instrumentos.

11. Jiménez M., Gonzalo Esteban. Caracterización de la Cuenca del Río San José en Arica para la Evaluación a Nivel de Perfil de un Sistema de Recarga Artificial de Acuíferos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2013.

El objetivo de este trabajo fue realizar una caracterización de la cuenca del río San José para determinar el potencial para implementar un sistema de recarga artificial de acuíferos en el Valle de Azapa, como alternativa para mitigar el déficit hídrico de la zona. Detrás del análisis de los antecedentes, tanto de metodologías de recarga existentes como de las características propias del valle, se determinó que la infiltración de las aguas del río San José mediante lagunas de infiltración, y la recarga de las aguas residuales de Arica mediante pozos, serían alternativas factibles de implementar en este caso. Se identificaron dos sectores de adecuada permeabilidad para la recarga: uno en la parte baja del Valle entre los kilómetros 5 y 12 del Camino Azapa con un potencial de almacenamiento de $6,2 \text{ hm}^3$ y otro en la parte alta entre los kilómetros 18 y 30 con un potencial para almacenar $18,5 \text{ hm}^3$. La infiltración por pozos se muestra en este caso como la alternativa más recomendable frente a la infiltración por lagunas.

12. Revista Vertiente, Edición N°13. Proyecto de Recarga Artificial en el acuífero Colina; José Luis Fuentes, Sociedad de Canal del Maipo (SCM). Septiembre 2013.

Presenta el desarrollo de un plan piloto a pequeña escala mediante infiltración gravitacional en pozos del orden de 20 l/s. Previamente se identificó que SCM, en conjunto con la Universidad de Chile, desarrolló el proyecto de recarga artificial en el acuífero de Colina, traducido en etapas en las cuales se estudiaron las condiciones hidrogeológicas a macro escala basadas en expedientes que permitieron generar un modelo de caracterización de los acuíferos. Posteriormente, se realizó una campaña de muestreos en la que se observaron las fuentes de agua y se realizó la cuantificación del recurso, además de estudiar las soluciones adecuadas (a nivel conceptual y modelado), así como las factibilidades técnicas. Finalmente, definieron dos zonas primarias y secundarias de recarga: sector de Rinconada de Maipú y Lipangue, decidiéndose trabajar finalmente en la zona de Colina.

13. Tobar Espinoza, Eugenio. Modelación del Efecto de la Recarga Artificial Sobre la Operación del Dren Las Vegas. Memoria para optar al título de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2009.

El objetivo general del presente trabajo de título fue modelar y analizar el efecto que tiene la recarga artificial sobre el funcionamiento y la operación del Dren Las Vegas. Se estudió el caso de la Planta de Tratamiento de Agua Potable Las Vegas, que tiene la particularidad de recoger "agua cruda" de fuentes superficiales y subterráneas a la vez. La captación superficial correspondió a una bocatoma ubicada cerca del fin de la segunda sección del río Aconcagua, mientras que la captación subterránea es un dren construido a 40 m bajo la superficie. Para aumentar el caudal captado por el dren utilizaron las llamadas lagunas de infiltración, que tienen por misión aprovechar el agua sobrante de la bocatoma e infiltrarla al acuífero. Se recopilaron los antecedentes pertinentes para poder construir un modelo hidrogeológico utilizando Visual MODFLOW, entre ellos, topografía del recinto, estudios hidrogeológicos y datos hidrológicos. El modelo ajustado fue utilizado para establecer la tasa de recarga para cada sector del recinto donde podrían emplazarse nuevas lagunas de infiltración.

2.3.1 Síntesis y análisis de la experiencia de recarga artificial en Chile

En Chile, la recarga artificial de acuíferos data de los años 70 (MOP, 1975) con el desarrollo de una teoría o metodología que permitió evaluar las variaciones de nivel en el acuífero producidas después de iniciada la recarga. La metodología se aplicó en la cuenca del río Maipo en el cual se determinaron fluctuaciones de niveles en pozos de control, que permitieron deducir constantes elásticas del acuífero y caudales de recarga provenientes de infiltraciones en el lecho del río. A pesar de esta gran iniciativa, es a partir del año 2000 donde se llevan a cabo algunos proyectos y experiencias piloto tanto en recargas de aguas superficiales como aguas servidas tratadas (Brown, 2002). Desde entonces, el sector público ha venido impulsando algunos estudios y proyectos pilotos para llevar a la práctica la recarga artificial (ver Anexo A), una alternativa hídrica mayormente abordada por tesis de grado en Ingeniería Civil (Wilmans, 2001; Galecio, 2007; Tobar, 2009; Cortez, 2012; Jiménez, 2013; Rojas, 2013) que se especifican en las fichas del Anexo A. Por lo tanto, se puede decir que la recarga artificial de acuíferos en Chile ha adquirido un gran protagonismo a partir de los últimos dos años.

Gracias a iniciativas de la Comisión Nacional de Riego (CNR), la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), además de algunos organismos privados como la Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), Compañía Minera Doña Inés Collahuasi (CMDIC), Compañía Minera Xstrata Lomas Bayes (CMXLB) y Compañía Minera Andes Iron (CMAI), se ha empezado a investigar de manera sistemática la recarga artificial en Chile, a través de estudios en ejecución o en proyecto. Se debe mencionar que los proyectos desarrollados por CMDIC, SQM y Andes Iron han sido ejecutados como medidas de mitigación y reparación dentro de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA), bien para mantener un nivel de caudal (Vertiente Jachucoposa, CMDIC) o como barrera hidráulica natural (Puquíos del Salar de Llamara-SQM y Quebrada Los Choros-Andes Iron).

Según la CNR y GCF Ingenieros (2013a) y Cabrera (2014) los principales trabajos de recarga artificial han sido focalizados en aquellas cuencas que han sido declaradas áreas de restricción por la DGA. En este contexto, se puede mencionar el desarrollo de proyectos pilotos en: acuíferos de la Ligua y Petorca (CNR y Aqualogy, 2013b), cuencas del río Choapa y Quilimarí (DGA y AC Ingenieros Consultores, 2012), Valle del Aconcagua (DOH y GeoHidrología Consultores, 2012) y la cuenca del río San José (Jiménez, 2013).

Estas últimas experiencias han permitido determinar parámetros de diseño para futuros proyectos de recarga y aportar conocimiento respecto a la viabilidad técnica de estas iniciativas (Töreý, 2014). Además, han permitido revelar la importancia de seguir profundizando en aspectos como la selección de zonas potenciales para la recarga, la medición de impacto sobre el nivel de acuíferos, el establecimiento de líneas bases previas, así como aspectos relacionados con el diseño y construcción de dispositivos, desarrollo de modelos de acuíferos y/o disponibilidad de aguas, puntos de control, análisis costo-beneficio, parámetros de monitoreo y medidas correctivas.

Hoy en día, la recarga artificial de acuíferos en Chile está contemplada en la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (MOP, 2013) como una opción para enfrentar la escasez del recurso en las cuencas deficitarias. En este mismo orden, la Estrategia Nacional de Riego (MOP, 2013) contempla este tipo de alternativa entre las acciones relacionadas con infraestructura, apuntando a incrementar las reservas en los acuíferos, facilitar el transporte de agua a través de los mismos, mejorar y homogeneizar la calidad del agua, así como para reducir los costos de bombeo, la intrusión marina y otros efectos consecuentes del descenso del nivel freático en el acuífero (Töreý, 2014). Además, la recarga artificial ya se encuentra establecida en varias normativas chilenas (Código de Aguas, Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas, etc.) que se analizan con detalle en el análisis legal presentado en este documento.

De acuerdo a Cabrera (2014), los requisitos para hacer factible técnica y económicamente un proyecto de recarga artificial de acuíferos en Chile, están relacionados con la hidrogeología del área de estudio y con la disponibilidad de agua para recarga en cantidad y calidad. Por lo tanto, las condiciones favorables para estos proyectos son: una napa con un nivel estático o piezométrico profundo, poco conectada con los cauces superficiales del entorno y una alta permeabilidad del relleno a través del cual se conducirá el agua, sea que esta recarga se realice gravitacionalmente o mediante inyección en presión. Otros factores considerados son la morfología de las cuencas (pendientes, red de drenaje y tipo de cuenca) y presencia de un embalse de regulación.

De acuerdo a Töreý (2014), existe una necesidad de establecer el alcance de la protección a la calidad de las aguas subterráneas en Chile, permitiendo la infiltración de aguas aplicando las normas de calidad existentes (NCh N°1333 - DS N°46/2002).

En la Tabla 2-2 se presentan los principales dispositivos usados en algunas regiones del país. Según dicha tabla los principales tipos de proyectos o iniciativas de recarga artificial de acuíferos desarrollados en Chile, se pueden clasificar en:

1. Lagunas o balsas de infiltración
2. Pozos de inyección
3. Pozos de infiltración
4. Zanjas de infiltración
5. Muros de retención de cauces

A nivel teórico se han evaluado otros métodos, tales como: la escarificación de cauces y los métodos de aforo.

Según los antecedentes consultados a nivel nacional, la región de Valparaíso es la zona que posee el mayor número de proyectos y las lagunas de infiltración y los pozos de inyección, las alternativas mejor valoradas (Figura 2-2). En este ámbito, los parámetros que son mayormente considerados han sido la profundidad del nivel freático, la permeabilidad y/o conductividad hidráulica y el área del acuífero. Además, se han considerado otros tipos de criterios como: disponibilidad de agua para la recarga, disponibilidad de superficie, recarga natural área beneficiada, relieve, base topográfica, capacidad de almacenamiento, pendiente y calidad de agua de recarga respecto a la del acuífero. Muchos de estos criterios están relacionados con los cuatro parámetros mayormente considerados.

Tabla 2-2 Resumen de las experiencias más importantes de recarga artificial evaluadas en Chile.

Nº/Región	Emplazamiento	Tipo y dispositivo	Objetivo
XV Arica y Parinacota	Río Azapa (cuenca del río San José)	Dispositivo superficial fuera del cauce (Lagunas de infiltración) y en cauce) (Diques de retención)	Aumentar la disponibilidad del recurso
I Tarapacá	Vertientes Jachucoposa y Michincha (Salares de Coposa y Michincha)	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Mantener el caudal de las vertientes en un rango establecido

Nº/Región	Emplazamiento	Tipo y dispositivo	Objetivo
	Puquíos del Salar de Llamara	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Barrera hidráulica para evitar el descenso de nivel de los Puquíos.
II Antofagasta	Acuífero de Calama	Dispositivo superficial fuera del cauce (Lagunas de infiltración y recarga inducida desde las mismas)	Aumentar la disponibilidad del recurso
III Atacama	Río Copiapó	Dispositivo superficial fuera del cauce (Lagunas de infiltración) y dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Aumentar disponibilidad del agua para su uso en riego
	Cuencas de Piedra Pómez y río Llamas	Dispositivo superficial fuera del cauce (Lagunas de infiltración)	Barrera hidráulica
IV Coquimbo	Río Quilimarí	Dispositivo superficial fuera de cauce (Lagunas y Zanjas de infiltración)	Identificar zonas de infiltración relevante para aumentar disponibilidad recurso.
	Río Choapa	Dispositivo superficial fuera del cauce (Lagunas y Zanjas de infiltración)	Identificar zonas de infiltración relevante para aumentar disponibilidad recurso.
V Valparaíso	Río Ligua	Dispositivo superficial fuera del cauce (Lagunas de infiltración)	Mejoramiento de las aguas subterráneas
	Río Petorca	Dispositivo superficial fuera de cauce (Lagunas de infiltración)	Mejoramiento de las aguas subterráneas
	Río Aconcagua	Dispositivo superficial fuera del cauce (Lagunas de infiltración) y dispositivo profundo (Pozos de inyección) (Figura 2-2)	Proyectos pilotos en fase de ejecución. Aumentar la disponibilidad del recurso
XIII Metropolitana	Río Maipo	Dispositivo superficial fuera del cauce (Lagunas de infiltración) y dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Plan piloto a pequeña escala para evaluar el potencial de la recarga artificial

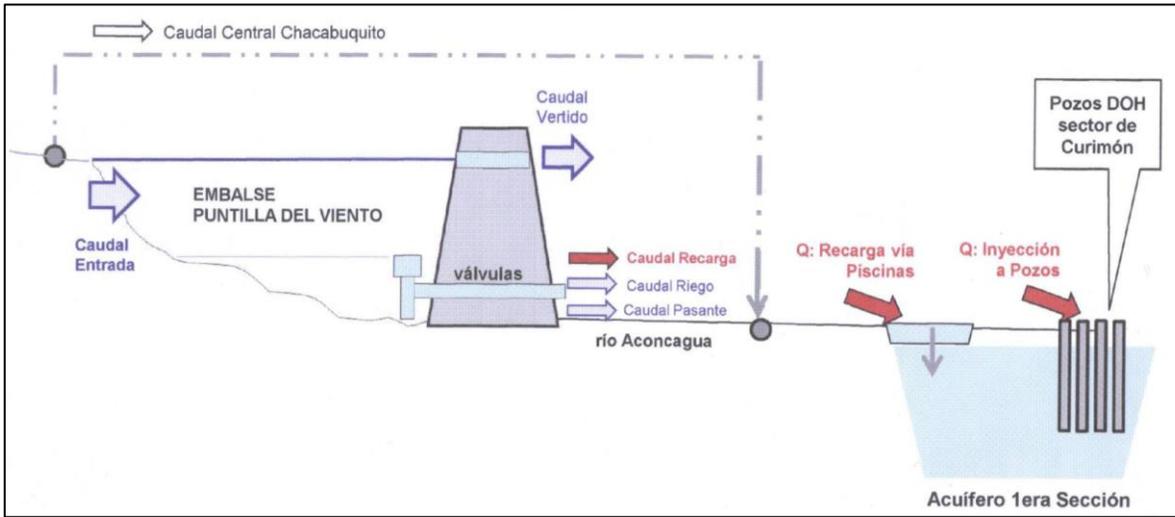


Figura 2-2 Esquema conceptualización de recarga de acuíferos mediante los dos tipos principales de dispositivos usados en Chile. Ejemplo: río Aconcagua.

Fuente: DOH y Brown, 2011.

En el estudio desarrollado por la CNR y GCF Ingenieros (2013a) se definió un Índice de Recarga Compuesto (IR) que se calculó a partir de la siguiente expresión:

$$IR = N \cdot (I_{\Omega} + I_{NE} + I_k)$$

Donde N es la normalización entre 0 y 100, I_{Ω} es el índice de superficie o de área de relleno, I_{NE} es el índice de nivel estático o de profundidad de éste e I_k es el índice de permeabilidad. Dicho índice permitió conocer cuáles son las cuencas o subcuencas con mayor potencial para proyectos de recarga artificial en Chile.

A continuación las diferentes fórmulas que describen los índices del IRC:

- **Índice de área de relleno (I_{Ω}):**

Para un sector k , de área Ω_k , el índice se calcula como:

$$I_{\Omega}^k = 0,5 \cdot (\Omega_k - \min[\Omega_j]) / (\max[\Omega_j] - \min[\Omega_j]).$$

Con Ω_j = áreas de todos los sectores estudiados ($j = 1$ a 38).

- **Índice de profundidad del nivel estático (I_{NE}):**

Para un sector k , con profundidad del nivel freático h_k , el índice se calcula como:

$$I_n^k = 3,5 \cdot (\Omega_k - \min[h_j]) / (\max[h_j] - \min[h_j]).$$

Con h_j = profundidades de los niveles estáticos de todos los sectores estudiados ($j = 1$ a 38).

- **Índice de permeabilidad (I_k):**

Al valor de la permeabilidad se le asignó una relevancia mayor que a la superficie de relleno (de 0 a 1), ya que su importancia está en que esa permeabilidad determina en mayor medida la capacidad de extraer agua desde la napa, una vez implementado el proyecto de recarga artificial. Asume que refleja también la permeabilidad de la zona no saturada, ya que puede usarse como un índice de la capacidad de conducción de agua en el tramo no saturado a lo largo del cual percolarán las aguas de esta recarga. El índice de permeabilidad fue determinado en forma análoga a lo señalado para los índices anteriores.

En el fondo, lo que estiman CNR y GCF Ingenieros (2013a) es un índice para comparar el espacio disponible en diferentes acuíferos.

2.4 La recarga artificial a nivel internacional

2.4.1 Introducción

El número de proyectos de recarga artificial en los distintos países avalan su grado de aceptación y popularidad. Esta técnica empezó a desarrollarse en el siglo XIX y, desde entonces, ha sufrido un incremento notable tanto de implantación como de complejidad.

En la actualidad, los países con más experiencias en realización de recarga artificial son Australia y Estados Unidos. Es notable la experiencia de países como Holanda, Reino Unido, Canadá, Alemania, República Surafricana e Israel. Además, existen varios programas en desarrollo en Nueva Zelanda, Tailandia, Taiwán, Kuwait, India, España, entre otros (Fernández-Escalante, 2000).

2.4.2 Revisión y análisis de la recarga artificial a nivel internacional

El aumento de los recursos hídricos se ha llevado a cabo desde la antigüedad. Esta técnica ha tenido su mayor desarrollo en las zonas áridas y desérticas donde la recarga natural se produce de forma intermitente (Pyne, 1995).

Existen estrategias para facilitar la infiltración desde las primeras culturas agrarias (Ortiz, 2012). No obstante, a finales del año 1800 se empezaron a desarrollar estrategias donde la infiltración del agua se realizaba de manera intencionada con la finalidad de aumentar la disponibilidad del recurso subterráneo. Se han identificado experiencias de recarga artificial en gran parte de los países con mayores o menores volúmenes de infiltración y en prácticamente todos los tipos de acuíferos. Se evidencian diferencias entre los tipos de dispositivos implementados en cada país en función tanto del clima como de la geología e hidrogeología. En Alemania, Australia, Suiza y Holanda las balsas de infiltración por extensión superficial, la filtración a través de los márgenes del río y los canales son las técnicas de recarga más utilizadas. Sin embargo, en el Reino Unido, Israel, Jamaica y Japón se prefieren los pozos de inyección debido a la presencia de formaciones carbonáticas de alta permeabilidad. En Francia y Estados Unidos, la gran diversidad geológica permite la utilización de ambas técnicas de infiltración (Brown y Signor, 1974).

A continuación, se describen los principales dispositivos de recarga artificial inventariados en el mundo. Se realiza especial hincapié en el tipo de dispositivo y el volumen del mismo con la finalidad de evaluar las tipologías disponibles para Chile. En la recopilación de experiencias, se citan los autores correspondientes, aunque la mayor parte de la información procede de las publicaciones del Grupo de Recarga Artificial de la IAH (IAH-MAR) y de la Tesis Doctoral de Ortiz (2012).

2.4.2.1 Europa occidental

En Europa los primeros dispositivos datan de finales del siglo XIX. A principios del año 1900, ya se realizaban más de 10 proyectos anualmente (Figura 2-3).

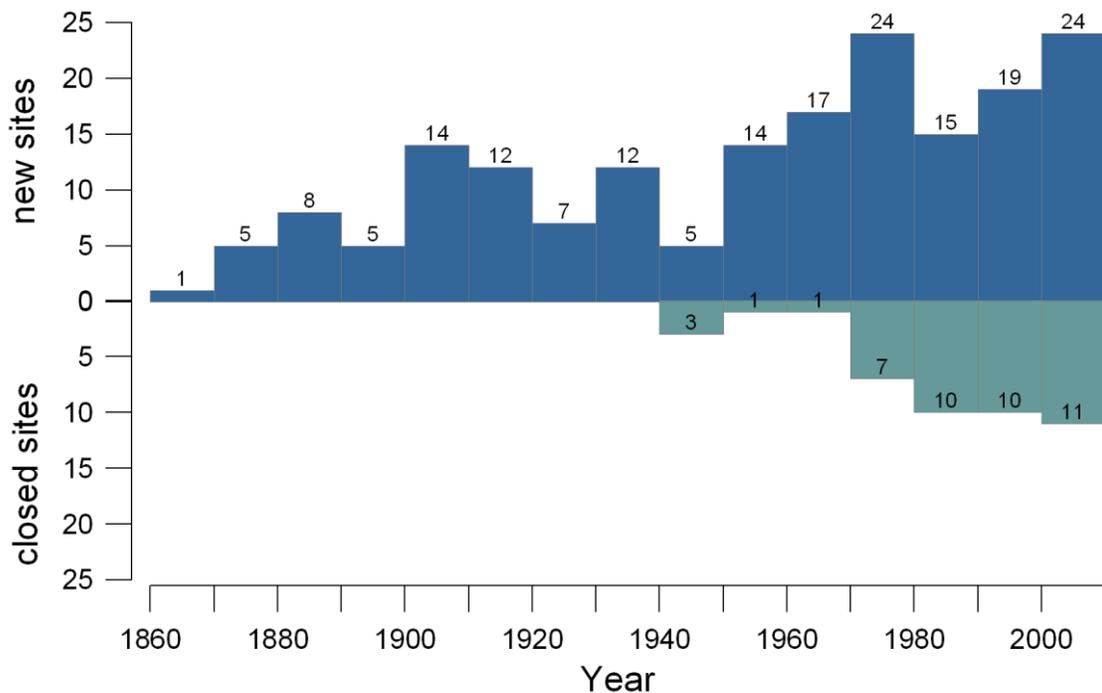


Figura 2-3 Construcción anual de nuevas instalaciones de recarga artificial en Europa.

Fuente: DEMEAU, 2013.

En Europa, se estima que el número de experiencias de recarga artificial de acuíferos es prácticamente un centenar, ya para el año 2002 la cifra ascendía a ochenta (Fernández-Escalante *et al.*, 2005). Hoy en día, muchas de las operaciones de recarga artificial de acuíferos iniciadas a finales del siglo XIX aún siguen operativas tras sucesivas mejoras y ampliaciones (Ortiz, 2012). En la Tabla 2-3 se presenta un resumen con las experiencias más importantes de recarga artificial en Europa occidental. En este sentido, destacar que Europa se caracteriza por la carencia de un protocolo común. Las aguas de recarga artificial derivadas desde algún río representan un 45% del abastecimiento en Hungría, un 16% en Alemania, un 50% en Eslovaquia, entre otros. Además de las estructuras de recarga artificial, en Europa hay un amplio desarrollo de otras prácticas similares como el empleo de filtración a través del lecho del río. La mayor densidad de estas estructuras se sitúa junto al cauce de los ríos Rin, Elba, Danubio y en el lago Tegel. Además, existen varias plantas de filtración en lechos de río en ciudades como Colonia, Ginebra, Dresden, Zurich, Lindau, Kuopio y Maribor.

Tabla 2-3 Resumen de las experiencias más importantes de recarga artificial en Europa occidental.

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
Francia (Dispositivos relacionados con el río)	Croissy-sur-Seine	Dispositivo superficial fuera del cauce (Lagunas de infiltración en acuífero de Creta)	Agua tratada del río Sena
	Dunquerque	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de infiltración y canales de infiltración)	Barreras hidráulicas para evitar que las aguas del río entren al acuífero
	Appoigny	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de infiltración y canales de infiltración)	
	Neully-sur-Seine	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	
	Cuenca del Ródano	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Filtros de arena y grava. Recarga estacional
Alemania (Básicamente filtración a través del lecho filtrante del río)	Chemnitz	Dispositivo superficial dentro del cauce (Canales de infiltración pero rellenos de arena para facilitar la infiltración)	Iniciado en 1875
	Bochum	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de infiltración con agua derivada del río)	Tratamiento previo del agua
	Hamburgo	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de infiltración con agua derivada del río)	Tratamiento previo del agua
	Tegel	Dispositivo superficial dentro del cauce (Filtración a través del banco del río ¹)	Centenar de captaciones de extracción. No requiere desinfección posterior.
Holanda (el principal objetivo es mejorar la calidad)	Duijvenbode	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Iniciado en 1950
	Olsthoorn	Dispositivo superficial fuera	Iniciado en 1950

¹ A través de diferentes pozos de extracción se facilita la filtración de agua a través de los materiales aluviales del río o de balsas conectadas.

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
del agua)		del cauce (Balsa de infiltración)	
	Zandvoort	Dispositivo superficial de infiltración fuera del cauce (Filtración inter-dunar a partir de más de 40 balsas de recarga)	Abastece el 60% de la demanda de Ámsterdam. Infiltración de 0,2 m/d
	Rotterdam	Dispositivo superficial fuera del cauce (Filtración inter-dunar)	
	La Haya	Dispositivo superficial del cauce (Filtración inter-dunar)	
Dinamarca	Copenhague	Dispositivo superficial fuera del cauce sobre acuífero detrítico (Balsa de infiltración)	Desde 1994
Suecia (depende de recursos filtrados en balsas)	Lago Mälaren	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Abastece Estocolmo desde 1995
	Ekerö	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Agua tratada
	Eskilstuna	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Agua tratada
	Gävle	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Agua tratada
	Uppsala	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Agua tratada
	Kilafors	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Agua tratada
Finlandia	Diversos	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de infiltración con pozos de extracción para inducir y facilitar la recarga)	Más de 30 instalaciones con capacidades máximas de 21000 m ³ /d
Suiza (para satisfacer el aumento de la demanda)	Zurich	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas y zanjas de infiltración)	Agua de río pretratada
	Ginebra	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas y zanjas de infiltración)	>30 años >230 hm ³ agua
	Basilea	Dispositivo superficial fuera	>100 hm ³ /año

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
		del cauce (Balsas y zanjas de infiltración)	
Reino Unido (en acuíferos calizos utilizan pozos de inyección)	Lee Valley	Dispositivo profundo (Pozos de inyección con agua de río)	Inyección en acuífero carbonático
	Enfield-Haringey	Dispositivo profundo (Pozos de inyección con agua de río)	Inyección en acuífero carbonático
	Nottinhamshire	Dispositivo profundo (Pozos de inyección) y dispositivos superficiales fuera de cauce (balsas de recarga)	Agua parcialmente tratada
	Hardham	Dispositivo profundo (Pozos de inyección) y dispositivos superficiales fuera del cauce (balsas de recarga)	Agua parcialmente tratada
	Gales	Dispositivo profundo (Pozos de inyección en aluviones) y pequeños dispositivos superficiales fuera del cauce (zanjas de infiltración)	
Italia (para ayudar en problemas de escasez de agua)	Florenia	Dispositivo superficial de infiltración dentro del cauce (Filtración a través del banco del río)	Iniciado en 1912
	Milán	Dispositivo superficial dentro del cauce (Filtración a través del banco del río) y dispositivo superficial de infiltración fuera del cauce (Balsas de infiltración)	Para frenar la sobreexplotación
	Simeto	Dispositivo superficial fuera del cauce (Superficies de recarga en formaciones aluviales durante crecidas)	
	Bolonia	Dispositivo superficial dentro del cauce (en los serpenteos y modificaciones creados por las extracciones de áridos)	
	Siracussa	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	
España (amplio uso en agricultura por problemas de escasez de agua)	Delta del Llobregat	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Tres balsas con agua del río
		Dispositivo superficial dentro del cauce	Desde 1950

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
		(Escarificación del lecho del río)	
		Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	40 y 80 l/s
		Dispositivo profundo (Barrera hidráulica de pozos de inyección)	Agua de la planta potabilizadora para frenar la intrusión salina
	Cuencas Internas de Cataluña	Dispositivo superficial dentro del cauce (Filtración a través del banco del río)	Agua de plantas depuradoras en diferentes cauces de pequeña entidad (Ridaura, Aro, Vendrell, Sabadell y otros)
	Besós	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	
	Carracillo	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas, acequias y canales de infiltración)	Para agricultura
	Santiuste	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas, acequias y canales de infiltración)	Para agricultura
Alicante	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de infiltración) y dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Zona de elevada demanda estacional	

Se considera que la instalación más antigua para abastecimiento de agua es la de Toulouse, en el sur de Francia (Bize *et al.*, 1972). Dicha instalación permitió, desde finales del siglo XVIII, la infiltración de agua procedente del río Garona sobre la terraza aluvial en la que se encuentran los pozos de captación (Mandoul, 1898). Otras experiencias importantes son las que tuvieron lugar en Nancy a principios del siglo XX (Gieseler, 1905).

La principal instalación francesa es la de Croissy-sur-Seine, cerca de París y que funciona desde 1956 recargando agua tratada del río Sena en un acuífero de Creta bajo recubrimiento aluvial, mediante balsas de infiltración (Edworthy y Downing, 1979). Otras instalaciones son las de Dunquerque (Dassonville, 1979), Appoigny (ONU, 1977) y Neully-sur-Seine (Mania y Ricour, 1977).

El objetivo de estas instalaciones es crear barreras hidráulicas que eviten que aguas fluviales muy contaminadas penetren en el acuífero; las dos primeras mediante balsas y canales de recarga, y la última con pozos de inyección. Las instalaciones de la cuenca del Ródano, por su parte, tratan de compensar los efectos adversos de algunas obras hidráulicas como la derivación del agua del río. Se realiza recarga estacional mediante pozos de inyección con filtros de arena y grava (Muller-Feuga y Ruby, 1965).

Alemania es un país con gran tradición en recarga artificial de acuíferos, en general para aumentar la disponibilidad en las terrazas aluviales o aprovechar el terreno como filtro lento de agua. El 95% de las operaciones de recarga se llevan a cabo con aguas fluviales a través del lecho permeable de los ríos (Schmidt *et al.*, 2003). La primera experiencia de recarga artificial tuvo lugar en la ciudad de Chemnitz en 1875, a través de un canal de infiltración relleno de arena (Frank, 1979). Otras actuaciones importantes han tenido lugar en Bochum (Anón, 1911) y Hamburgo (Holthusen, 1928), en la cuenca del Ruhr, con infiltración de aguas fluviales sometidas a tratamiento previo en balsas con fondo de arena, y Wiesbaden (Dorn, 1974), en la cuenca del Rhin, en este caso a través de pozos de recarga y drenes enterrados, también con tratamiento previo. Actualmente, el 75% del abastecimiento de Berlín procede de la recarga artificial a través del lecho filtrante del río y del lago Tegel (Fernández-Escalante *et al.*, 2005). En esta zona se identifican un centenar de captaciones con dicho objetivo.

La recarga artificial es también importante en la regulación de recursos hídricos de Dinamarca. Por ello, desde 1994 se han llevado a cabo operaciones de infiltración sobre el acuífero detrítico cuaternario que abastece a la ciudad de Copenhague (Brandt, 1998).

En Holanda, la recarga artificial se utiliza para mantener la continuidad en el suministro de agua potable (Jos, 1996), especialmente para mejorar la calidad de las aguas subterráneas, muy afectadas por la intrusión marina relacionada con sobreexplotación de sus acuíferos o para eliminar problemas de contaminación. Actualmente se ha iniciado un programa de investigación para recarga de agua dulce en acuíferos salinizados. En 1940, tuvieron lugar las primeras experiencias de recarga artificial a pequeña escala. A partir de los años 50, se inician los proyectos más importantes para abastecimiento de poblaciones de la costa del Mar del Norte (Duijvenbode y Olsthoorn, 2002). La ciudad de Ámsterdam se abastece en un 60% con agua procedente de las operaciones de recarga que tienen lugar en la zona de dunas localizada en Zandvoort (Stuyfzand y Domen, 2004). Estos

sistemas de recarga, también utilizados en Rotterdam y La Haya, incluyen alrededor de 40 balsas de infiltración de 86 Ha de superficie total, a las que llega agua del río Rhin previamente tratada con tasas de infiltración del orden de 0,2 m/d (Biemond, 1960). Luego, el agua es recapturada a través de drenes y canales abiertos situados a unos 60 m aguas abajo de dichas instalaciones.

En Suecia, la recarga artificial proporciona aproximadamente el 50% del volumen total de agua subterránea utilizada en el país, lo que supone más del 20% del consumo total (Hjort y Ericsson, 1996). En la mayor parte de los casos, las instalaciones son del tipo balsa de infiltración con agua de recarga derivada de los lagos y parcialmente tratada. Hasta el momento, el proyecto más grande ha sido el que, en 1995, contempló la posibilidad de alimentar el acuífero conectado hidráulicamente con el lago Mälaren para abastecer con dichos recursos hídricos la demanda de la ciudad de Estocolmo (Murillo *et al.*, 2000). Otros proyectos de menor envergadura se han desarrollado en ciudades como Ekerö, Eskilstuna, Gävle, Uppsala y Kilafors, donde es necesario tratar el agua antes de su infiltración (Martinell, 1979).

El incremento de la demanda en Suiza ha permitido que las ciudades de Zurich, Ginebra y Basilea cuenten con numerosos esquemas de recarga artificial (Connorton y McIntosh, 1994). Se trata principalmente de balsas de infiltración, zanjas y diques de agua de río pretratada de alta calidad (Hiddink, 1974; Schassmann, 1978; Trueeb, 1979). Además, existen experiencias de recarga en acuíferos aluviales mediante pozos con drenes radiales. Las instalaciones de recarga más importantes son las de Basilea (Casati, 1975), en las que se superan los 100 hm³/año. Para disminuir procesos de colmatación se instalaron también sistemas de recarga por drenes. El sistema de recarga artificial en Ginebra cuenta con más de 30 años de funcionamiento donde se han inyectado más de 230 hm³ de agua.

En el Reino Unido, la recarga se limita a Inglaterra y Gales, siendo mucho más importante la primera (Ortiz, 2012). Aunque en el norte de Londres se llevaron a cabo algunas operaciones de recarga artificial durante el periodo 1890-1950. No fue hasta la década de los años 70 cuando esta técnica experimentó un gran avance, producto de la perforación de pozos de recarga en las areniscas triásicas en diferentes zonas. En la actualidad, los proyectos de recarga operativos en el Reino Unido son los de Lee Valley y Enfield-

Haringey; ambos inyectan a través de pozos el agua derivada de los ríos Lee y Támesis en el acuífero carbonático profundo de la cuenca de Londres.

Además, se han realizado experiencias a gran escala con agua fluvial tratada o parcialmente tratada en pozos y balsas de recarga situados sobre arenas y areniscas en Nottinghamshire y Hardham (Edworthy y Downing, 1979). Existen también numerosos proyectos en fase de estudio y/o desarrollo como los del sur de Londres y los de las regiones de Anglia, Severn-Trent, Yorkshire y Kent. Las operaciones de recarga en Gales no son muy importantes, siendo característica la infiltración de pequeños caudales mediante zanjas (Edworthy y Downing, 1979) y pozos en aluviones, depósitos de grava y creta (IASH, 1970). Además, destacar que el acuífero de calizas Chalk, localizado en la parte central y sur del Reino Unido, cuenta con elevado potencial de recarga artificial gracias a su alta transmisividad y continuidad hidráulica con depósitos suprayacentes. Los altos porcentajes de hierro en solución detectados en algunas zonas del acuífero pueden suponer un problema de colmatación, al producirse la precipitación de sus correspondientes óxidos con la inyección de agua en un ambiente reductor (Gale *et al.*, 2002).

En el caso de Finlandia, la recarga artificial se realiza mediante balsas de infiltración y recarga inducida. En 1996, se disponía de 28 instalaciones de recarga inducida y 20 balsas de infiltración, con capacidades comprendidas entre los 100 y los 21.000 m³/d (Sahún y Murillo, 2000).

En Italia, las experiencias de recarga artificial conocidas son más limitadas. En Florencia, se iniciaron en 1912 algunas experiencias en el lecho del río Anconella (Magni, 1977), sin grandes repercusiones para el país. Desde 1966, en Milán, se están llevando a cabo prácticas esporádicas de infiltración en cauces y balsas (Magni, 1977; Mazzarella, 1977) para frenar la sobreexplotación de acuíferos. Otras experiencias han tenido lugar en el valle del río Simeto (Sicilia), para aumentar la infiltración de agua en formaciones aluviales durante las crecidas (Aureli, 1978). En las cercanías de Bolonia, se introducía agua fluvial en excavaciones de áridos y en el área de Siracusa, se realizaba recarga mediante pozos para frenar la sobreexplotación (Aureli, 1980).

En España, existen actuaciones de recarga artificial en muchas zonas del país: Alicante, Almería, Barcelona, Cádiz, Canarias, Granada, Huelva, Jaén, La Rioja, Madrid, Mallorca,

Segovia, Sevilla y Valladolid. Así mismo, se han llevado a cabo experiencias piloto en los acuíferos de Jijona, Orba, Jávea y Vergel-Els Poblets para hacer frente a la sobreexplotación de los acuíferos. La mayor parte de las experiencias se han realizado a través de canales y zanjas filtrantes, balsas de infiltración y diques en el río. En este país, se conoce la existencia alrededor de 30 y 40 actividades de recarga artificial en acuíferos (Sahún y Murillo, 2000). Dichas actuaciones de recarga suponen un volumen de recursos anual medio que oscila entre 300 y 350 hm³ aproximadamente (De la Orden *et al.*, 2003). Las primeras instalaciones modernas en España no se iniciaron hasta los años 60, en los aluviales de los ríos Besós y Llobregat (Custodio y Llamas, 1983). A principios de la década de los años 50 y finales de los años 60 cuando se tiene conocimiento de prácticas más o menos relevantes de recarga artificial de acuíferos en los aluviales de los ríos Besós y Llobregat respectivamente, para el abastecimiento de la ciudad de Barcelona. En el primer caso fueron dos pozos de inyección con capacidades iniciales de recarga entre 40 y 80 l/s (Martí, 1984). El acuífero del delta del río Llobregat es clave en el abastecimiento de agua del área metropolitana de Barcelona. En esta área, se dispone de tres balsas de infiltración y se realiza escarificación del lecho del río prácticamente de manera semanal. Además, durante dos años funcionó una barrera de pozos contra la intrusión salina con agua de los sobrantes de la planta potabilizadora de San Joan d'Espí (2009-2010). Los caudales de inyección eran de 50 l/s, en siete de ellos, y de 100 l/s en los seis restantes. Además, se llevan a cabo otras actuaciones cercanas de menor importancia en Sitges, Sabadell y Riera de Horta (Barcelona), La Pineda y el Vendrell (Tarragona), Ridaura, Vall d'Aro (Girona). Algunos de estos corresponden básicamente a infiltración de efluentes de plantas depuradoras en cauces de ríos secos.

Desde el año 1984, el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) ha desarrollado numerosas actividades, generalmente en forma de experiencias piloto (IGME, 2000). Desde el año 2001, el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación MAPA ha construido y ampliado al menos dos dispositivos en zonas regables de la provincia de Segovia: Cubeta de Santiuste y Carracillo (Galán *et al.*, 2001; Fernández-Escalante y López, 2002). El dispositivo de recarga de Santiuste está compuesto por canales, balsas y pozos, que se encargan de infiltrar los excedentes invernales derivados del río Voltoya, para luego usarse en el periodo estival. Comienza a partir de un pequeño embalse en el río Voltoya, desde donde parte una tubería enterrada de 10 km de longitud pendiente abajo, que termina en un depósito (cabecera del dispositivo) de 36 m³. El depósito vierte en una

balsa de decantación de la que parten los dos canales principales (Caz Viejo y Nuevo). El "Caz Viejo" o "Canal Este" consta de 54 dispositivos de parada para incrementar la infiltración a través de una superficie que ronda los 33.300 m². El "Caz Nuevo" o "Canal Oeste", tiene una longitud total de 17.293 m y presenta una superficie de infiltración alrededor de 27.960 m².

La explotación del acuífero Cuaternario superficial de la zona del Carracillo ha sido creciente en las últimas décadas, generando un descenso del nivel freático a una media de 10 m, con procesos de salinización y contaminación aparejados. Si bien el Carracillo cuenta con cierta tradición en recarga artificial mediante acequias sin revestir no fue hasta el año 2006 cuando se empezaron a construir (Grupo Tragsa) canales y balsas de infiltración con una capacidad de 8 hm³. En esta zona el agua procede del río Cega que se recoge en una presa y se transporta durante casi 18 km subterráneamente para emerger en un dispositivo en las inmediaciones de Gomezterración. Desde ahí parte un sistema de canales con escasas balsas y pozos de gran diámetro. Según cálculos del Grupo Tragsa, la longitud total alcanza los 40.744 metros lineales que sirven para la recarga artificial del acuífero en la zona (Fernández-Escalante, 2010).

2.4.2.2 Europa Central y Oriental

Algunas de las experiencias más interesantes desarrolladas en esta zona tienen lugar en países como Letonia y Lituania (ONU, 1977). La Tabla 2-4 sintetiza las principales experiencias en esta zona.

Tabla 2-4 Resumen de las experiencias más importantes de Recarga Artificial en Europa Central y Oriental.

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
Letonia	Riga (Lago Baltezers)	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de infiltración)	90.000 m ³ /d
Lituania	Eigulais	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de infiltración)	En arenas y gravas
	Laguna de Courland	Dispositivo superficial fuera del cauce (Canales de	Prevención intrusión salina

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
		infiltración)	
	Taurage	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	En arenas y gravas
Hungría	Danubio	Dispositivo superficial dentro del cauce (Filtración a través del banco del río)	Budapest depende al 60% de la Recarga Artificial (300.000 m ³ /d)
Polonia	Poznan (Warta)	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de infiltración)	Evitan la colmatación con peces
Austria	Danubio	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Acuífero conectado con el Danubio
República Checa	Karmoni	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	2.300 m ³ /d
	Jizera	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de infiltración)	Agua pretratada en 15 balsas
Ucraina	Río Bug	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Filtración previa en carbón vegetal
		Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas y canales de infiltración)	

En las cercanías de Riga (Letonia), funcionan varias balsas de recarga para tratamiento del agua del lago Baltezers Menor con capacidad de 90.000 m³/d. Además, en Lituania existen tres instalaciones (Dilyunas, 1976): 1) Eigulais donde se utilizan balsas excavadas en arenas y gravas; 2) Laguna de Courland en cuyas proximidades se usan dos canales de infiltración para limitar el desplazamiento de aguas salinas y 3) Taurage donde la recarga se realiza mediante pozos de inyección perforados en arenas y gravas intramorrénicas.

En Hungría, la mayor parte de los recursos hídricos demandados son de origen subterráneo, procediendo el 50% de estos recursos de la recarga inducida (László y Literathy, 1996). El suministro de agua potable a la ciudad de Budapest se apoya enteramente en este tipo de recarga, donde el volumen infiltrado depende únicamente de la capacidad filtrante del lecho del río Danubio. Este campo de pozos tiene una capacidad de 300.000 m³/d que contribuyen al 60% de la demanda (SKM, 2010). De esta manera

se mejora de forma considerable su calidad y pueden ser introducidos en la red de abastecimiento sin ningún tipo de tratamiento previo, del mismo modo que en Berlín (Simonffy, 2003).

Para mejorar la calidad del agua fluvial, en Polonia se han realizado experiencias de recarga artificial en balsas (Kowal, 1979). En el valle de Warta, para la alimentación de la ciudad de Poznan, desde 1926 se encuentran en operación tres filas de balsas de recarga (Blaszyk y Pawwka, 1972), en las que se mantienen peces para reducir la tasa de colmatación.

En Austria, para complementar el abastecimiento a la ciudad de Viena y mejorar la calidad de sus aguas subterráneas, en 1995 se puso en funcionamiento una instalación de recarga inducida a través de pozos de inyección sobre el acuífero conectado con el río Danubio.

Por otro lado, existen trabajos de infiltración a partir de embalses y balsas en la República Checa (IASH, 1970; Koetter, 1970), donde funciona un pozo en la cuenca de Karmoni que recarga en areniscas 2.300 m³/d de agua potable (Edworthy y Downing, 1979). En el valle del río Jizera, se infiltra también agua de río pretratada mediante quince balsas (Halek, 1970).

En Ucrania, existen instalaciones de recarga artificial desde 1911, momento en el que se establecieron dos pozos alimentados con agua de aluvial, filtrada previamente en carbón vegetal (Falovsky, 1967). Desde entonces, ha sido continua la construcción de estos dispositivos, en general balsas y canales alimentados por agua fluvial (Río Bug).

2.4.2.3 África

Hace más de medio siglo que el continente africano utiliza la recarga artificial como método de gestión de los recursos hídricos. En este continente, el objetivo principal es aumentar la disponibilidad de recursos hídricos (Tabla 2-5). La primera experiencia tuvo lugar en Williamston (Sudáfrica), en funcionamiento desde 1946. Se trata de una balsa de recarga alimentada con agua de escorrentía intermitente (Kent, 1954), con la particularidad de que la descolmatación del fondo se realiza de forma natural por la propia acción del viento durante la época seca.

En el norte de África, el mejor ejemplo se encuentra en la ciudad marroquí de Tánger. En esta zona, desde 1958 se ha recargado agua fluvial tratada mediante pozos en el pequeño afloramiento de areniscas calcáreas de Chaf-el-Akab (Hazan y Thauwin, 1968). Asimismo, cerca de Túnez se han realizado experiencias de recarga artificial con el fin de ayudar a controlar la intrusión marina y aumentar los recursos de agua disponibles (Ennabli, 1980).

En Argelia, concretamente en el valle aluvial de Biskra (borde norte del desierto del Sahara), se han llevado a cabo experiencias de aumento de la infiltración de las escasas aguas de crecidas y los excedentes de riego (Tixeront y Daniel, 1967).

En Atlantis (Sudáfrica), a finales de los años 70 se puso en marcha un sistema de recarga mediante cinco balsas de aguas residuales tratadas y/o escorrentías superficiales como fuente de recarga de un acuífero de arenas fluviales y costeras (Tredoux *et al.*, 2002). Dos de las balsas están 500 m aguas arriba de los pozos de abastecimiento municipal. En Ciudad del Cabo, el 40% de la demanda se abastece con agua de recarga artificial mediante balsas (Tredoux y Cavé, 2002). Cada 12-15 años deben retirar los primeros 25 cm del suelo y sedimento.

En la ciudad de Polokwane (Sudáfrica), la recarga artificial representó más del 30% del suministro total de la ciudad (12 Mm³/año) en el periodo 1992-1994. Se trata de recarga de los acuíferos fracturados con aguas residuales filtradas a través del lecho filtrante del río Polokwane, (Murray y Tredoux, 2002). Además, en Calvinia (Sudáfrica) el 20% de su demanda anual (0,4 Mm³) se satisface con agua subterránea a través de un único pozo que capta los recursos de un acuífero fracturado, recargado con agua tratada procedente del embalse Karee. Esta actividad permite garantizar el suministro durante la demanda de los meses estivales. Se registran tasas de recarga de 7 l/s (Murray y Tredoux, 2002).

Tabla 2-5 Resumen de las experiencias más importantes de recarga artificial en África.

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
Sudáfrica	Williamstom	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de infiltración)	Se alimenta de agua de escorrentía intermitente. El viento realiza la descolmatación en época seca. Desde 1946.
	Atlantis	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de	Cinco balsas con aguas residuales tratadas y/o

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
		infiltración)	escorrentía superficial
	Ciudad del Cabo	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas de infiltración)	Eliminación de capa de colmatación cada 12-15 años.
	Polokwane	Dispositivo superficial dentro del cauce (filtración a través del banco del río)	12 Mm ³ /año en 1992-1994. Acuífero fracturado
	Calvinia	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	0,4 Mm ³ /año
	Kharkams	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Aguas de escorrentía superficial
Marruecos	Tánger	Dispositivo profundo de recarga (Pozos de inyección)	Agua fluvial tratada. Desde 1958
	Túnez	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración) y dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Frenar intrusión salina
Argelia	Biskra	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsas y canales o zanjas de infiltración)	Agua de crecidas y excedentes de riego
Namibia	Omdel	Dispositivo superficial dentro del cauce (represas o diques de retención)	Agua de crecidas. Se distribuyen a lo largo del río y en la zona de desembalse donde se forman embalses.
	Winkhoek	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Cuarcita fracturada. Balsa de sedimentación previa a la inyección. 16,5 Mm ³ /año
Senegal	Dakar	Dispositivo superficial dentro del cauce (Represa o diques de retención)	Desde 1964
Somalia	Somalia	Dispositivo superficial dentro del cauce (Filtración a través del banco del río)	Aumentar la disponibilidad de recursos

Kharkams depende exclusivamente de aguas subterráneas (Ortiz, 2012) y desde 1995 cuenta con un sistema de inyección-bombeo de tres pozos que aprovechan las escorrentías superficiales (40 m³/d) para abastecer el 18% de la demanda diaria de la población (Murray y Tredoux, 2002).

En Namibia, las actividades de recarga artificial han tenido una gran aceptación durante la pasada década. Las experiencias más emblemáticas se realizan en las ciudades de Omdel y Winkhoek. En Omdel se recargan aguas de crecidas o aluviones a través de la presa de Omdel y de diferentes balsas de recarga en el río. En Windhoek, el agua procede de tres presas, del acuífero de cuarcitas y de agua regenerada. Además, utilizan agua superficial para recargarla a través de pozos en el acuífero de cuarcitas. En Omdel (el acuífero del Delta del río Omaruru), el dispositivo de recarga es un sistema de balsas de infiltración construidas sobre los materiales aluviales del lecho del río Omaruru, y suministra recursos a las ciudades costeras de Walvis Bay, Swakopmund, Henties Bay y Rössing (Zeelie, 2002). Concretamente, en el año 1993 se construyó la presa para frenar y recolectar las aguas de las crecidas. Esta agua se libera de manera controlada desde la presa a lo largo de 6 km de cauce de río en el cual se han construido las diferentes balsas de recarga. En el año 1997 el 53% del agua de crecidas fue recarga al acuífero (SKM, 2010).

En Winhoek, durante el año 1996 comenzó a utilizarse un sistema de recarga artificial constituido por una batería de pozos de inyección en cuarcitas y esquistos fracturados y una balsa de sedimentación previa. La capacidad de infiltración ha llegado a inyectar unos 16,5 Mm³/año, lo que representaría el 90% de las necesidades actuales de la ciudad (Murray, 2004).

Por otro lado, en Senegal, en el karst próximo a la península de Cabo Verde, se construyó en 1964 una presa para infiltrar agua que mejoró considerablemente el abastecimiento de la ciudad de Dakar y se redujo apreciablemente la intrusión marina (Compte y Custodio, 1969).

En Somalia, el fomento de la infiltración en los cauces de los ríos (Berg, 1977) dio lugar a una mejora importante de la disponibilidad de los recursos.

2.4.2.4 Asia

En Asia se identifican diferentes tipos de dispositivos de recarga, encontrándose los más avanzados en Israel (Tabla 2-6).

Tabla 2-6 Resumen de las experiencias más importantes de recarga artificial en Asia.

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
Israel (dominan los pozos de inyección, usan aguas de escorrentía, tormenta y residuales)	Shafdan	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Agua regenerada. Pozos de diferentes diámetros
	Región de Dan	Dispositivo superficial fuera del cauce (campos con balsas de infiltración) y dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Agua residual de Tel Aviv. Infiltración de 135 Mm ³ /año. uso para riego.
	Yavne	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	
	Nahaley Menashe	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	
India (graves problemas de sobreexplotación e intrusión salina)	Warud Taluka	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Basaltos
Palestina		Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Aguas residuales o de tormenta
Japón (inicialmente se utilizaron pozos para contrarrestar la subsidencia por bombeo y actualmente se usan métodos de infiltración)	Rokugo	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Agua de un canal de riego
	Umamigasaki	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Agua de excedentes de riego (desde 1991)
	Shou	Dispositivo superficial fuera del cauce (canales o zanjas de infiltración)	Pozo de extracción a 250 m de la infiltración.
Irán	Kaftari	Dispositivo superficial de infiltración fuera del cauce (Balsa de infiltración)	83,5% del agua recarga al acuífero
Uzbekistán	Chirchik	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	
Turkmenistán		Dispositivo superficial fuera del cauce (canales, zanjas y balsas de infiltración)	Las infraestructuras perforan la capa de arcillas superficial
Pakistán		Dispositivo superficial fuera del cauce (Superficie de	Recarga de aguas de escorrentía

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
		recarga)	
Tailandia		Dispositivo superficial fuera del cauce (Superficie de recarga)	Recarga de aguas de escorrentía

Israel es uno de los países donde la Recarga Artificial ha alcanzado un gran desarrollo durante los últimos años. Se utilizan tanto excedentes invernales de agua de buena calidad, procedente del río Jordán y el lago Tiberiades, como aguas de crecidas y/o aguas residuales (Shelef, 1979; Gauss *et al.*, 2007). Los métodos de recarga utilizados son balsas en superficie o los pozos de inyección, aunque estos últimos son los más dominantes. Sin embargo, el proyecto de la Región de Dan, encargado de la recarga y tratamiento de las aguas residuales urbanas de la ciudad de Tel Aviv mediante su paso por el sistema suelo-acuífero (con balsas y campos de inundación) y junto con pozos de infiltración es el mayor proyecto de recarga artificial del país. Anualmente, se infiltran 135 Mm³/año que se extraen utilizando baterías de pozos localizadas en las inmediaciones de las instalaciones de recarga; el agua así recuperada es empleada para riego. Del resto de proyectos de recarga artificial que continúan en vigor, caben destacar los que afectan a las zonas de Yavne (Icekson-Tal y Blanc, 1998) y Nahaley Menashe (Murray *et al.*, 2007), ambos sobre balsas de infiltración y con volúmenes de recarga de unos 100 hm³/año.

En India, actualmente el 60% de la superficie total del territorio se encuentra sobreexplotada con evidencias de intrusión salina (Murray *et al.*, 2007). Como consecuencia, se han realizado numerosos estudios piloto y se ha estimado que la superficie donde es viable realizar recarga artificial suma 448.760 km² (CGB, 2002). En basaltos de Warud Taluka, se construyeron tres balsas de infiltración que permitieron un aumento de los niveles piezométricos entre 1 y 10 m (Chadha, 2002).

En Palestina, la recarga artificial de acuíferos se realiza principalmente con aguas residuales o de crecidas, tanto para aumentar los recursos hídricos como para limitar la intrusión marina y mejorar la calidad de los recursos.

En Japón, durante los años 50, 60 y 70, la recarga artificial por pozos se utilizó como método de prevención de la subsidencia por bombeo en grandes ciudades industriales

como Tokio u Osaka (Yamamoto, 1972). Hacia los años 90, se prefirió aplicarla por extensión superficial dado los problemas de colmatación de los pozos (Hida, 2002). En la actualidad, las actuaciones operativas de más relevancia son las de Rokugo, Umamigasaki y Shou River. El dispositivo de Rokugo está constituido por cuatro balsas de recarga a las que llegan caudales de 60 a 70 l/s de agua procedente de un canal de riego que drena al río Maruko. En pocos meses las tasas de infiltración pasaron a la mitad (inicialmente eran 20 cm/h) (Hida, 2007; Hida y Ohizumi, 2005; Hida y Ohizumi, 2006; Hida *et al.*, 2009).

En Umamigasaki, las operaciones de recarga comenzaron en 1991, utilizando como agua de recarga los excedentes de riego de los campos de cultivo de arroz. Las tasas de infiltración de la cuenca fueron de 18,4 cm/h hasta el año 2001 y de 9,2 cm/h a partir del año 2002 (Kakubari, 2006). En el acuífero aluvial de Shou, se dispone de un sistema de control de drenes horizontales que alimentan a un pozo de extracción ubicado 250 m aguas abajo de la cuenca (Enomoto, 2007).

En Irán la recarga artificial se inició en 1983 con cinco sistemas de recarga por balsas en la zona de Kaftari. Si bien los procesos de colmatación son importantes, se estima que el 83,5% del agua recarga el acuífero (Esfandiari-Baiat y Rahbar, 2004).

Condiciones similares a las de Irán existen en Uzbekistán y Turkmenistán (ONU, 1977). En el primero, las experiencias se han realizado mediante balsas de recarga y pozos de extracción en el valle del río Chirchik. En Turkmenistán se trata de conducir la escorrentía hacia lugares (aluviales, deltas, barjanes, etc.) donde el agua se infiltre naturalmente o con la ayuda de pozos que perforan la capa de arcilla.

En Pakistán y Tailandia lo que se pretende es aumentar la infiltración alargando del tiempo de escorrentía.

2.4.2.5 América

Estados Unidos se caracteriza por presentar una larga experiencia en recarga artificial de acuíferos tanto por balsas de infiltración como por pozos de inyección (Tabla 2-7 y Tabla 2-8).

Tabla 2-7 Emplazamiento de recarga relevantes en los EE.UU.

Zona	Volumen de recarga (Mm³/d)
Florida	6,40
Nueva York	0,85
California	0,23
Texas	0,23
Las Vegas	0,59

Fuente: Murray et al., 2007.

A pesar de que la mayor parte de estas actuaciones se dirigen principalmente al suministro urbano y al almacenamiento estacional (AWWA, 2002), muchas de ellas conllevan beneficios secundarios como la recuperación de los niveles piezométricos, la prevención de la intrusión marina, la protección del hábitat de especies amenazadas y la mejora de la calidad de las aguas subterráneas (Tabla 2-8). La mayor parte del agua de recarga procede de fuentes superficiales (60%), las aguas subterráneas representan el 22% y las residuales el 7% (AWWA, 2002).

El esquema de recarga más antiguo del que se tiene conocimiento es el de Long Island, en Nueva York, donde existen, desde 1935, unas doscientas fosas para agua de escorrentía urbana, con superficies de entre 0,2 y 10 Ha, y capacidades próximas a los 114.000 m³/d. En 1968 se pusieron en marcha los sistemas de recarga de New Jersey.

El sistema de recarga utilizado en Peace River (Florida) está constituido por una balsa de decantación, a la que llega el flujo procedente del río Peace, una planta de tratamiento del agua de recarga hasta los estándares de calidad domésticos y un sistema de 27 pozos de inyección y recuperación de los recursos del acuífero de calizas al que atraviesan. La capacidad de inyección y recuperación de cada uno de los pozos es de 2000-4000 m³/d, habiéndose conseguido almacenar un volumen de 6.400 Mm³ durante el periodo 1985-2005. En el estado de California, las actividades de recarga artificial de acuíferos se concentran en cuatro áreas fundamentales: el valle de Santa Clara, el sur de la bahía de San Francisco, la zona centro y sur del valle de San Joaquín, y el sur de California. Desde octubre de 1958, se han llevado a cabo 276 proyectos utilizando distintos métodos de recarga. La infiltración por balsas es el método más comúnmente utilizado, representando

el 54% de todas las actuaciones; la recarga a través de lechos de río significan el 15% mientras que los pozos de inyección suponen el 12% (Ortiz, 2012).

Tabla 2-8 Resumen de las experiencias más importantes de recarga artificial en América.

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
EE.UU. (En California hay 276 proyectos de recarga)	Long Island (Nueva York)	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Agua de escorrentía urbana. Desde 1935
	Peace River (Florida)	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Balsa de decantación y planta de tratamiento del agua del río
	Valle Central (California)	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Más de 50.000 pozos con una recarga de 1.100 hm ³ /año
	Costa oeste (California)	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	120 pozos de inyección
	Los Ángeles (California)	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración y Superficies de recarga en campos de inundación)	Aguas residuales y aguas del río Colorado
	Roseville (California)	Dispositivo profundo (Pozo de inyección)	Agua del río Americano
	Kerville (Texas)	Dispositivo profundo (Pozos de inyección)	Aguas residuales tratadas
	Fresno (California)	Dispositivo superficial dentro del cauce (Represas y diques de retención)	Creación de embalses de agua de tormenta
	Arkansas	Dispositivo superficial dentro del cauce (represas y diques de retención)	Creación de embalses de agua de tormenta
	Tucson (Arizona)	Dispositivos superficiales y profundos (Balsas de infiltración y pozos de inyección)	Recarga de aguas residuales
	Phoenix, Granite Reef (Arizona)	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Recarga de aguas tratadas y excedentes pluviales de diferentes ríos
	Phoenix, Agua Fría (Arizona)	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Recarga de aguas tratadas y excedentes pluviales de diferentes ríos. Balsas

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
			de 90 Ha sobre aluvial de elevada permeabilidad.
	Phoenix, Río Salado, (Arizona)	Dispositivo profundo (Pozo abierto de infiltración)	Agua de excedentes de diferentes ríos filtradas y desinfectadas
	Scottsdale (Arizona)	Dispositivo profundo (Pozo de inyección) (55 m de profundidad)	Recarga de aguas residuales tratadas (microfiltración y ósmosis) y excedentes pluviales
	Beaverton (Oregón)	Dispositivo profundo (Pozo de inyección)	Aguas de los ríos Trask y Tualatin
	Las Vegas (Nevada)	Dispositivo profundo (Pozo de inyección a 240 m)	Desde 1987. Para recuperar niveles piezométricos
	Sand Hollow (Utah)	Dispositivo superficial dentro del cauce (Represas y diques de retención)	Aguas fluviales
	Alaska	Dispositivo profundo (Pozo de inyección)	Conector entre acuífero superficial y profundo
Canadá	London	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Derivación de agua del embalse
México	Hermosillo	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración) y dispositivo superficial dentro del cauce (Represas)	Aumentar disponibilidad hídrica
	México D.F.	Dispositivo profundo (Pozo de inyección)	Desde 1956. Aguas fluviales de crecida sin tratar
	Torreón	Dispositivo profundo (Pozo de inyección) y dispositivo superficial en cauce (represa)	Desde 1974. Aguas de tormenta decantadas en depósitos enterrados
	Aguascalientes	Dispositivo profundo (Pozo de inyección)	Agua residual con tratamiento terciario
Cuba		Dispositivo profundo (Pozo de inyección)	En acuíferos calizos para evitar intrusión salina
		Dispositivo superficial dentro del cauce (Represa o dique de	

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
		retención para infiltración)	
Paraguay	Chaco-Central, Filadelfia	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	3.000 m ³ /año
Argentina	Tulum	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Agua del río
	Mendoza	Dispositivo superficial fuera del cauce (Balsa de infiltración)	Agua del río
	Pampa	Dispositivo superficial dentro del cauce (Represa, diques permeables) y dispositivos profundos (zanjas combinadas con pozos de inyección y pozos con galerías)	

Concretamente en la zona de Los Ángeles, los centenares de áreas de inundación y las balsas de infiltración, han sido alimentadas con agua procedente del río Colorado y, a partir del año 1962, con aguas residuales tratadas. En cuanto a los pozos de recarga, estos se encuentran distribuidos a lo largo de toda la costa (Costa Oeste, Orange, Alamitos, entre otros), contabilizándose un total de unos 120 pozos con caudales de inyección de hasta 2000 hm³/año. En la zona del Valle Central, con importantes caudales de bombeo, se estima una recarga aproximada de 1.100 hm³/año a través de más de 50.000 pozos de inyección. Destacar también el dispositivo de recarga de la ciudad de Roseville en funcionamiento desde el año 2005. En dicho dispositivo, se inyecta agua superficial del río Americano a la formación Mehrten que se encuentra a una profundidad entre 95 y 140 m. Para el control de la calidad del acuífero, se utilizan tres pozos de monitoreo ubicados a 400 m del pozo de inyección.

Por otro lado, en el acuífero de areniscas y conglomerados de Kerrville (Tejas), se utilizan aguas residuales tratadas como fuente de recarga. La capacidad de inyección y recuperación por pozo es de 3.000-6.000 m³/d, con el objetivo de satisfacer la demanda proyectada al año 2040 de 5,7 Mm³ (Murray *et al.*, 2007).

En Fresno y Arkansas se utiliza agua procedente de lagunas de crecidas para la recarga artificial.

En el estado de Arizona, y principalmente en Tucson y Phoenix la fuente de recarga más importante son las aguas servidas tratadas (Valliant, 1964). Arizona tiene problemas de abastecimiento de una población en crecimiento, de subsidencia del terreno y de deterioro de la calidad de las aguas por sobreexplotación de los recursos. Todo esto ha permitido el impulso de la recarga artificial. Los proyectos de almacenamiento subterráneo más importantes son los de Granite Reef y en el río de Agua Fría, ambos en Phoenix, así como los de recarga y recuperación por pozos en el Río Salado (Phoenix) y en la planta de tratamiento de Scottsdale.

Granite Reef (Phoenix) es un sistema aluvial de arenas y gravas de grano grueso no consolidadas que cuenta con altas permeabilidades y elevada capacidad de almacenamiento. Esto ha permitido la infiltración de grandes volúmenes de agua, con elevadas tasas de recarga que oscilan entre 0,6 y 2 m/d. Esta infiltración se realiza a través de seis balsas de recarga de 90 Ha de superficie y alimentadas con excedentes pluviales y aguas regeneradas. El dispositivo construido sobre el sistema aluvial del río Agua Fría (Paski y Lluria, 2005) consta de siete balsas y una capacidad máxima de 120 Mm³ de agua, procedente de dos plantas de tratamiento a la que llegan los excedentes pluviales de los ríos Colorado, Verde y Salado. Previamente a su introducción por gravedad en los pozos, con rendimientos de 180-300 l/s y profundidades de 100-500 m, el agua es sometida a tratamientos de filtración y desinfección (con peróxido de hidrógeno) (Lluria *et al.*, 1991).

En Scottsdale (Arizona) más del 50% del suministro municipal procede de la recarga artificial. Se utilizan aguas tratadas en diferentes tipos de pozos de inyección. La planta de tratamiento de Scottsdale consiste en una planta de regeneración, por microfiltración y ósmosis, de aguas servidas y de excedentes pluviales del río Colorado. Esta agua es inyectada, desde 1999, a través de veintisiete pozos de 55 m de profundidad, todos ellos penetrantes en una unidad aluvial de arenas, limos y arcillas; la capacidad de recarga de cada pozo es de 53 l/s. Después de diez años de funcionamiento, la capacidad de recarga de las instalaciones se ha reducido en un 48%, debido a problemas de colmatación (Lluria, 2009).

Desde 1999, la ciudad de Beaverton (Oregón) ha instalado cuatro pozos de inyección/recuperación para agua tratada procedente de los ríos Trask y Tualatin. Estos pozos pueden proporcionar lo que equivale a casi la mitad de la demanda máxima de la

ciudad en verano (Ortiz, 2012). Hay que señalar que las operaciones de recarga artificial se iniciaron en Las Vegas en 1987 mediante dos pozos. Se trata de un acuífero arenoso con arenas y gravas. En el año 2005 ya habían 99 pozos que recargaban 390 ML/d (390.000 m³/d), 77 de los cuales estaban equipados para bombeo. Esta es una de las operaciones de ASTR más grandes del mundo. Los pozos presentan rendimientos entre 13.500 a 22.700 m³/d y la transmisividad varía entre 12 y 3.726 m²/d. El sistema funciona con pares de pozos, uno para inyección y otro para recuperación. La profundidad de inyección es de 240 m y la de extracción de 366 m. En los primeros 16 años de operación, los niveles piezométricos se recuperaron 30 m (SKM, 2010).

Desde el año 2006, en Madison Farms, localizado cerca de Echo (Oregón) y con una superficie de 71 km², han utilizado la recarga artificial para incrementar la capacidad de bombeo del acuífero basáltico del río Columbia (Eaton *et al.*, 2009). El agua procede de un acuífero aluvial y se inyecta mediante un pozo de 211 m de profundidad, localizado sobre el acuífero basáltico de destino. Hasta el momento, el volumen de agua inyectado en Madison Farms ha sido de más de 550.000 m³.

En Sand Hollow (Utah), desde el año 2002, se encuentra en marcha un proyecto de almacenamiento superficial y recarga artificial de la formación de areniscas Navajo mediante un embalse receptor de recursos procedentes del río Virgin. El volumen recargado en el periodo 2002-2007 fue de 87,5 Hm³ (Heilweil *et al.*, 2008; Heilweil *et al.*, 2009).

Además de las aplicaciones más generales de la recarga artificial puede mencionarse su uso como método de trasvase de agua poco profunda a acuíferos profundos; esta experiencia tuvo lugar en Alaska utilizando un pozo como conector entre ambos acuíferos.

En Canadá, se complementa el abastecimiento de la ciudad de London introduciendo agua de embalse en depresiones que llegan hasta capas de grava bajo recubrimiento permeable arcilloso (Taylor, 1963).

México ha desarrollado varios esquemas de recarga, entre los que destacan los de las ciudades de Hermosillo, Ciudad de México y Torreón. En Hermosillo, se explota un acuífero aluvial recargado con los recursos y fugas de la presa situada aguas arriba de la ciudad. Dado que más de la mitad del territorio mexicano está dominado por condiciones

climáticas semiáridas y áridas, las aguas subterráneas constituyen un recurso esencial para su desarrollo. Con el objetivo de aumentar la disponibilidad hídrica de sus acuíferos.

En 1956, cerca de Ciudad de México, se inició la inyección profunda de 2,5 hm³ de aguas fluviales de crecida sin tratar (Bourguet, 1971), a través de tres pozos dispuestos sobre un acuífero libre con el nivel piezométrico muy deprimido. En el área de Torreón y operativo desde 1974, se encuentra un sistema de inyección profundo constituido por pozos de gran caudal, que inyecta aguas de crecidas con tratamiento previo de decantación en depósitos enterrados (Smith y Hanor, 1975). En la ciudad de Torreón se incrementan los volúmenes de agua disponibles en el acuífero, mediante un esquema de recarga aprovechando las depresiones naturales en el lecho seco del río Nazas que cuenta con 197.000 m³ de capacidad (Gale y Dillon, 2005). Consiste en una balsa de sedimentación y otra de recarga, para la alimentación del acuífero.

El último gran proyecto de recarga artificial en México se está construyendo en el valle de Aguascalientes. Es un sistema que consta de un pozo de inyección y varios de extracción, además de 10 pozos de monitoreo y control. Se trata de un gran acuífero en el que los niveles piezométricos estaban disminuyendo a la razón de 1,5 m por año debido a uso agrario principalmente. Se espera que el sistema entre en funcionamiento durante el año 2014. Se estima inyectar del orden de 25 Mm³/año de agua residual a la que se le aplicará un tratamiento terciario.

Por otro lado, son notorias las actividades de recarga llevadas a cabo en Cuba. En general, se trata de pozos de inyección de agua de escorrentía en calizas muy karstificadas para evitar la intrusión salina. Además, se dispone de una presa construida con el objetivo de infiltrar en el propio vaso a razón de 75 hm³/año y de un sistema de pozos con una capacidad de inyección de 40 hm³/año (González-Báez, 1974).

En la experiencia de Paraguay, se puede destacar el proyecto del Chaco-Central, en la ciudad de Filadelfia (Godoy *et al.*, 1995). De hecho, la recarga artificial ya se practicaba en esta zona por los indígenas del Chaco, quienes en los terrenos bajos arenosos construían un pozo central rodeado de un anillo de pozos. El agua de lluvia que se acumulaba en el bajo penetraba en los pozos del anillo, lo cual hacía que nunca faltara agua en el pozo central. Actualmente, en las zonas urbanas realizan recarga mediante pozo vertical e infiltrando agua de lluvia recogida en los techos o agua drenada de los

patios o almacenada en los aljibes. En las áreas rurales predomina la recarga mediante tajamar en la cual se almacena agua de escorrentía en zonas con fondos permeables. Precisamente en la zona de Filadelfia se construyó en 1981 el tajamar más importante. Consta de 11 pozos de observación que permiten evaluar el aumento de la napa freática y la disminución de la salinidad. Se infiltran unos 3.000 m³ anualmente.

Los restantes casos americanos se encuentran principalmente en Argentina. A comienzos de la década de 1970 comenzó a recargarse el aluvial del río San Juan, en el valle de Tulum con su propia agua, a través de un conjunto de 21 balsas escalonadas (Bojanich, 1969; Victoria y Pellegrino, 1972). Experiencias similares y con semejantes resultados se llevaron a cabo en el área de Mendoza. Otros dispositivos de recarga como las represas de fondo permeable, las fosas drenantes o los pozos con drenes radiales colocados en zanjas fueron también utilizados para la infiltración del agua en otras zonas como la llanura de la Pampa, de naturaleza poco permeable (Bojanich y Risiga, 1976), y Tostado (Bojanich, 1969).

Finalmente, mencionar una corta experiencia de recarga realizada por Naciones Unidas en Jamaica (IASH, 1970) y algunos proyectos desarrollados para la ciudad de Lima, Perú. Las experiencias en Chile se han ya detallado en la revisión de antecedentes nacionales.

2.4.2.6 Oceanía

El país que cuenta con la más dilatada experiencia es Australia (Tabla 2-9). El objetivo primordial de la recarga artificial en Australia es la demanda agraria e industrial junto con la prevención de la intrusión marina debida a la sobreexplotación de sus acuíferos. El número de proyectos de recarga artificial en Australia se ha incrementado en los últimos años, en parte como respuesta a la sequía y al crecimiento de la población en las ciudades. Las aplicaciones de esta técnica en las ciudades se han realizado infiltrando agua depurada o agua procedente de crecidas en los acuíferos para su posterior utilización para el riego urbano, el uso en inodoros o el uso industrial. El suministro de agua de bebida está empezando a utilizar estas técnicas. En zonas rurales, también se almacena el agua depurada y el procedente de crecidas en acuíferos durante la estación húmeda para suministrar agua para regadío en la estación seca. Para facilitar todas estas operaciones, se han redactado directrices a nivel nacional para la gestión de la recarga artificial. Las primeras operaciones de recarga artificial en Australia empezaron en los

años 60 en el Delta de Burdekin (Queensland). Este sistema ha estado funcionando durante más de 40 años y actualmente es el dispositivo de recarga artificial más importante de Australia con 170 l/año (Volker, 1981; Charlesworth *et al.*, 2002). Este sistema consiste en una serie de canales, zanjas naturales y artificiales, alimentadas con los excedentes del río Burdekin y hasta con dos mil pozos de extracción (O'Shea, 1967).

En Australia, existen numerosas presas de recarga algunas de las cuales construidas ya en los años 70, entre las cuales se pueden mencionar aquellas de las ciudades de Callide y Lockyer Creeks, al sureste de Queensland, la Little Para Dam para el suministro de agua de la ciudad de Adelaida (Dillon, 1984). Además, se destacan al menos 30 pozos de inyección en el área de riego de Angas-Bremer en el estado del sur de Australia.

En la actualidad, las experiencias de recarga más destacables tienen lugar en la planicie septentrional de la ciudad de Adelaida (Andrews Farm, Greenfields y Paddocks), en las cuencas río Murray y Northfield. En Andrews Farm, el agua procedente de las lluvias torrenciales es recuperada y tratada, desde 1992, en balsas de detención construidas para reducir los riesgos de crecidas y mejorar su calidad; posteriormente y mediante alimentación por gravedad o inyección por pozos, estos recursos pasan a ser almacenados en la formación acuífera a razón de 15-20 l/s (Gale y Dillon, 2005).

Otra ciudad en la que se utilizan las aguas torrenciales como fuente de recarga es Mount Gambier, en el estado Sur de Australia.

Tabla 2-9 Resumen de las experiencias más importantes de recarga artificial en Oceanía.

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
Australia (demanda agraria en industrial para frenar sobreexplotación y salinización por aumento de demanda)	Delta de Burdekin (Queensland)	Dispositivos superficiales fuera de cauce (Zanjas y canales de infiltración)	170 l/a. desde 1960. Excedentes del río Burdekin.
	Callide	Dispositivos superficiales dentro del cauce (Represas)	Agua fluvial
	Lockyer Creeks	Dispositivos superficiales dentro del cauce (Represas)	Agua fluvial
	Little Para Dam	Dispositivos	Agua fluvial

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
	(Adelaida)	superficiales dentro del cauce (Represas)	
	Angas-Bremer (South Australia)	Dispositivo profundo de recarga (Pozos de inyección)	30 pozos
	Andrews Farm (Adelaida)	Dispositivos superficiales fuera de cauce (Balsas de infiltración de agua de tormenta) y dispositivos profundos (Pozos de inyección).	Agua de tormentas y crecidas de lluvias torrenciales
	Mount-Gambier (South Australia)	Dispositivos profundos (Pozos de inyección)	Agua de crecidas retenidas en diferentes embalses
	Halls Head (Western Australia)	Dispositivos superficiales fuera de cauce (Balsas de infiltración)	Aguas regeneradas
	Floreat Park (Western Australia)	Dispositivos superficiales fuera de cauce (Canales o zanjas de infiltración)	Aguas regeneradas
	Alice Springs (Northern Territory)	Dispositivos superficiales fuera de cauce (balsas de infiltración)	Agua regenerada
	Jandakot (Western Australia)	Dispositivos superficiales de infiltración fuera de cauce	Agua para abastecimiento urbano
	Warruwi (Northern Territory)	Dispositivos superficiales fuera de cauce (Balsas de infiltración)	Agua para abastecimiento urbano
	Parafield (South Australia)	Dispositivos superficiales fuera de cauce (Balsas de infiltración)	Agua para abastecimiento urbano
Nueva Zelanda	Río Eyre	Dispositivos superficiales dentro del cauce (Filtración a través	Planta Piloto

País	Emplazamiento	Tipo de dispositivo	Datos adicionales
		del banco del río)	
	West Melton	Dispositivos superficiales fuera de cauce (Balsas de infiltración)	
	Heretaunga Plains	Dispositivos superficiales fuera de cauce (Balsas de infiltración)	Desde 1984
	Level Plains, South Canterbury	Dispositivos superficiales fuera de cauce (Canales y balsas de infiltración)	Desde 1986

En Perth, Oeste de Australia, la escorrentía y las aguas torrenciales son utilizadas para recargar fosas y balsas de infiltración en la llanura costera de Swan, de naturaleza detrítica (Dillon, 2009).

En las ciudades de Halls Head (Toze *et al.*, 2002) y Floreat Park (Bekele *et al.*, 2006), ambas en el estado Oeste de Australia, las actividades de recarga son con agua regenerada mediante balsas y galerías de infiltración, respectivamente. En el año 2008, Alice Springs, en el estado de Northern Territory, introdujo el primer tratamiento mediante suelos acuíferos de este tipo de aguas (Knapton *et al.*, 2004). Otras actuaciones menos importantes son las realizadas en las ciudades de Jandakot (Western Australia), en el año 2000 (Martin *et al.*, 2002), Warruwi (Northern Territory), en 2001 (Pavelic *et al.*, 2002) y Parafield (South Australia), en 2006, todas ellas con el fin de obtener agua potable para abastecimiento urbano (Rinck-Pfeiffer *et al.*, 2005).

Ahora bien, las actuaciones de recarga artificial en Nueva Zelanda son más recientes y se encuentran a nivel de planta piloto (SKM, 2010): a través del cauce del río Eyre (2005); balsas de infiltración de West Melton (1992); cuatro balsas de infiltración en Heretaunga Plains (1984); canales y balsas de infiltración y riego en Level Plains, South Canterbury (1986).

2.5 Síntesis de experiencias para la selección de dispositivos y zonas para la recarga artificial

En el apartado 2.4 se han presentado los casos más emblemáticos de recarga artificial en diferentes países organizadas por continentes. Además, se muestra la aplicación de una gran variabilidad de dispositivos para diferentes usos y con variados objetivos.

De esta manera, se han identificado experiencias de recarga artificial en gran parte de los países con mayores o menores volúmenes de infiltración y en prácticamente todos los tipos de acuíferos. Los diferentes tipos de dispositivos implementados dependen tanto del clima como de la geología e hidrogeología. En el norte de Europa (Alemania, Austria, Suiza y Holanda), donde los ríos son permanentes y caudalosos, se implementan balsas de infiltración por extensión superficial y se desarrollan los métodos de infiltración a través de los márgenes del río y los canales. En estas zonas, donde el principal problema no es la disponibilidad del agua sino su calidad, el principal objetivo de la recarga artificial es mejorar la calidad del agua y ahorrar el tratamiento terciario en ríos. En el Sur de Europa, los ríos no son tan caudalosos y las técnicas de infiltración a partir del lecho del río son menos comunes. En estas zonas, el objetivo de la recarga artificial es el aumento de recursos.

No obstante, en el Reino Unido, Israel, Jamaica y Japón se prefieren los pozos de inyección debido a la presencia de formaciones carbonáticas de alta permeabilidad secundaria. En estos casos, la geología es la que determina el tipo de dispositivo de recarga.

En Francia y Estados Unidos, la gran diversidad geológica permite la utilización de ambas técnicas de infiltración (Brown y Signor, 1974). Destacar que en Estado Unidos es donde la recarga mediante pozos de inyección es la técnica más desarrollada y donde se localizan los campos de pozos de inyección más grandes. Esto se relaciona con el hecho de que la recarga mediante pozos es más compleja y costosa que mediante balsas o presas. Además, Estados Unidos cuenta con una experiencia suficientemente larga como para poder implementar esta tecnología. Sin embargo, en los países donde la tecnología es incipiente o novedosa, se inician normalmente con proyectos de balsas de infiltración.

En Australia y África, donde uno de los problemas es la disponibilidad y escasez de agua, las técnicas aplicadas utilizan aguas de ríos y de crecidas. Más concretamente, se construyen presas o embalses para retención de aguas de crecidas que al mismo tiempo sirven de protección. Estas aguas se recargan mayormente mediante balsas o canales. En estos tipos de dispositivos se requieren tratamientos adicionales antes de la recarga, especialmente de decantación.

Finalmente, destacar que la mayor parte de los nuevos dispositivos de recarga artificial pretenden infiltrar aguas servidas tratadas (regeneradas) a la que se le aplican diferentes grados de pre-tratamientos. La recarga con este tipo de agua está muy extendida en el norte de Europa, Australia, Israel y el norte de América.

En base a la experiencia internacional, se concluye que para la elección del dispositivo y la zona, los criterios a tener en cuenta son: las características climáticas o disponibilidad de recursos, el tipo de demanda, el objetivo de la recarga, la experiencia acumulada en recarga y las características geológicas y geomorfológicas:

1) Objetivo de la recarga artificial

- En las zonas donde la disponibilidad de recursos es elevada pero tienen problemas de calidad utilizan dispositivos que propicien el tratamiento a través de la circulación por la zona no saturada. En estos casos se utilizan pozos de extracción que inducen la recarga desde ríos o lagos a través del lecho del río o de materiales de dunas. El paso a través de esta zona no saturada constituye un tratamiento del agua, ya que los contaminantes se degradan o atenúan en el medio.
- En las zonas donde el objetivo es aumentar la disponibilidad de agua se aplican técnicas que permiten el almacenamiento de recursos que de otra manera no se aprovecharían, tales como:
 - Excedentes de riego.
 - Aguas de tormentas.
 - Aguas de crecidas.
 - Escorrentía superficial (aumento del caudal de los ríos).
 - Aguas residuales.

En estos casos el tipo de dispositivo puede ser tanto de inyección mediante pozos, si la experiencia es suficiente, como mediante balsas o presas. En este segundo caso, el dispositivo tiene que ser correctamente dimensionado para poder almacenar los volúmenes que se generen. La elección del tipo de dispositivo dependerá de la geología y de la morfología.

- La sobreexplotación en zonas costeras puede conllevar problemas de salinización de acuíferos y de manteamiento de ecosistemas relacionados. En estos casos se plantea la recarga artificial con objetivos ambientales. Se ha observado que se aplican tanto técnicas de recarga de inyección en pozos como de recarga en balsas, en función de las características del acuífero. Cuando el acuífero sobreexplotado es el inferior, la única técnica viable es la inyección mediante pozos. Las balsas o canales de infiltración se prefieren en zonas poco densamente pobladas y cuando el acuífero más afectado es el superficial.
- La disminución de la napa freática debido al aumento de las extracciones puede conllevar al secado de manantiales naturales o cauces de ríos. En estos casos, se plantea la recarga artificial con fines ambientales para recuperar los caudales naturales. Este es el caso del norte de Chile donde se utilizan pozos de inyección para restaurar los caudales de surgencias naturales (ejemplo, Puquíos del Salar de Llamara, vertientes Jachucoposa y Michinca).

2) Características climáticas

- Los países con estaciones marcadas e importantes diferencias entre periodos húmedos y secos normalmente tienen problemas de disponibilidad de agua y pueden sufrir periodos de inundaciones. En estos casos, es habitual diseñar dispositivos de recarga basados en el almacenamiento de recursos excedentarios durante la época húmeda que al mismo tiempo sirvan de protección ante eventos extremos. Si la época de precipitaciones es muy concentrada en el tiempo (por ejemplo en África) normalmente se construyen balsas de decantación previas a la infiltración-inyección.

- En países donde no hay estaciones pluviométricas contrastadas (norte de Europa) las técnicas utilizadas se basan en el tratamiento de aguas superficiales disponibles de manera permanente.

3) Tipo de demanda

- Demanda urbana. En muchos casos el aumento de la población en zonas urbanas genera problemas de sobreexplotación y de seguridad en el suministro. La gestión de la recarga ofrece una alternativa para aumentar la garantía de suministro. Actualmente, muchas ciudades europeas y americanas dependen en gran parte de los procesos de recarga artificial, ya sea para el tratamiento del agua o para el aumento de la disponibilidad de recursos hídricos. En la mayor parte de las demandas urbanas se plantea el uso de aguas residuales regeneradas por ser el recurso más disponible, sin embargo sólo se pueden llevar a cabo procesos de recarga que permitan el tratamiento con el suelo (balsas de infiltración, pozos de inyección-extracción separados, entre otros). En este tipo de recarga es muy importante la calidad del agua servida y por lo tanto los pozos de extracción deben situarse a una distancia notable de la zona de infiltración.
- Demanda agrícola. La agricultura requiere importantes volúmenes de agua y no es tan exigente en temas de calidad. La recarga para demanda agrícola es habitual en dispositivos de recarga estacional, normalmente mediante canales, zanjas y balsas de infiltración. Generalmente, la demanda agrícola es concentrada en una zona amplia y por esta razón son comunes los métodos de recarga mediante canales o zanjas de gran longitud. Puesto que el objetivo no es abastecimiento a la población, normalmente se dispone de menos recursos y se optan por dispositivos más sencillos.

4) Experiencia en recarga artificial

- La experiencia en recarga de un país determina la complejidad de los tipos de dispositivos que implementan. Los sistemas más complejos son los campos de pozos de inyección y extracción con aguas regeneradas. Actualmente, estos sistemas sólo se desarrollan a gran escala en aquellos países que cuentan con una gran experiencia (ejemplo en Estados Unidos,

norte de Europa y Australia). Los pozos de inyección requieren mayores costes de construcción, mantenimiento y operación. Es muy importante ser sistemático en las medidas de descolmatación de pozos que se describen en el apartado 3.5.4.2.

- En países con menores capacidades de gestión de dispositivos y con experiencia en recarga más limitada optan por la construcción de diferentes dispositivos en ríos como presas o balsas, que son los dispositivos de menor coste de construcción y mantenimiento. También optan por la construcción de balsas de infiltración o canales. Estos se pueden construir según diferentes esquemas más o menos complejos, por ejemplo balsas escalonadas en funcionamiento intermitente y paralelo, balsas de recarga-secado, entre otros.

5) Características geológicas y geomorfológicas

- El tipo de acuífero determina el tipo de instalación:
 - Un acuífero confinado o semiconfinado no permite la instalación de balsas de recarga, excepto si es bastante superficial y se rompe la capa confinante.
 - En el caso de acuíferos con permeabilidad secundaria o por fracturación (carbonáticos o metamórficos) aplican técnicas de recarga mediante pozos (ejemplo en Reino Unido, Japón y Francia).
 - En los acuíferos aluviales, permeables y con niveles piezométricos más o menos profundos (más de 5 m en general), las técnicas más aplicadas son infiltración mediante pozos, zanjas y embalses.
- La geomorfología determina el tipo de instalación. Las balsas de infiltración requieren terrenos con poca pendiente y normalmente se aplican en llanuras aluviales, mesetas, cuencas amplias y otros. Los campos de pozos en cambio se pueden implementar en cuencas y zonas más abruptas.
- El perfil de un río condiciona el tipo de instalación. En las zonas de desembocadura se derivan aguas a balsas de recarga mientras que en las partes altas se desarrollan presas o embalses de regulación-recarga.
- La recarga artificial de un acuífero no es posible si el nivel piezométrico es muy superficial. En este caso se plantean estructuras a través del río.

Respecto a estas últimas observaciones y considerando que Chile es un país con características climáticas muy diversas a lo largo de su geografía, con estaciones climáticas variadas, con ríos principalmente intermitentes, con acuíferos de características muy diversas, con experiencia corta en recarga artificial y con sus mayores demandas de agua concentradas en las zonas con menores excedentes hídricos, se plantean las siguientes opciones más validas en términos de Recarga Artificial:

- La instalación de dispositivos de retención en crecidas o aluviones bien para liberarlos en el cauce del río durante periodos más secos o bien para recargarlo en acuíferos aluviales.
- Construcción de canales de infiltración de aguas de escorrentía.
- Recarga de aguas residuales tratadas.
- Recarga mediante balsas de infiltración en acuíferos con porosidad primaria.
- Aplicación de técnicas de recarga en zonas costeras sobreexplotadas con riesgo real o potencial de salinización.
- Esquemas sencillos de recarga mediante pozos con fines tanto ambientales como de aumento de recursos.

2.5.1 Criterios y parámetros para la selección de potenciales cuencas, subcuencas y/o acuíferos para la recarga artificial

2.5.1.1 Consideraciones internacionales

Existen diferentes Guías internacionales que detallan los criterios y parámetros más importantes para la selección de zonas donde la recarga artificial es viable. Además, en diversos países (ejemplo en India e Irán) han aplicado Sistemas de Información Geográfica (SIG) para determinar las zonas más favorables de manera automática en base a unos criterios previamente definidos. En algunos de estos estudios utilizan la Teledetección para cartografiar algunos parámetros como geomorfología o usos del suelo.

Los estudios que se han considerado más relevantes para la identificación de estos criterios son:

- Fernández-Escalante, 2010. La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible. Desarrollo tecnológico. Serie Hidrología Hoy. DINA-MAR. 495 pp.

- Anke Steinel, 2012. Guideline for assessment and implementation of Managed Aquifer Recharge (MAR) in (semi-)arid regions. Pre-feasibility study for infiltration of floodwater in the Amman-Zarqa and Azraq basins, Jordan.
- Department of Water Affairs, 2009. Strategy and Guideline Development for National Groundwater Planning Requirements. A check-list for implementing successful artificial recharge projects.

A continuación se indican los criterios identificados en estos estudios y se citan los criterios utilizados en otros estudios focalizados a la identificación de zonas favorables para la recarga artificial. En el apartado 2.5.1.5 se presentan el *Análisis y síntesis de los parámetros y/o criterios para la selección de cuencas o acuíferos potenciales para implementar proyectos de recarga artificial en Chile*.

El estudio de Fernández-Escalante (2010) se ha realizado en el marco del proyecto DINA-MAR, en España. Este proyecto ha analizado y evaluado todos los emplazamientos de recarga artificial en toda España. Además, en la página web del proyecto (<http://www.dina-mar.es/>), se encuentra publicado un SIG con la selección de potenciales nuevos emplazamientos en España. Este SIG es muy completo y se basa en la delimitación de áreas cercanas a los ríos por ser aquellas que presentan mejores propiedades hidráulicas y con potencial agua de recarga cercana. En el informe se realizó una ponderación de todos los criterios más relevantes para cada una de las tipologías de dispositivos de recarga. A cada parámetro de cada tipología se le da un valor entre 1 y 3. Luego se realiza una suma de todos los valores de cada uno de los parámetros para identificar las zonas más favorables. Se trata de uno de los trabajos de análisis de criterios más completo. Utiliza 82 coberturas temáticas (criterios) diferentes y considera que el más importante es la capacidad de almacenamiento de los acuíferos. No obstante, se basa en la información disponible en España. Esta información no es igual de relevante en otros países ni existe con el mismo grado de detalle. Por ejemplo, considera la distancia a diferentes tipos de plantas depuradoras, la conductividad eléctrica del agua, el nivel piezométrico, balances hídricos excedentes, entre otros aspectos.

El estudio de Anke Steinel (2012) analiza todos los factores a tener en cuenta para la implantación de dispositivos de recarga en una zona árida como Jordania. Este estudio incluye una primera parte en la que describe todos los criterios y parámetros y analiza

diferentes estudios que han establecido metodologías de ponderación de estos criterios. Si bien el informe desarrolló más ampliamente la recogida de aguas de crecidas o aluvionales también considera los factores a tener en cuenta en otros dispositivos de recarga. Los criterios que este estudio utilizó son seis: precipitación, pendiente, infraestructuras hidráulicas, tipo de suelo, hidrogeología y uso del suelo. Este estudio realizó una evaluación de publicaciones que han evaluado los criterios más importantes para identificar áreas favorables para la inyección. En total identificó 24 parámetros que son considerados en nueve estudios diferentes (incluyendo el suyo). Estos criterios fueron: pendiente, uso del suelo o cobertura, geomorfología, depósitos superficiales, textura del suelo, tasa de infiltración, tipo de acuífero o litología, permeabilidad, almacenamiento, transmisividad, capacidad específica, profundidad nivel freático, gradiente de flujo, tiempo de residencia, salinidad del agua subterránea, contaminación, precipitación, distancia a pozos de abastecimiento, distancia a fallas, distancia a zonas urbanas, distancia a carreteras, distancia a pozos y distancia a bordes internacionales. De todos estos criterios, los más utilizados son la pendiente, uso del suelo, tipo de acuífero, profundidad nivel freático y uso del suelo.

El Departamento de Agua de Sudáfrica ha desarrollado una serie de guías metodológicas que resumen estudios previos y emiten conclusiones respecto los criterios a tener en cuenta y su importancia relativa. En 2007, publicó la Estrategia en Recarga Artificial (Murray *et al.*, 2007), cuyo objetivo es permitir la implantación de esta tecnología, además de presentar siete temas principales: el estado del arte, la legislación, la regulación, el planeamiento o criterios de diseño, la implementación, la gestión y la estrategia de implementación. Como puntos importantes de esta guía, además de la descripción de los criterios, es el análisis de los riesgos relacionados con la colmatación y con la incertidumbre de los parámetros hidráulicos. El informe presentó un *Check-list* y descripción de los diez criterios más importantes para asegurar el éxito de un proyecto de recarga artificial: 1) Necesidad claramente definida, 2) Cantidad y fiabilidad de la fuente de agua, 3) Características hidráulicas del acuífero, 4) Calidad de agua, 5) Dispositivos de recarga artificial e ingeniería, 6) Temas ambientales, 7) Temas legales, 8) Economía, 9) Gestión y capacidad técnica y 10) Disposiciones institucionales.

El departamento hindú *Indian Central Ground Water Board* (CGWB) también ha publicado una Guía de Recarga Artificial (CGWB, 2000) y posteriormente ha elaborado un Plan

Maestro (CGWB, 2002) y un manual de implementación (CGWB, 2007), además de una selección de casos de estudio (CGWB, 2011). Los principales criterios que se consideran en estas Guías son la disponibilidad y características de calidad del agua de recarga y el espacio disponible para la recarga. En India, se cuenta con más de 225.000 estructuras de recarga y 3,7 millones de tanques de agua lluvia (siguiendo una normativa reciente). Respecto a los parámetros hidráulicos, considera que los aspectos principales sobre los que hay que recoger información son los hidrometeorológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, geofísicos y de calidad.

Chowdhury (2010), seleccionó zonas de recarga en India mediante el uso de un SIG. Los parámetros que utiliza son cinco: geomorfología, geología, densidad de drenaje, pendiente del terreno y transmisividad.

El trabajo de Saraf y Choudhury (1998), desarrollado también en India, consideró sólo cuatro parámetros: la geología, la geomorfología, las estructuras lineales y la pendiente,

Rahman (2011), organizó los criterios para evaluar zonas favorables en Portugal según tres categorías: características superficiales, calidad del agua y características del acuífero, siendo esta última la más importante. Dentro de estas categorías consideró el tiempo de residencia, profundidad de la lámina de agua, potencia del acuífero, tasa de infiltración, pendiente, concentración de cloruros y de nitratos.

Finalmente, citar las Guías de Diseño y Operación de Dispositivos publicadas por Australia. Dado que en este país la recarga con agua regenerada es muy habitual, las Guías dan especial énfasis al parámetro de la calidad del agua y no detallan los parámetros de diseño constructivo y generales (NRMMCEPHC-AMHC, 2006; ARMCANZ-ANZECC, 1995; ANZECC-ARMCANZ, 2000). Los principales objetivos del análisis de riesgo son la protección del medioambiente (especialmente en zonas con ecosistemas dependientes) y la salud humana.

2.5.1.2 Metodología usada a nivel internacional para la selección de zonas favorables

El primer paso consistió en realizar una selección de los criterios y subcriterios, es decir, los parámetros y valores condicionantes en relación a la instalación de nuevos dispositivos de recarga. Esta selección se realizó en base a los antecedentes y se aplicó a los tipos principales de dispositivos previamente seleccionados.

Estos criterios son los mismos que se utilizaron en el Sistema de Información Geográfica (SIG) para la elección de emplazamientos y que fueron cartografiados pertinentemente.

A continuación, se estableció la relación jerárquica de los diferentes criterios y subcriterios. El cuarto paso consistió en estandarizar los mapas realizados. Este proceso permitió convertir los valores de cada mapa a una escala común adimensional. En este sentido se propone dar tres categorías a los valores de cada uno de los mapas: muy favorable, moderadamente favorable, no viable. En la mayoría de las referencias consultadas se utilizaron entre 2 y 4 clases (Tabla 2-10), de manera que utilizar tres categorías se considera un valor adecuado.

Tabla 2-10 Criterios y cantidad de clases utilizadas en diferentes referencias.

reference		parameter								
		Alraggad and Jasem, 2010 (Jordan)	Rapp, 2008 (Jordan)	Al-Adamat et al., 2010 (Jordan)	Ghayoumian et al., 2007 (Iran)	Jasrotia et al., 2007 (India)	Kallali et al., 2007 (Tunisia)	Mukhopadhyay and Fadlelmwala, 2010 (Kuwait)	Rahman, 2011 (Portugal)	this study (Jordan)
no of classes for each parameter	slope	2	2	4	4	6	2		L	3
	land use/cover	3	2		2	8			2	3
	geomorphology					8				
	superficial deposits	2	2							3
	soil texture			4		6	2			6
	infiltration rate				4	9			L	
	aquifer type/lithology	2	3			8	2			3
	aquifer thickness								L	3
	aquifer permeability					9				
	aquifer storativity					8				
	aquifer transmissivity					8		2		
	aquifer specific capacity					8				
	depth to water table				4	5	2	3	L	3
	flow gradient							2		3
	residence time								4	
	gw salinity				4		2	2	L	3
	gw contamination								L	3
	rainfall			4						3
	distance from supply	2	2	4			2			3
	distance from faults	2		2						2
distance to urban areas			4			2			2	
distance to roads			4				2		3	
distance to wells			2						3	
distance to int. borders			2						2	
over-lay	qualitative	x	x							
	boolean			x	x	x	x	x	x	x
	weighted			x	x	x			x	x
aspects assessed	aquifer suitability	x	x		x	x		x	x	x
	water harvesting			x		(x)				x
	transfer	inf	inf	no	inf	inf	SAT	inj	SAT	inf
	demand			x			x		x	x
	supply			x			x		x	x

inf: infiltration, SAT: reclaimed wastewater use, inj: injection; L = linear rating

Fuente: Steinel, 2012.

Una vez homogeneizados los valores de cada uno de los criterios el siguiente paso consistió en dar pesos relativos a los criterios y subcriterios. Existen diferentes métodos para considerar todos los parámetros de una manera conjunta. La mayoría se basan en dar pesos a cada uno de los parámetros basados en la opinión de expertos. Estos pesos o factores de ponderación son diferentes para cada uno de los dispositivos de recarga.

Antes de proceder a la estimación de zonas más favorables en base al método de ponderación de criterios, hay que eliminar y excluir aquellas zonas u áreas que por diferentes motivos no permiten la instalación de nuevos dispositivos de recarga:

- Por proximidad a la población o a ecosistemas ambientales.
- Por proximidad a otras instalaciones de recarga.
- Por legislaciones ambientales o de protección de acuíferos.
- Por la tipología del acuífero.
- Por la vulnerabilidad del medio o la profundidad del nivel freático.
- Entre otros.

Finalmente se procede a la identificación de las zonas más favorables teniendo en cuenta estos aspectos indicados (Figura 2-4).

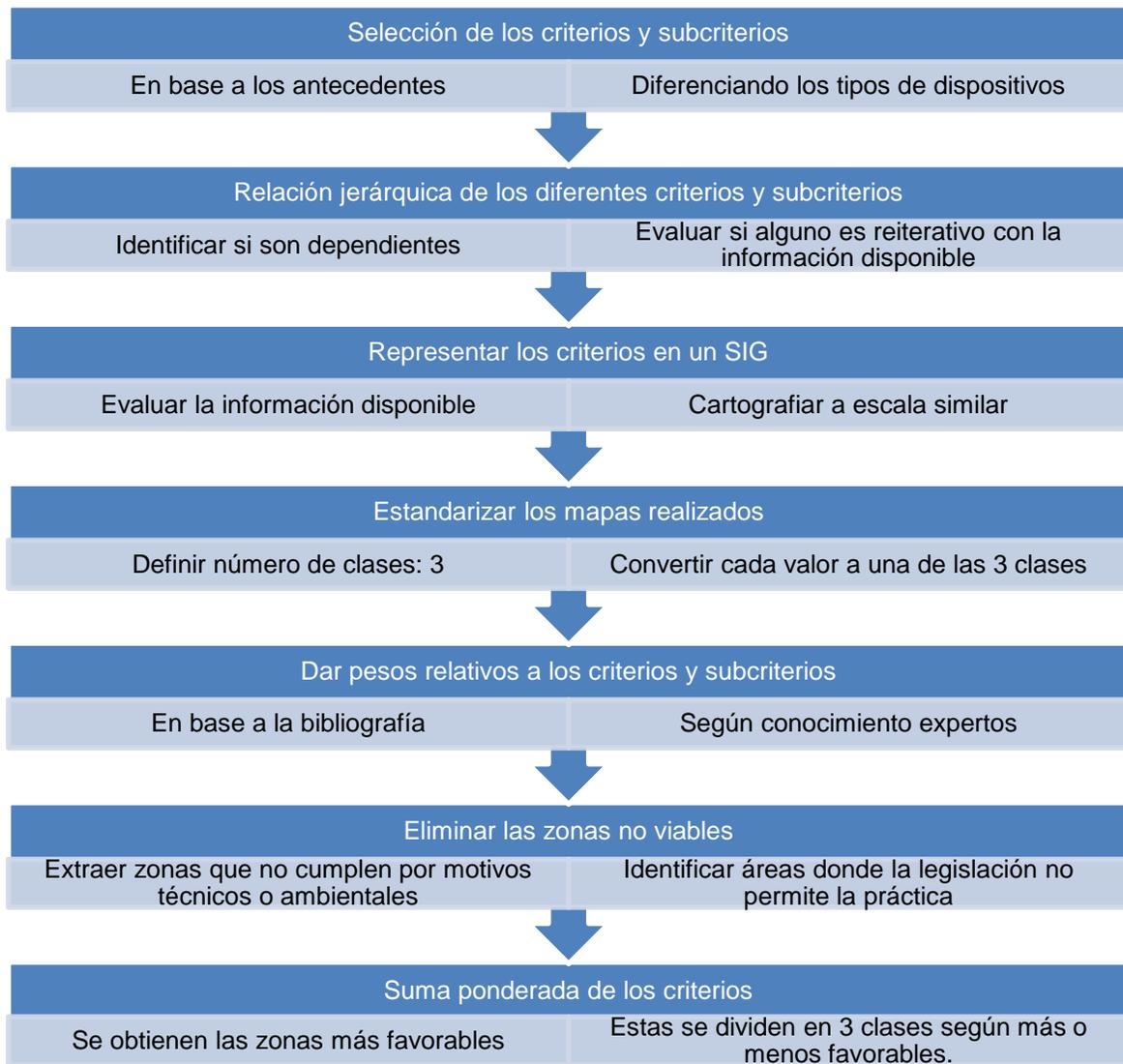


Figura 2-4 Procedimiento para la identificación de zonas favorables.

2.5.1.3 Resumen de los parámetros y/o criterios usados en la bibliografía

A modo de resumen, la lista de parámetros que se tienen en cuenta en la bibliografía es muy variada en cuanto a cantidad de parámetros, tal y como se ha indicado en el apartado 2.5.1.1, si bien hay un cierto número de parámetros que se tienen en cuenta en prácticamente todos los casos, independientemente del tipo de dispositivo. A continuación, se indican los parámetros que se tienen en cuenta en las diferentes referencias bibliográficas indicadas. Esta es la lista de la información que se necesita tanto para delimitar las zonas favorables como para pedir autorizaciones. Se resaltan aquellos parámetros en los que coinciden más artículos y publicaciones y que, por tanto se consideran más relevantes.

CARACTERÍSTICAS DE LA SUPERFICIE

- **Mapa hidrogeológico.**
- Mapa morfológico.
- Mapas de estructuras lineales.
- **Red de drenaje.**
- **Pendiente.**
- **Infiltración.**
- *Densidad de estructuras lineales.*
- Estructuras.
- *Geomorfología fluvial.*
- Textura del suelo.
- **Usos del suelo.**
- *Proximidad de la demanda.*

CARACTERÍSTICAS DEL SUBSUELO

- **Profundidad de la zona no saturada.**
- Infiltración (*infiltration rate*).
- **Transmisividad.**
- Potencia del acuífero.
- *Capacidad de recarga del sondeo.*
- *Rendimiento de los pozos.*

- **Tiempo de tránsito.**
- **Acuífero libre/confinado.**

OTRAS CARACTERÍSTICAS NO SIEMPRE CONSIDERADAS

- Hay pocos estudios que tengan en cuenta la **calidad del agua** para la selección de emplazamientos (pero debería considerarse especialmente para casos de ASR y ASTR).
- **Nitratos y cloruros en el acuífero.**
- Estado ecológico.
- Densidad de carreteras.
- Líneas eléctricas.
- Casos de contaminación declarados.

2.5.1.4 Valores de los criterios considerados en la bibliografía internacional

Para otorgar y denegar permisos se trabaja a dos niveles:

- Hay determinadas condiciones que si no se cumplen, se deniega la autorización (igual que las zonas que se excluyen del mapa).
- Luego se estima un valor que procede de la ponderación de determinados parámetros el cual da un valor orientativo global de la viabilidad del proyecto. Por debajo de un determinado valor se debería denegar la concesión o revisar algunos aspectos.

El proceso de ponderación de criterios normalmente se realiza a través de consulta a expertos. En este caso se parte de la ponderación de datos bibliográficos (Tabla 2-11).

1. Zonas a excluir del mapa y donde denegar autorizaciones
 - a. Usos del suelo. Las zonas comerciales o urbanas no son viables en ningún tipo de dispositivo de recarga.
 - b. Pendiente. Se eliminan las zonas de pendientes elevadas en el caso de dispositivos de infiltración (de más de 5% de pendiente). Las zonas más llanas son las más favorables en los dispositivos de infiltración.

- c. Infiltración. Se prefieren los suelos con mayores tasas de infiltración. Sólo se aceptan áreas con tasas de infiltración >25 cm/d para los dispositivos de infiltración.
 - d. Contaminación de aguas subterráneas (el emplazamiento debe estar a suficiente distancia de zonas con problemas de contaminación. Se considera necesaria una separación de 500 m). Esto debe aplicarse a todos los dispositivos de recarga.
 - e. Tiempo de residencia demasiado cortos.
 - f. Profundidad de la zona no saturada. Poca profundidad no permite la atenuación de contaminantes. Mínimo: 5 metros para recarga con procesos de tratamiento agua-suelo (dispositivos de infiltración). Además debe haber la potencia suficiente para el almacenamiento previsto, que se calculará para cada caso concreto siendo una condición indispensable a cumplir a la que no se le puede dar un valor a priori.
2. Mapa de zonas favorables
- a. Potencia acuífero. Se prefieren los sitios con mayores potencias, ya que la transmisividad y el almacenamiento dependen de ello.
 - b. Transmisividad: zonas favorables cuentan con $T > 100$ m²/d y las menos favorables son menores a 40 m²/d.
 - c. Profundidad de la zona no saturada.
 - d. Tiempo de residencia. Tiene que ser suficiente para permitir la transferencia y recuperación del agua. Se prefieren emplazamientos con tiempos > 6 meses. ASR: Buen acuífero: recuperación del 90% en 180 días o del 75% en 480 días. Una zona poco adecuada es cuando la recuperación a 180 días es de menos del 75%.
 - e. Calidad: Nitratos y cloruros. La calidad del emplazamiento tiene que ser buena para no comprometer el agua que se recarga (excepto si lo que se quiere es mejorar el agua del acuífero). No MCL y bajo TDS (idealmente, menos de 500 mg/l).
 - f. Potencia de los niveles impermeables debajo la superficie (a mayor grosor, mayor coste de excavación. Las menores potencias indicarán las zonas más favorables).
 - g. Pendiente.
 - h. Infiltración.

- i. Proximidad de la demanda y de la fuente de agua: lo ideal es a menos de 1 milla. Es un problema cuando está a más de 2 millas.

Tabla 2-11 Propuesta de valores de los parámetros en base a las referencias bibliográficas para dispositivos superficiales y profundos.

PARÁMETRO	Dispositivos superficiales (procesos de tratamiento suelo-acuífero)		Dispositivos profundos (almacenamiento en el acuífero y posterior extracción)	
	SI	NO	SI	NO
Hidrogeología (Acuífero)	- poroso - karst si la calidad del agua es buena	Baja permeabilidad	Poroso	Porosidad por fracturas
Confinamiento	No confinados	Confinados	No influye	No influye
Pendiente	<5%	>5%	No influye	No influye
Infiltración	> 1 m/d	< 0,5 m/d		Si las velocidades de flujo son elevadas, mejor utilizar ASTR*.
Usos del suelo		Zonas comerciales y urbanas		Zonas comerciales y urbanas
Profundidad de la zona no saturada	> 5 m (si el volumen es suficiente)	< 5 m	> 10 m	< 10 m
Transmisividad	>40 m ² /d	<40 m ² /d	>40 m ² /d	<40 m ² /d
Tiempo de tránsito (depende de la calidad del agua)	>6 meses	< 3 meses	< 6 meses (para ASTR es al revés*)	> 6 meses

PARÁMETRO	Dispositivos superficiales (procesos de tratamiento suelo-acuífero)		Dispositivos profundos (almacenamiento en el acuífero y posterior extracción)	
	SI	NO	SI	NO
Calidad del agua de recarga	Bajo TSS	Alto TSS	< 10 mg/l TSS	
Calidad del agua nativa	Nitratos y cloruros < límite de consumo humano	Nitratos y cloruros > límite de consumo humano	Nitratos y cloruros < límite de consumo humano	Nitratos y cloruros > límite de consumo humano
Distancia de seguridad (focos contaminación)	>3 km	<3 km	>3 km	<3 km

*Nota: Si se requiere atenuación de contaminantes o si es una zona con velocidades de flujo elevadas es mejor utilizar dispositivos profundos donde la extracción se realice en un pozo diferente al de la inyección (*ASTR: aquifer storage transport and recovery*, en sus siglas en inglés).

2.5.1.5 Análisis y síntesis de los parámetros y/o criterios para la selección de cuencas o acuíferos potenciales para implementar proyectos de recarga artificial en Chile

La revisión de la experiencia internacional y los estudios llevados a cabo en Chile, además considerando las características climáticas y disponibilidad de recursos, se pone de manifiesto que los métodos o tipos dispositivos de recarga que serán de más fácil implementación en el país serán:

- La instalación de dispositivos superficiales de infiltración dentro de cauce como:
 - Barreras, diques de retención y represas para aguas de crecidas o aluviones.
 - Escarificación de cauces.
- La implantación de dispositivos superficiales de infiltración fuera del cauce como:
 - Canales, acequias o zanjas de infiltración de aguas de escorrentía aguas abajo.
 - Balsas de infiltración (en acuíferos con porosidad primaria).

- La construcción de dispositivos profundos de recarga:
 - Los pozos de inyección (en acuíferos con porosidad secundaria y confinados) bien sea con recuperación del agua en el mismo pozo o en otro.
 - Pozos con galerías.

Además, en Chile la **precipitación** presenta una gran variabilidad tanto espacial como temporal, distinguiéndose tres tipos de regímenes: el primero de ellos se presenta a partir de los 26° hacia el sur, de origen frontal; el segundo ubicado en el altiplano chileno, de origen convectivo, entre los 18° y 24°S, y finalmente el menos importante por la cantidad de agua que precipita es el ubicado en la costa norte del país, asociado al Anticiclón del Pacífico Sur (Dirección Meteorológica de Chile, 2011). Por lo tanto, el régimen de precipitaciones en ocasiones presenta **fenómenos hidrometeorológicos extremos**, provocando grandes flujos desde los sectores altos hacia los sectores bajos, lo que se refleja en el aumento de los caudales y, con ello, en la generación de inundaciones y grandes aluviones en la zona norte del país. Por esta razón, se considera que los métodos de retención, almacenamiento e infiltración de recursos en épocas excedentarias (tormentas/crecidas) serían una opción muy viable especialmente en la zona Norte del país.

Asimismo, el hecho que **las mayores demandas se concentren en las áreas con baja disponibilidad de recursos**, se plantea la posibilidad de utilizar nuevas fuentes alternativas de agua como la recolección de aguas pluviales o la infiltración de aguas residuales tratadas o regeneradas. Esto supondría un aumento de recursos para satisfacer la demanda y liberar recursos subterráneos.

En Chile, el objetivo principal de la recarga es el aumento de recursos hídricos para satisfacer las demandas más que el tratamiento de la calidad de los mismos. De todas maneras, en las zonas costeras con problemas de sobreexplotación la recarga artificial puede plantearse como una técnica con fines ambientales para frenar los procesos de salinización del acuífero.

Una vez identificados los dispositivos más viables, en función a la bibliografía, es importante identificar cuáles serán las zonas más favorables para implementar estos tipos de dispositivos.

La revisión bibliográfica ha puesto de manifiesto la gran variedad de criterios que se utilizan para la selección de emplazamientos mediante diferentes métodos más o menos automatizados mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Basado en el análisis anterior, se proponen once criterios más importantes para la selección de potenciales cuencas, subcuencas y/o acuíferos para la recarga artificial en Chile:

1. Mapa hidrogeológico.
2. Características de la red de drenaje.
3. Pendiente.
4. Infiltración.
5. Usos del suelo.
6. Profundidad de la zona no saturada.
7. Transmisividad.
8. Tiempo de tránsito.
9. Acuífero libre/confinado.
10. Nitratos y cloruros en el acuífero.
11. Marco legislativo.

Dado que, la información de estos parámetros no está actualmente disponible para todo Chile, sino que serán datos que deberán recogerse en los estudios de detalle de cada zona. A continuación, se sintetiza como cada uno de estos aspectos condiciona el tipo de dispositivo. En el apartado 2.5.1.4 se dan valores a estos criterios y en el análisis legal se detalla su papel en la viabilidad del sistema:

- **Mapa hidrogeológico:** el mapa hidrogeológico indica la tipología de acuíferos. Las balsas de recarga podrán construirse en las zonas con acuíferos aluviales superficiales y con napa freática a suficiente profundidad para permitir la recarga. En las zonas con acuíferos profundos o karstificados los métodos más idóneos serán los de inyección mediante pozos.
- **Características de la red de drenaje:** el tipo de río, su funcionamiento estacional y caudal determina si es viable aplicar métodos de derivación del agua del río, de retención, de escarificación, entre otros. Se requieren ríos que en determinadas épocas presenten excedentes que se puedan recargar o liberar en el

cauce de manera controlada (por ejemplo, los ríos Tarapacá, Camiña, Aroma, Quipisca y Chacarilla del Norte Grande), así como ríos con comportamiento influyente si se quieren utilizar para recarga controlada del caudal.

- **Pendiente:** la pendiente de la superficie es un factor muy importante en el caso de implementar balsas o canales de infiltración (en pendientes más elevadas de 0,5% no podrán construirse). En cambio, es un parámetro poco relevante para los pozos de inyección).
- **Infiltración:** la capacidad de infiltración del suelo es muy importante para poder verificar la viabilidad de los dispositivos de infiltración como balsas o zanjas y para dimensionar estos dispositivos.
- **Usos del suelo:** la recarga artificial no es compatible con determinados usos del suelo, especialmente para el caso de los dispositivos de infiltración que requieren más espacio. Por ejemplo, las zonas más pobladas, urbanas o industriales se desaconsejan para la instalación de dispositivos de recarga.
- **Profundidad de la zona no saturada:** el nivel freático debe estar a una profundidad suficiente que permita la recarga de un determinado volumen de agua. Se aconsejan profundidades superiores a 5 m para todos los tipos de dispositivos de recarga. Esta profundidad también está relacionada con los tiempos de tránsito.
- **Transmisividad.** Se recomienda valores de transmisividad por sobre los 100 m²/d.
- **Tiempo de tránsito.** Este parámetro es relevante para el caso de dispositivos de infiltración donde uno de los objetivos sea la mejora de la calidad del agua o donde se recargue agua residual regenerada. Los tiempos de tránsito a través de la zona no saturada o del acuífero deben ser tales que permitan la degradación y/o atenuación de los contaminantes. Se debe evaluar caso a caso.
- **Tipo de acuífero (libre/confinado).** Esta característica es importante para determinar el tipo de dispositivo. Los métodos de infiltración (mediante pozos someros, balsas de infiltración, zanjas, canales, entre otros) sólo pueden desarrollarse en acuíferos libres, y por lo tanto no será posible construirlo en un acuífero confinado. De esta manera, en las zonas con presencia de niveles confinantes, deberá optarse por métodos de inyección mediante pozos.
- **Nitratos y cloruros en el acuífero.** Normalmente no se recomienda recargar agua de buena calidad en zonas afectadas por problemas de contaminación de

nitratos o cloruros excepto cuando el objetivo es mejorar la calidad del agua del acuífero.

- **Marco legislativo.** En el ámbito chileno la recarga artificial está regulada por un marco legislativo enfocado a las obras de recarga y a los derechos constituidos sobre el agua. Considerar lo estipulado por las normativas en temas relacionados a la recarga artificial, Derechos de aprovechamiento de agua superficial y subterráneo, Normativas ambientales y de calidad de agua, Decretos Supremos, Vulnerabilidad de acuíferos, entre otros.

Además de los once criterios anteriormente analizados, debe considerarse la existencia de una demanda de agua no suplida con los recursos existentes y si existe agua disponible en las inmediaciones de la recarga, tal y como se ha puesto de manifiesto en la revisión de experiencias internacionales.

Actualmente, no existe información a nivel nacional de todos los criterios previamente analizados. De esta manera, para la selección de potenciales cuencas, subcuencas y/o acuíferos para la recarga artificial, se propone considerar los criterios a dos niveles de manera similar a como se hace en otros países. El primer nivel de trabajo se empezaría con aquellos criterios de los cuales se dispone información y el segundo nivel sería adquirir información del resto de parámetros para llegar a un mejor detalle en la selección de las zonas.

2.5.1.6 Ponderación y representación de parámetros en Chile

La ponderación de parámetros debe basarse en la selección de los parámetros más influyentes y de los que se disponga información. Esta ponderación será diferente según el tipo de dispositivo de recarga a evaluar.

En base a la información disponible, se propone trabajar en Chile en dos escalas de trabajo:

1. Identificar a escala nacional aquellas zonas donde exista un demanda de agua no suplida y que disponga de agua disponible para la recarga.
2. Identificar a escala de cuenca aquellas zonas más favorables a la recarga artificial en función de criterios superficiales y subterráneos. Este segundo nivel de trabajo

sólo se aplicará a aquellas cuencas donde el primer análisis haya mostrado que la recarga es viable.

La Tabla 2-12 indica los parámetros que se utilizarán a cada una de las dos escalas de trabajo para identificar las zonas más viables mediante el SIG. El resto de parámetros que también son importantes (por ejemplo, la profundidad de la zona saturada), se incluirán en la información a tener en cuenta para evaluar la factibilidad de un proyecto de recarga según las guías metodológicas, pero no se cartografiarán en el SIG.

Tabla 2-12 Parámetros que se tendrán en cuenta a cada escala de trabajo para cada tipo de dispositivo.

Escala de trabajo	Parámetros para la selección de zonas	Tipo de dispositivo de recarga a evaluar
Nacional	Demanda de agua Ríos y agua superficial	Dispositivos superficiales dentro del cauce (Barreras o diques y represas en ríos; escarificación de lechos; e infiltración a través del banco del río)
Cuenca	Geología/hidrogeología/Permeabilidad Grado de confinamiento Pendiente del terreno Usos del suelo	Dispositivos superficiales fuera del cauce (Balsas de infiltración y zanjas y canales) y dispositivos profundos (Pozos de inyección).

A escala de cuenca los cuatro parámetros que se considerarán con el Sistema de Información Geográfica (SIG) serán:

- La permeabilidad del acuífero (que puede estimarse de manera relativa a través de un mapa geológico) según valores de Alta, Moderada y Baja.
- La pendiente del terreno según Alta, Moderada o Baja. En los casos de Alta o Moderada no será viable la instalación de balsas de infiltración.
- Usos del suelo: se excluirán las zonas urbanas, determinadas zonas agrícolas y de restricción.

Respecto a los valores de ponderación, a continuación se sintetizan algunos valores recomendados por la bibliografía:

- Rahman (2011), considera tres variables principales: las características superficiales, las características del acuífero y la calidad del agua. Les da un peso a cada una de 0,4; 0,5 y 0,1 respectivamente.
 - o Dentro de la variable más relevante que es el acuífero consideran que lo más importante es el tiempo de residencia (peso total de 0,25), después la profundidad de la lámina de agua (0,2) y finalmente la potencia del acuífero (0,05 sobre 1).
 - o En las características superficiales dan un peso total de 0,3 a la tasa de infiltración y un 0,1 a la pendiente.
 - o Respecto la calidad del agua, atribuyen por igual un peso de 0,05 a la concentración de cloruros y de nitratos.
- Chowdhury (2010), considera cinco variables como las más relevantes para la recarga artificial en una zona de India. Algunos de los datos son obtenidos mediante teledetección. El parámetro al que da más importancia es la Geomorfología con un peso de 5 (diferencia llanuras de inundación, sedimentos de valle, suelos lateríticos, rocas y otros). Tanto a la geología como a la densidad del drenaje les asigna un peso de 4. A la pendiente del terreno le atribuye un peso de 3,5 y a la transmisividad del acuífero de 3. Al final clasifica los resultados según tres categorías: zonas muy adecuadas, zonas adecuadas y zonas no recomendables.
- El estudio de Steinel (2012), también obtiene un mapa con tres categorías de viabilidad (viable, poco viable y no viable) más una cuarta categoría de área restringida. Este estudio utiliza seis criterios. El peso más elevado lo da a la precipitación con un valor de 5. A la pendiente le da un peso de 4. La existencia de infraestructuras hidráulicas (como presas) las pondera con un valor de 3 y el tipo de suelo con un 2. Finalmente, atribuye un peso de 1 a la hidrogeología y el uso del suelo. Cabe mencionar que este estudio se focaliza en la reutilización de agua de crecida y por lo tanto la precipitación es un parámetro muy importante.
- Chenini *et al.* (2009) utilizan un SIG para identificar las zonas más favorables en Túnez. Este trabajo utiliza ocho criterios: límite de zona, red de drenaje, litología, fracturas, estructuras lineales, permeabilidad y piezometría. El objetivo es

identificar zonas en los ríos donde instalar infraestructuras para la retención de agua y su recarga. Puesto que enfoca la cartografía y evaluación de los parámetros a la recarga en ríos no realiza una ponderación de los diferentes parámetros y todos pueden presentar un valor máximo sobre el total del mismo orden.

- El estudio del proyecto DINA-MAR es el único estudio identificado que tiene en cuenta el tipo de dispositivo en la ponderación de criterios para identificar las zonas más favorables. Tiene en cuenta 82 capas temáticas de información. De todos los criterios, los que considera más importantes para los dispositivos de infiltración e inyección son:
 - o Recarga por infiltración: el mayor peso lo atribuye al origen del agua y la probabilidad de inundaciones, después al uso del suelo, a continuación a la permeabilidad y la distancia al río. A niveles inferiores de importancia considera la precipitación, la piezometría y la calidad del agua.
 - o Recarga por inyección en pozos. En este caso, el parámetro más importante es la calidad del agua, y a continuación los usos del suelo (Agrario), la geología, la distancia a los ríos, la piezometría profunda y el riesgo de inundación. Son de menor importancia la precipitación y la permeabilidad. No considera la piezometría superficial.
- El trabajo de Saraf y Choudhury, en India (1998), utiliza información geográfica procedente de cartografías existentes y de teledetección. En este caso, se seleccionan áreas favorables sobre una geología predominante de rocas de baja permeabilidad donde se puede realizar la recarga mediante balsas de infiltración. Utiliza únicamente 4 parámetros: la geología, la geomorfología, la presencia de estructuras lineales y la pendiente. El máximo valor de ponderación lo da a la geomorfología puesto que el objetivo principal son las colinas residuales de material más permeable y las zonas de mayor pendiente por ser las que también indican este material. La geología es poco variable en esa zona y por lo tanto tiene poca importancia en la selección de emplazamientos.

En base a la bibliografía consultada se concluye que la selección de criterios y su ponderación depende tanto de la zona a aplicarlo como del dispositivo. Por ejemplo, en Jordania dan mucho peso a la precipitación porque se trata de una zona árida donde el objetivo es recargar aguas de precipitación. En España, el objetivo es recargar el agua del

río mediante balsas o zanjas y por lo tanto la selección de emplazamientos se centra al entorno de los ríos. En India, donde la geología es poco variable dan más importancia a la geomorfología.

Como consecuencia, la ponderación de criterios se realizará en base a los dispositivos, a la información disponible y a las características del país.

2.5.2 Cuencas y/o acuíferos con condiciones potenciales para la recarga artificial en Chile

2.5.2.1 Cuencas identificadas por medio de las referencias

En la Tabla 2-13 y Figura 2-5 se presentan las cuencas y subcuencas de Chile que según la literatura analizada son potenciales para realizar proyectos de recarga artificial de acuíferos. Cabe indicar que según los criterios propuestos anteriormente, existen más zonas donde es factible realizar obras de recarga artificial.

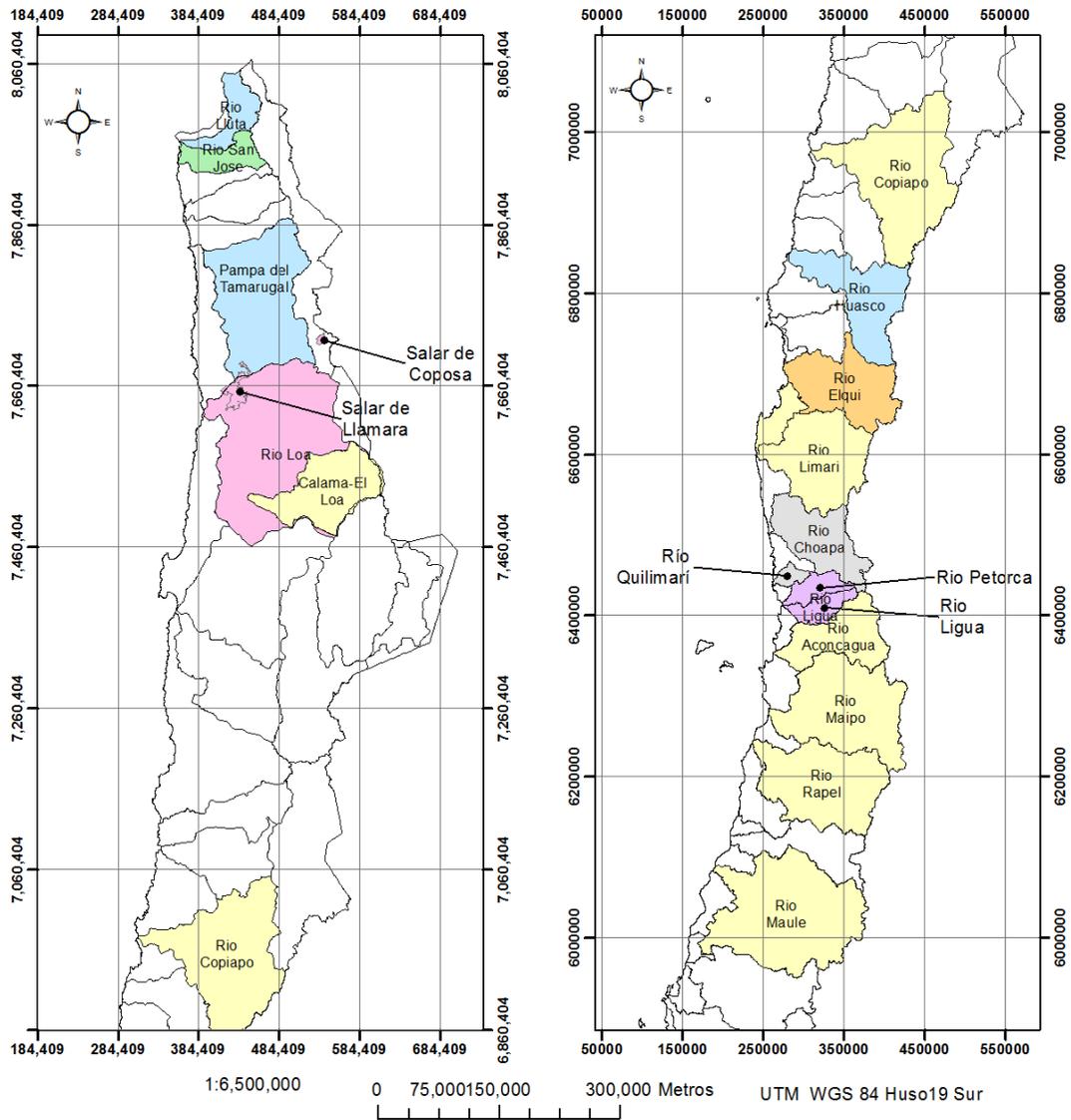
Tabla 2-13 Cuencas estudiadas como potenciales para la recarga artificial en Chile.

N°	Cuenca	N° de Región	Nombre Región	Tipo de técnica usada*	Fuente
1	Río Lluta	XV	Arica y Parinacota	Recarga natural – no aplica	CNR y GCF Ingenieros, 2013a; Cabrera, 2014
2	Río Azapa (cuenca del río San José)	XV	Arica y Parinacota	Lagunas de infiltración y Muros de retención en cauce	CNR y GCF Ingenieros, 2013a; Cabrera, 2014
3	Río Copiapó	III	Atacama	Lagunas de infiltración y pozos de inyección	CNR, Jorquera y Asociados, 2012; CNR y GCF Ingenieros, 2013a; Cabrera, 2014
4	Río Huasco	III	Atacama	Recarga natural – no aplica	CNR y GCF Ingenieros, 2013a; Cabrera, 2014
5	Río Elqui	IV	Coquimbo	Pozos de infiltración	CNR y GCF Ingenieros, 2013a; Cabrera, 2014
6	Pan de Azúcar	IV	Coquimbo	Lagunas de infiltración y pozos de inyección	CNR y GCF Ingenieros, 2013a; Cabrera, 2014
7	Río Quilimarí	IV	Coquimbo	Lagunas y Zanjas de infiltración	DGA y AC Ingenieros Consultores, 2012; CNR y GCF Ingenieros, 2013a; Cabrera, 2014
8	Río Choapa	IV	Coquimbo	Lagunas y Zanjas de infiltración	DGA y AC Ingenieros Consultores, 2012; CNR y GCF Ingenieros, 2013a;

N°	Cuenca	N° de Región	Nombre Región	Tipo de técnica usada*	Fuente
					Cabrera, 2014
9	Río Ligua	V	Valparaíso	Lagunas de Infiltración	CNR y GCF Ingenieros, 2013a; CNR y Aqualogy, 2013b; Cabrera, 2014
10	Río Petorca	V	Valparaíso	Lagunas de Infiltración	CNR y GCF Ingenieros, 2013a; CNR y Aqualogy, 2013b; Cabrera, 2014
11	Río Aconcagua	V	Valparaíso	Lagunas de infiltración y pozos de inyección	DOH y Brown, 2012; DOH y GeoHidrología Consultores, 2012; CNR, 2013; Cabrera, 2014
12	Río Maipo	XIII	Metropolitana	Lagunas de infiltración y pozos de inyección	MOP, 1975; Fuentes, 2013; CNR, 2013; Cabrera, 2014
13	Río Rapel	VI	Libertador General B. O'Higgins	Lagunas de infiltración y pozos de inyección	CNR y GCF Ingenieros, 2013a; Cabrera, 2014
14	Río Maule	VII	Maule	Lagunas de infiltración y pozos de inyección	CNR y GCF Ingenieros, 2013a; Cabrera, 2014
15	Puquios del Salar de Llamara	I	Tarapacá	Pozos de inyección	SQM y Prammar Ambiental, 2010.
16	Vertientes Jachucoposa y Michincha (Salares de Coposa y Michincha)	I	Tarapacá	Pozos de inyección	Pérez, 2006; CMDIC y GP Consultores, 2003
17	Pampa del Tamarugal	I	Tarapacá	Recarga natural – no aplica	CNR y GCF Ingenieros, 2013a; Cabrera, 2014
18	Río Loa	II	Antofagasta	Pozos de inyección	CNR y GCF Ingenieros, 2013a; Cabrera, 2014
19	Acuífero de Calama	II	Antofagasta	Lagunas de infiltración y recarga inducida	CMXLB y DIC-UChile, 2007
20	Acuífero Quebrada Los Chorros	IV	Coquimbo	Pozos de Infiltración	Andes Iron y GCF Ingenieros, 2013
21	Cuencas de Piedra Pómez y río Llamas	III	Atacama	Lagunas de Infiltración	CMC y WHM, 2011

*El color verde indica que la técnica no tiene un caso práctico.

Fuente: Modificado de CNR y GCF Ingenieros, 2013a.



Leyenda

- | | | |
|---|--|---|
|  Lagunas de infiltración |  Lagunas de infiltración y pozos de inyección |  Pozos de infiltración |
|  Lagunas de infiltración y Muros de retención de cauce |  Lagunas y zanjas de infiltración |  Pozos de inyección |
| | |  Recarga Natural |

Figura 2-5 Cuencas estudiadas como potenciales para la recarga artificial en Chile.

2.5.2.2 Proyecto SIG

Mediante el proyecto SIG y en función de los criterios señalados anteriormente en el apartado 2.5.1.6, se realiza una propuesta de nuevas zonas potenciales para realizar obras de recarga artificial de acuíferos en Chile.

El Sistema de Información Geográfico (SIG) se ha dividido en tres etapas, las cuales se describen a continuación:

- 1) Recopilación de Antecedentes.
- 2) Generación de nuevas coberturas mediante análisis espacial.
- 3) Evaluación Multicriterio y Mapeo de resultados.

2.5.2.2.1 Recopilación de antecedentes

En esta etapa se ha realizado la recopilación de antecedentes, relacionados a las variables que intervienen de forma favorable o limitante sobre las condiciones potenciales, para la instalación de obras o dispositivos de recarga artificial. La Figura 2-6 muestra esquemáticamente una representación de las diferentes capas de información con las que trabajan los Sistemas de Información Geográficos.

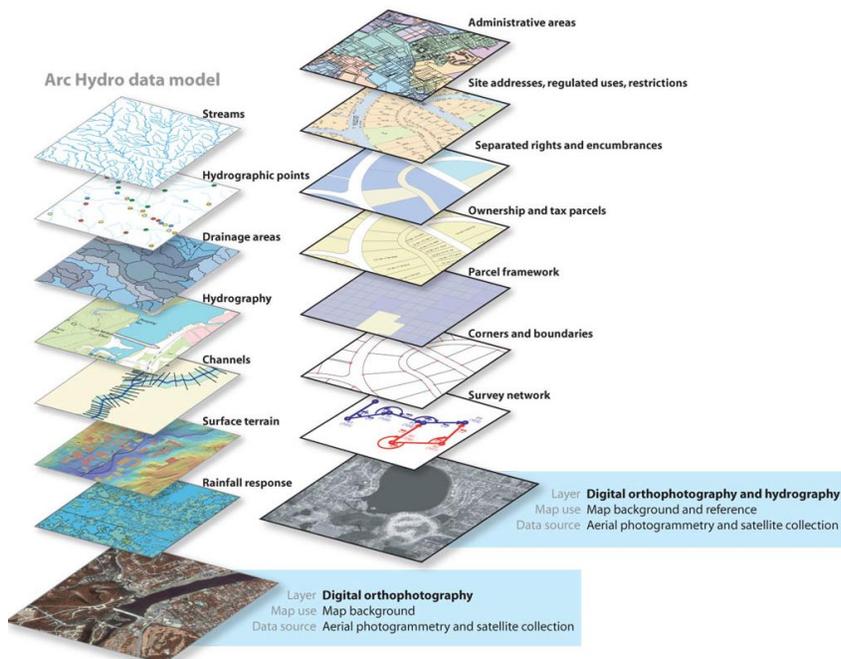


Figura 2-6 Esquema de información SIG.

La Tabla 2-14 muestra el listado general de coberturas recopiladas para el proyecto SIG, donde se menciona la extensión geográfica que posee cada una de ellas, junto con la institución que genera o administra la información de estas.

Tabla 2-14 Listado de coberturas SIG recopiladas.

Capas de Información	Extensión geográfica	Tipo de capa	Institución Generadora
Acuíferos DARH	Nacional	Polígonos	DGA
Acuíferos estudiados Marzo 2014	Nacional	Polígonos	DGA
Acuíferos protegidos 2010	I- II- XV	Polígonos	DGA
Áreas de Restricción Zonas de prohibición feb 2014	Nacional	Polígonos	DGA
Caminos	Nacional	Líneas	IGM
Catastro de Lagos	Nacional	Polígonos	DGA
Ciudades	Nacional	Polígonos	IGM
Comunas (límites)	Nacional	Polígonos	IGM
Cuencas	Nacional	Polígonos	DGA
Cuencas Altiplánicas	Nacional	Polígonos	DGA
Cuerpos de Agua	Nacional	Polígonos	IGM
Curvas de nivel	Nacional	Líneas	IGM
Declaración de Agotamiento	Nacional	Polígonos	DGA
Erodabilidad	Nacional	Polígonos	S/I
Erosividad	Nacional	Polígonos	S/I
escorrentía	Nacional	Líneas	DGA
Evaporación en tanque	Nacional	Líneas	DGA
Evaporación Real	Nacional	Líneas	DGA
Evaporación Real Zona de Riego	V-VI-VII-VIII	Polígonos	DGA
Hidrografía	Nacional		IGM
Inventario de Humedales 2012	XV- VIII	Polígonos	S/I
Inventario de Lagos y Glaciares	Nacional	Polígonos	DGA
Isotermas	Nacional	Líneas	DGA
Isoyetas	Nacional	Líneas	DGA
Límites Administrativos	Nacional	Líneas	IGM
Mapa geológico 1:1.000.000	Nacional	Polígonos-puntos - líneas	SERNAGEOMIN
Mapa hidrogeológico 1:1.000.000	Nacional	Polígonos-puntos - líneas	SERNAGEOMIN
Modelo Digital de elevaciones	Nacional	Raster	GDEM - NASA
Poblados	Nacional	Puntos	IGM
Porcentaje Pendiente	Nacional	Raster	Elab Propia
Red Hidrométrica (ubicaciones)	Nacional	Puntos	DGA
Región(límites)	Nacional	Polígonos	IGM
Reserva de caudales ambientales 2010	X-XI	Polígonos	DGA
Reserva de la biosfera	Nacional	Polígonos	IABIN
Salares	Nacional	polígonos	S/I
Sitios Ramsar	Nacional (12ptos)	Puntos	S/I
SNASPE 2012	Nacional	Polígonos	CONAF- CIREN
subcuencas	Nacional	Polígonos	DGA
SubSubcuencas	Nacional	Polígonos	DGA
Toponimia	Nacional		IGM
Uso de Suelo	Nacional	Polígonos	CONAF- CIREN
Vegas Protegidas	I- II- XV	Puntos	DGA

2.5.2.2.1.1 Generación de nuevas coberturas mediante análisis espacial

En base a la información recopilada y los criterios de interés, se han espacializado las variables cuya variación en el medio afecte la potencialidad de establecer obras de recarga artificial. Generando coberturas continuas (raster o polígonos) donde se registre su variación espacial y/o temporal si así se requiere.

Se han empleado las herramientas SIG: análisis de proximidad, sobreposición, interpolación geoestadística, entre otras (cuando así se requiera), como una estimación indirecta del comportamiento y/o parámetros de interés que han contribuido en el desarrollo del objetivo de este estudio.

2.5.2.2.1.2 Evaluación Multicriterio y Mapeo de resultados

En el análisis multicriterio se ha considerado la generación de coberturas temáticas a partir de la categorización de estas. Por lo tanto, se han establecido rangos de valores favorables: medios, bajos, nulos o limitantes, en función del efecto generado por la variable al indicador final.

Posteriormente, estas categorías han sido ponderadas por el grado de importancia respecto del total de variables.

La definición de los límites de cada categoría, al igual de los pesos de cada variable, son resultado del análisis técnico validado en los diferentes talleres de trabajo del proyecto. La siguiente ecuación y Figura 2-7 representan la ecuación general que define el índice multicriterio y un esquema de ejemplo de cómo son organizadas las variables y los criterios en la construcción del índice respectivamente.

$$C_j = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{v_{ij} P_{ij}}{r_j} * 100$$

Donde, C_j = puntaje del criterio j .

v_{ij} = variable i del criterio j .

p_{ij} = peso o importancia de la variable i en el criterio j (entre 0 y 1; $\sum p_i = 1$).

r_j = rango de medición de las variables que componen el criterio j .

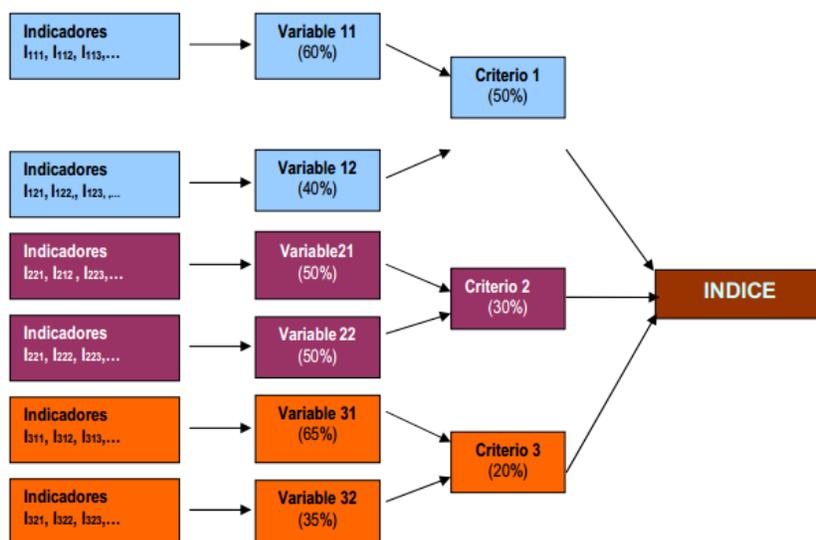


Figura 2-7 Esquema ejemplo de generación de índice multicriterio.

Finalmente, el índice final y cada uno de los criterios espacializados participantes en el análisis han sido cartografiados a una escala adecuada. La información se presenta en formato digital PDF y Geodatabase o Shape en el Anexo Digital "Proyecto SIG".

2.5.2.2.2 Nuevas cuencas y/o acuíferos con condiciones potenciales para la recarga artificial

A partir de la información disponible y los criterios anteriormente mencionados en el apartado 2.5.1.6, se ha realizado la generación de un índice de carácter tentativo, el cual permite jerarquizar las cuencas de Chile en función de la presencia de condiciones favorables para la recarga artificial.

Las variables consideradas en el análisis fueron:

- Permeabilidad.
- Uso de suelo.
- Pendiente.
- Presencia de cause de Rio.

Dada la existencia de información disponible a nivel nacional:

La permeabilidad fue considerada a nivel nacional a partir del Mapa Hidrogeológico de Chile escala 1:1.000.000, considerando como áreas favorables las zonas identificadas como primaria en formación porosa.

En el caso del Uso de suelos, la cobertura empleada fue el Catastro de Uso de Suelo CIREN/CONAF, donde las áreas favorables fueron las remanentes tras descartar las áreas presentes en el SNASPE, áreas urbanas, áreas agrícolas, bosques, glaciares y cuerpos de agua.

Las pendientes fueron calculadas en porcentaje para todo el territorio nacional, a partir de datos GDEM de 32 metros de resolución, fueron clasificadas en rangos de 0 -5% (límite en obras de infiltración), 5-50%(obras de inyección) y mayores a 50%. Sin perjuicio de esto se consideró como valor favorable en el cálculo del índice solo el primer rango.

Otro factor considerado en el cálculo preliminar de este índice, fue la presencia o ausencia de cauces al interior de cada cuenca. Considerando que la presencia de un cauce otorga una condición general favorable sobre las cuencas que no cumplen con este requisito. Sin embargo, la presencia de un cauce en la cuenca, no garantiza la existencia física del recurso, ni la disponibilidad legal de este. Por otro lado, la distancia limitante a los cauces puede ser mayormente considerada un efecto económico a considerar.

A continuación se presenta el índice multicriterio propuesto:

$$indice = \frac{AP * 200 + AFR * 200 + PR * 50}{450}$$

Dónde:

AP= Acuífero en problemas, se consideran acuíferos declarados en agotamiento, en restricción y/o protección.

AFR= Área favorable de la cuenta en relación a la máxima área favorable presente en las cuencas estudiadas (valores de 0 a 1).

PR= Presencia de cauces al interior de la cuenca.

Los resultados de este índice se aprecian en la Tabla 2-15 y espacialmente las zonas favorables en la Figura 2-8 (las coberturas utilizadas, tablas y productos intermedios se adjuntan en el Anexo Digital "Proyecto SIG").

Tabla 2-15 Cuencas Potenciales de Recarga Artificial.

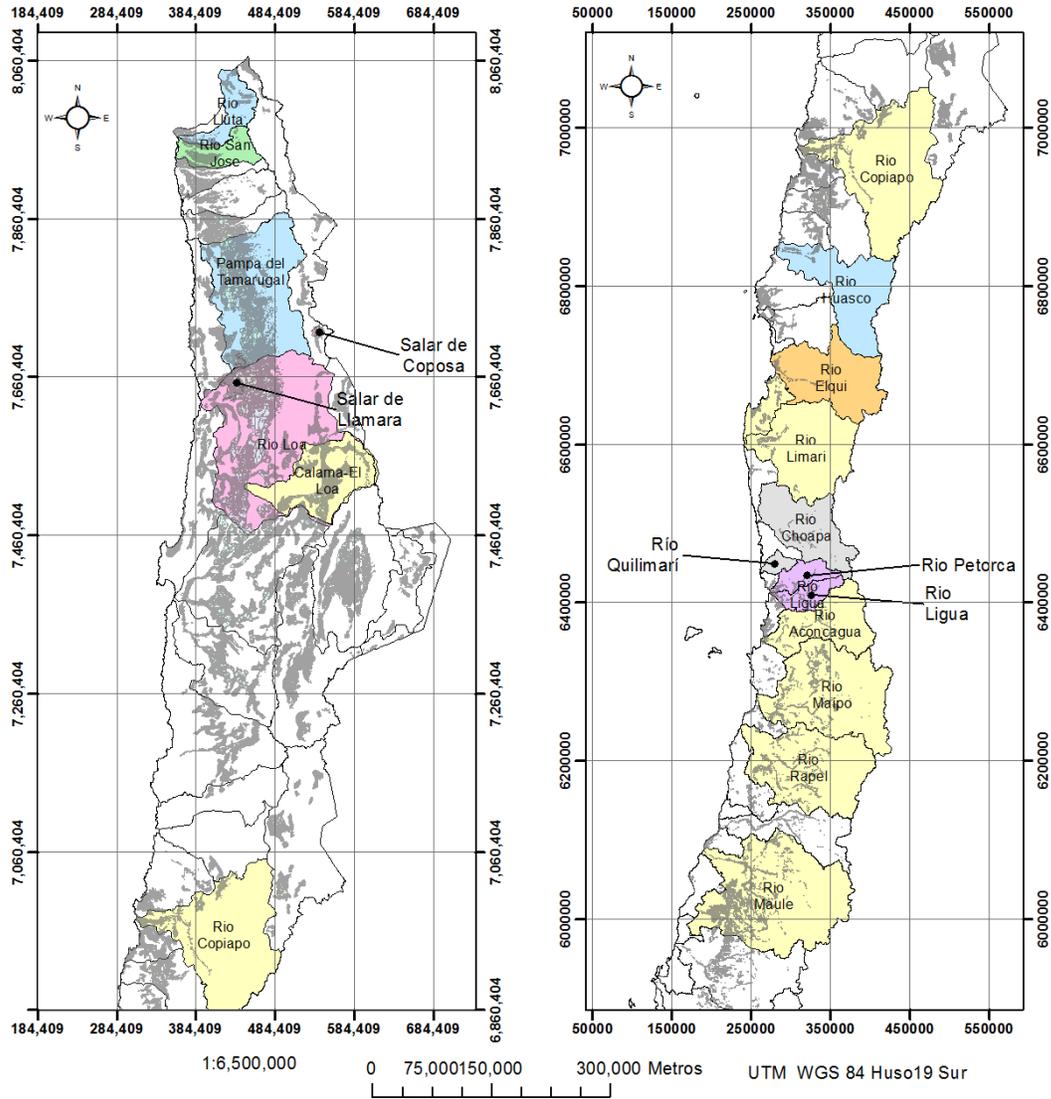
Cuenca	Nombre	Área Total Km ²	Área Total Favorable km ²	F/T	Cauce	Acuífero Agotamiento/ Restricción /protección	Índice	Ranking
21	Rio Loa	32.969,0	9.981,4	30,28	1	1	1,00	1
17	Pampa del Tamarugal	17.352,8	5.011,6	28,88	1	1	0,78	2
27	Quebrada Caracoles	18.294,7	5.865,6	32,06	0	1	0,71	3
25	Salar de Atacama	15.466,7	2.759,9	17,84	1	1	0,68	4
26	Endorreicas Salar Atacama-Vertiente Pacifico	14.291,5	2.179,7	15,25	1	1	0,65	5
30	Endorreicas entre Frontera y Vertiente del Pacifico	15.219,8	1.019,5	6,70	1	1	0,60	6
10	Altiplánicas	10.948,1	690,3	6,31	1	1	0,59	7
34	Rio Copiapó	18.646,3	374,3	2,01	1	1	0,57	8
13	Rio San José	3.191,9	373,2	11,69	1	1	0,57	9
57	Rio Maipo	15.100,4	336,6	2,23	1	1	0,57	10
60	Rio Rapel	13.652,7	282,9	2,07	1	1	0,57	11
12	Rio Lluta	3.427,5	143,2	4,18	1	1	0,56	12
44	Costeras entre Elqui y Limari	2.267,7	105,6	4,66	1	1	0,56	13
38	Rio Huasco	9.683,2	96,5	1,00	1	1	0,56	14
23	Fronterizas Salares Atacama-Socompa	3.808,3	90,6	2,38	1	1	0,56	15
61	Costeras Rapel-E.Nilahue	3.363,5	67,5	2,01	1	1	0,56	16
54	Rio Aconcagua	7.210,7	66,9	0,93	1	1	0,56	17
53	Costeras Ligua-Aconcagua	840,6	65,5	7,80	1	1	0,56	18
45	Rio Limari	11.607,7	64,1	0,55	1	1	0,56	19
58	Costeras entre Maipo y Rapel	1.062,8	47,5	4,47	1	1	0,56	20
52	Rio Ligua	1.979,7	37,5	1,90	1	1	0,56	21
43	Rio Elqui	9.740,2	36,8	0,38	1	1	0,56	22

Cuenca	Nombre	Área Total Km ²	Área Total Favorable km ²	F/T	Cauce	Acuífero Agotamiento/ Restricción /protección	Índice	Ranking
51	Rio Petorca	1.980,3	21,5	1,09	1	1	0,56	23
47	Rio Choapa	7.509,8	17,8	0,24	1	1	0,56	24
55	Costeras entre Aconcagua y Maipo	2.286,7	15,5	0,68	1	1	0,56	25
50	Costeras Quilimari-Petorca	331,3	9,5	2,88	1	1	0,56	26
28	Quebrada la Negra	11.345,7	2.079,9	18,33	0	1	0,54	27
20	Fronterizas Salar Michincha-R.Loa	2.567,0	376,2	14,66	0	1	0,46	28
24	Endorreica entre Fronterizas y Salar Atacama	5.307,5	259,1	4,88	0	1	0,46	29
41	Rio los Choros	3.812,6	83,7	2,19	0	1	0,45	30
128	Tierra del Fuego	26.862,7	4.371,9	16,27	1	0	0,31	31
103	Rio Bueno	15.251,4	2.143,0	14,05	1	0	0,21	32
126	Vertiente del Atlantico	8.586,8	2.028,3	23,62	1	0	0,20	33
125	Costeras entre Lag. Blanca(inc), Seno Otway, canal Jeronimo y Magallanes	11.373,3	1.873,6	16,47	1	0	0,19	34
104	Cuencas e Islas entre R.Bueno y R. Puelo	12.804,9	985,1	7,69	1	0	0,15	35
73	Rio Maule	20.747,4	940,5	4,53	1	0	0,15	36
94	Rio Tolten	8.375,8	740,3	8,84	1	0	0,14	37
101	Rio Valdivia	10.135,9	698,5	6,89	1	0	0,14	38
109	Islas Chiloe y Circundantes	8.470,4	514,2	6,07	1	0	0,13	39
124	Costeras e Islas entre R Hollelberg, Golfo Alte. Laguna Blanca	13.138,8	477,1	3,63	1	0	0,13	40
83	Rio Bio-Bio	23.825,9	430,2	1,81	1	0	0,13	41
81	Rio Itata	11.225,2	365,7	3,26	1	0	0,13	42
113	Rio Aisen	11.177,0	328,5	2,94	1	0	0,13	43
111	Costeras e Islas entre R.Palena y R.Aisen	12.058,5	228,0	1,89	1	0	0,12	44
71	Rio Mataquito	6.204,2	150,9	2,43	1	0	0,12	45
115	Rio Baker	20.806,9	105,1	0,51	1	0	0,12	46
32	Rio Salado	7.528,1	100,6	1,34	1	0	0,12	47
91	Rio Imperial	12.608,8	83,2	0,66	1	0	0,11	48
72	Costeras Mataquito-	1.084,7	72,7	6,70	1	0	0,11	49

Cuenca	Nombre	Área Total Km ²	Área Total Favorable km ²	F/T	Cauce	Acuífero Agotamiento/ Restricción /protección	Índice	Ranking
	Maule							
114	Costeras e Islas entre R Aisen y R Baker y Canal Gral. Martinez	23.172,3	58,7	0,25	1	0	0,11	50
95	Rio Queule	693,8	57,9	8,35	1	0	0,11	51
106	Costeras entre R.Puelo y R.Yelcho	5.671,3	49,1	0,87	1	0	0,11	52
88	Costeras Lebu-Paicavi	1.592,6	29,9	1,88	1	0	0,11	53
89	Costeras e Islas entre R.Paicavi y Limite Región	1.339,0	25,3	1,89	1	0	0,11	54
74	Costeras Maule y Limite Región	1.990,0	14,2	0,71	1	0	0,11	55
100	Costeras entre limite Región y R.Valdivia	715,8	13,9	1,95	1	0	0,11	56
108	Costeras entre R.Yelcho y limite Regional	2.656,9	8,7	0,33	1	0	0,11	57
107	Rio Yelcho	3.891,9	8,4	0,22	1	0	0,11	58
110	Rio Palena y Costeras Limite Decima Region	7.385,1	3,6	0,05	1	0	0,11	59
92	Rio Budi	473,2	2,3	0,48	1	0	0,11	60
82	Costeras e Islas entre Rio Itata y Rio Bio-Bio	1.459,9	1,7	0,12	1	0	0,11	61
105	Rio Puelo	3.052,9	1,6	0,05	1	0	0,11	62
70	Costeras entre limite Region y R. Mataquito	611,2	1,3	0,22	1	0	0,11	63
29	Costeras entre Q. la Negra y Q. Pan de Azucar	16.562,7	1.538,8	9,29	0	0	0,07	64
16	Costeras R.Camarones-Pampa del Tamarugal	3.797,8	1.184,7	31,20	0	0	0,05	65
22	Costeras R.Loa-Q.Caracoles	8.267,9	986,7	11,93	0	0	0,04	66
36	Q.Total y Costeras hasta Q.Carrizal	5.942,2	823,2	13,85	0	0	0,04	67
14	Costeras R. San Jose-Q.Camarones	2.667,8	730,3	27,38	0	0	0,03	68
18	Costeras Tilviche-Loa	5.827,1	611,7	10,50	0	0	0,03	69
35	Costeras entre R.Copiapo y Q.Total	2.038,7	520,4	25,53	0	0	0,02	70
15	Q. Rio Camarones	4.542,5	370,5	8,16	0	0	0,02	71
33	Costeras e Islas	5.780,0	304,0	5,26	0	0	0,01	72

Cuenca	Nombre	Área Total Km ²	Área Total Favorable km ²	F/T	Cauce	Acuífero Agotamiento/ Restricción /protección	Índice	Ranking
	R.Salado-R.Copiapo							
39	Costeras e Islas entre R.Huasco y Cuarta Región	3.933,4	236,9	6,02	0	0	0,01	73
37	Quebrada Carrizal y Costeras hasta R. Huasco	2.412,8	235,6	9,76	0	0	0,01	74
31	Costeras Q.Pan de Azucar-R.Salado	6.580,4	71,9	1,09	0	0	0,00	75
11	Quebrada de la Concordia	767,2	61,3	7,99	0	0	0,00	76
40	Costeras e Islas entre Tercera Región y Q. Los Choros	215,7	45,5	21,08	0	0	0,00	77
46	Costeras entre R.Limari y R.Choapa	1.652,6	12,2	0,74	0	0	0,00	78
93	Costeras Entre Rio Budi y Rio Tolten	160,4	8,9	5,53	0	0	0,00	79
122	Costeras entre Seno Andrew y R. Hollemberg e islas al oriente	13.961,9	3,4	0,02	0	0	0,00	80
42	Costeras entre R. Los Choros y R. Elqui	416,1	2,3	0,56	0	0	0,00	81
129	Islas al sur del Canal Beagle y Territorio Antártico	7.954,2	0,6	0,01	1	0	0,00	82
86	Costeras Carampangue-Lebu	586,2	0,5	0,08	1	0	0,00	83
117	Rio Pascua	7.417,6	0,4	0,01	1	0	0,00	84
80	Costeras entre limite Region y R. Itata	610,9	0,3	0,05	1	0	0,00	85
85	Rio Carampangue	1.257,5	0,1	0,01	1	0	0,00	86
84	Costeras e Islas entre Ríos Bio-Bio y Carampangue	352,6	0,5	0,13	0	0	0,00	87
90	Costeras Limite Región y R. Imperial	35,5	0,2	0,66	0	0	0,00	88
49	Rio QuiLimari	768,9	0,0	0,00	1	1	0,00	89
48	Costeras entre R.Choapa y R. Quilimari	1.279,0	0,0	0,00	1	0	0,00	90
87	Rio Lebu	857,2	0,0	0,00	1	0	0,00	91
102	Costeras entre R. Valdivia y R. Bueno	741,8	0,0	0,00	1	0	0,00	92

Cuenca	Nombre	Área Total Km ²	Área Total Favorable km ²	F/T	Cauce	Acuífero Agotamiento/ Restricción /protección	Índice	Ranking
112	Archipiélagos de Las Guaitecas y de los Chonos	6.885,5	0,0	0,00	1	0	0,00	93
116	Costeras e Islas entre R. Baker y R. Pascua	3.076,4	0,0	0,00	1	0	0,00	94
118	Costeras entre R. Pascua Limite Región. Archipiélago Guayeco	7.999,9	0,0	0,00	1	0	0,00	95
120	Costeras entre Limite Región y Seno Andrew	10.659,1	0,0	0,00	1	0	0,00	96
121	Islas entre limite Región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción	7.867,8	0,0	0,00	1	0	0,00	97
119	Cuenca del Pacífico	2,5	0,0	0,00	0	0	0,00	98
123	Islas entre Canales Concepción, Sarmiento y E. de Magallanes	5.723,7	0,0	0,00	0	0	0,00	99
127	Islas al Sur Estrecho de Magallanes	6.619,9	0,0	0,00	0	0	0,00	100



Experiencias en Chile y áreas favorables según cálculo A21 (área gris)

- | | | |
|---|--|--|
|  Lagunas de infiltración |  Lagunas de infiltración y pozos de inyección |  Pozos de infiltración |
|  Lagunas de infiltración y Muros de retención de cauce |  Lagunas y zanjas de infiltración |  Pozos de inyección |
| | |  Recarga Natural |

Figura 2-8 Áreas favorables para la recarga artificial

2.5.3 Dimensión medioambiental en las experiencias internacionales

Las actuaciones de recarga artificial normalmente van acompañadas de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), tal y como se detalla en el *Capítulo 3. Análisis técnico de la recarga artificial*.

Los requerimientos ambientales son muy similares en todos los países, si bien en algunos este análisis se fija más en aspectos de calidad (Australia y California) mientras que en otros países toman en consideración los aspectos cuantitativos (España y Suráfrica).

En este sentido, en Europa, la Directiva 97/11/CE del Consejo de 3 de marzo de 1997 indica que los proyectos de recarga cuya capacidad supere los 10 hm³/año deben incluir una Declaración de Impacto Ambiental (DIA). Posteriormente, la Directiva Europea Marco del Agua (2000/60/CE) redefine las indicaciones para la elaboración de este estudio. Obliga a la definición de las características o condiciones de referencia previas a la inyección y al diseño de una serie de indicadores para la vigilancia y el control de las operaciones. Concretamente, requiere que antes de la instalación de un dispositivo se identifiquen y valoren los impactos sobre las aguas, se establezcan medidas protectoras y correctoras y se elabore un Plan de Vigilancia Ambiental.

En España, el proyecto DINA-MAR² ha desarrollado una serie de líneas de acción en materia de medio ambiente:

- Relativas a la salvaguarda de los caudales ecológicos en los cauces de toma.
- Las acciones en materia de regeneración hídrica de humedales.
- Mantenimiento de caudales de manantiales.
- Entre otros.

Con todo esto, han definido un sistema de indicadores medioambientales para la evaluación y el seguimiento de las actuaciones, integrados en otro sistema de indicadores, que funciona a su vez, como un indicador de consecución del objetivo. El sistema se ha definido, a escala piloto, para evaluar el estado medioambiental sólo de humedales en relación a dispositivo de recarga artificial y tiene en cuenta: la posición de

² Para más información consulte: <http://www.dina-mar.es/category/Proyecto-DINA-MAR.aspx>

las masas de agua respecto a los sistemas de flujo, las características del área de descargar aguas abajo, las características geológicas del sustrato y la climatología.

En Australia, con la finalidad de asegurar el la protección medioambiental, los proyectos de recarga artificial requieren la aprobación tanto de los gobiernos locales y regionales como de las agencias nacionales de medioambiente y salud. Para ello, una vez demostrada la viabilidad técnica, deben realizar un análisis de riesgo sobre la salud humana. Este análisis de riesgo cuenta con una lista de parámetros a la que hay que ir dando respuesta para asegurar que no habrá un deterioro sobre el medioambiente, poniendo énfasis en la calidad del agua.

En Estados Unidos, la solicitud de permisos para los dispositivos de recarga tienen dos vías diferentes, una respecto la cantidad del recurso y la otra relacionada a la calidad del agua. De esta manera, han elaborado una serie de restricciones y consideraciones medioambientales focalizadas en la calidad del agua inyectada a través de pozos a los acuíferos. En este sentido, cada estado cuenta con sus estándares de calidad y básicamente lo que regulan son los tipos de tratamiento previos a la recarga que son necesarios aplicar para minimizar los impactos medioambientales. No existe una normativa de impactos generalizada en los proyectos de infiltración.

3. Análisis técnico de la recarga artificial

3.1 Introducción

La Recarga Artificial de Acuíferos o Gestión de la Recarga (en inglés MAR: *Managed Aquifer Recharge*) es una técnica concebida para la infiltración de agua en los acuíferos de manera intencionada.

A continuación, se detallan los principales tipos de dispositivos y se analizan aquellos que son de mayor aplicación en Chile. Además, se describen los diferentes aspectos técnicos a tener en cuenta en cada una de las fases de implementación de un sistema de recarga artificial. Finalmente, se sintetizan los parámetros más importantes y la metodología para considerarlos conjuntamente.

3.2 Tipos de dispositivos

3.2.1 Introducción

La recarga artificial es una alternativa hídrica de gestión del agua en la que se utiliza la capacidad de almacenamiento que tienen los acuíferos para introducir en los mismos, mediante diferentes tecnologías, agua procedente de distintas fuentes. El objetivo final es aumentar la disponibilidad de agua, la garantía de suministro y mejorar la calidad del agua.

La recarga artificial requiere de la disponibilidad de recursos hídricos excedentarios y de terrenos adecuados bien para su inyección al acuífero o para su infiltración. Actualmente, existen muchas técnicas diferentes para favorecer la recarga a los acuíferos. Abarcan desde instalaciones simples (pequeñas represas en ríos) hasta instalaciones complejas (barrera de pozos de inyección con agua regenerada o tratada). Además, se están introduciendo sistemas hídricos y mixtos de gestión con diferentes técnicas, así como mejoras en los sistemas más convencionales (lechos reactivos para eliminación de contaminantes en balsas de recarga). Hay que tener en cuenta, que en un mismo dispositivo pueden utilizarse diferentes aguas de recarga las cuales serán relevantes en función del uso actual del acuífero.

La recarga artificial ofrece un conjunto de posibilidades que deben ser adaptadas a las características del sitio, la fuente de recursos hídricos disponible y a las necesidades de los usuarios. Consecuentemente, la legislación y las guías metodológicas derivadas de su análisis, deben contemplar todas estas opciones que se están llevando a cabo actualmente en diferentes países.

Considerando todo lo anterior, es evidente que la recarga artificial de acuíferos en Chile puede ser una iniciativa muy útil, aunque deben darse ciertos requisitos analizados en este documento para hacer factible, técnica y económicamente un proyecto de recarga artificial. Esto último, según Cabrera (2014), es independiente de la condición legal en que se encuentre la cuenca o subcuenca (en cuanto a si se está en el caso de una zona de restricción, de prohibición o si, simplemente, es una zona sin restricción).

3.2.2 Diferentes dispositivos de recarga artificial

En este apartado se describen los diferentes tipos de dispositivos de recarga y las variadas posibilidades de esta tecnología. El objetivo es identificar las tipologías más importantes y centrar el estudio en aquellos tipos de dispositivos más comunes y de mayor aplicabilidad en Chile.

Dependiendo del tipo de recarga (directa o indirecta), tradicionalmente se han establecido dos grandes grupos para clasificar los métodos o dispositivos de recarga artificial: superficiales y profundos.

Los **dispositivos superficiales**, basados en la infiltración del agua a través de la superficie permeable, se aplican en aquellos casos en los que el acuífero libre que desea recargarse se encuentra situado cerca de la superficie. Estos incluyen las balsas, fosas, canales, campos de extensión, serpenteos y represas, y vasos permeables. Las balsas de infiltración son el tipo de instalación de recarga superficial más utilizado en la actualidad cuya infiltración se produce principalmente a través del fondo (Ortiz, 2012).

Sin embargo, los **dispositivos profundos** implican la introducción directa del agua a través de pozos de inyección, simas o dolinas, y/o sondeos de recarga. Por lo tanto, estos dispositivos son utilizados en caso de que las capas superficiales presenten escasa permeabilidad y el acuífero confinado se encuentre a una profundidad suficientemente elevada como para que la aplicación de métodos superficiales sea efectiva.

Al inicio de la recarga, las tasas de infiltración son más elevadas y dependen de la permeabilidad “seca”. Vienen condicionadas por la afinidad que las partículas constituyentes de la formación permeable tienen con respecto al agua. No obstante, una vez que se han mojado los materiales, la permeabilidad “mojada” está condicionada por el gradiente hidráulico y la capacidad de transmisión del acuífero (ley de Darcy). Con el tiempo, los procesos de colmatación influyen en la permeabilidad reduciendo las tasas de infiltración, tal y como se detalla más adelante en el apartado 3.5.4.1.

A modo de resumen, la Tabla 3-1 incluye los métodos o dispositivos de recarga, sin tener en cuenta, mejoras y modificaciones posteriores. Se han incluido los principales tipos existentes a nivel internacional. Algunos de estos dispositivos se desconoce que hayan sido desarrollado actualmente en Chile, lo cual se indican pertinentemente en dicha Tabla 3-1. No se ha incluido la recarga accidental de acuíferos desde sistemas de drenaje urbanos o por retornos de agua de riego, ya que no son métodos cuyo objetivo sea el aumento de la recarga de una manera intencionada, sino que se trata de una recarga no planificada.

Tabla 3-1 Métodos o dispositivos de recarga artificial.

TIPO DE DISPOSITIVO DE RECARGA	ZONA	DISPOSITIVO
Dispositivos superficiales (Recarga por dispersión/infiltración)	Fuera de cauces	Balsas, lagunas o piscinas de infiltración
		Humedales
		Zanjas, acequias o canales
		Superficie de recarga (campos de extensión o inundación)
		Filtración inter-dunar
	Dentro del cauce	Barreras en cauces o diques de retención y represas
		Diques permeables y semipermeables (*)
		Presas de arena (*)
		Presas subterráneas (*)
		Serpenteos
		Escarificación del lecho del cauce
		Diques perforados (*)

TIPO DE DISPOSITIVO DE RECARGA	ZONA	DISPOSITIVO	
		Filtración a través del banco del río (<i>River Bank Filtration</i>) (*)	
	Con agua de lluvia	Captación de agua de lluvia en terreno improductivo (*)	
Dispositivos Profundos (Recarga por inyección mediante pozos)	Sondeos y pozos de inyección. Pueden funcionar según diferentes métodos:	Inyección en pozos para almacenamiento en acuífero y recuperación posterior en el mismo pozo de inyección (<i>ASR; Aquifer Storage and Recovery</i>)	
		Inyección en pozos para almacenamiento en acuífero, transferencia y recuperación en otro pozo(<i>ASTR</i>)	
		Inyección en pozos para almacenamiento en acuíferos salinos (*)	
		Barreras de pozos de inyección	
	Simas y Dolinas		
	Galerías o túneles filtrantes		
	Balsas o zanjas combinadas con pozos de inyección		
	Pozos con galerías		
	Pozos abiertos de infiltración		

(*) Este tipo de dispositivos no se ha desarrollado en Chile.

Si bien muchas técnicas son aplicables en varios emplazamientos de características diferentes, algunas son más recomendables para zonas áridas mientras que otras lo son para zonas húmedas. Si se observa el mapa de distribución de tipos de dispositivos de recarga artificial en Europa (Figura 3-1) se aprecia que en las zonas nórdicas se prefiere la recarga a través de balsas de infiltración o la extracción de agua a través del lecho filtrante del río. Sin embargo, en el Sur este último tipo no se lleva a cabo por la temporalidad de los cursos de agua y en cambio, se utilizan los lechos de los ríos para vertido de caudales de recarga.

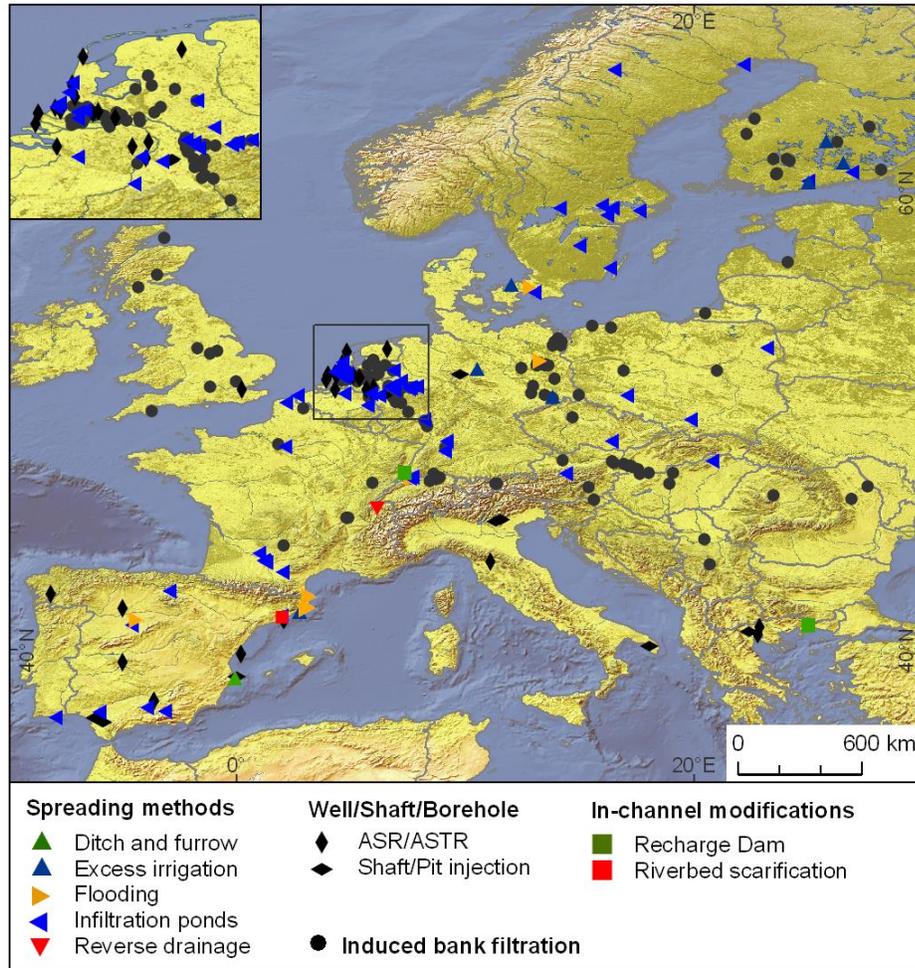


Figura 3-1 Catálogo de dispositivos de recarga artificial en Europa.

Fuente: DEMEAU, 2013.

En consecuencia, se considera que no todos los tipos de dispositivos son de fácil aplicación en Chile, dadas las características del país y las particularidades de ciertos dispositivos de recarga.

3.2.3 Características de los principales tipos de dispositivos

A continuación, se realiza una descripción detallada de las características y restricciones de cada uno de los tipos de dispositivos de recarga para evaluar su aplicabilidad en Chile

en base a sus criterios de diseño y sus aportes. En la Figura 3-2 se muestra un esquema de cada dispositivo.

3.2.3.1 Dispositivos superficiales

a) Ubicados fuera del cauce

- **Balsas, lagunas o piscinas de infiltración**

Estas balsas o estructuras normalmente rectangulares, se construyen sobre acuíferos de arena o gravas. El agua se deriva hacia estas balsas las cuales deben favorecer la infiltración al acuífero a través de la zona no saturada hacia el acuífero. Si el paso a través de la zona no saturada es amplio, se favorece la eliminación de determinados contaminantes. Por lo tanto, permite el uso de agua regenerada. Es uno de los métodos más extendidos por su facilidad de construcción y mantenimiento y por los bajos costes económicos asociados. Además, permite verificar fácilmente el funcionamiento del proceso de recarga. Por otro lado, para poder implementar este método se requiere de un espacio notable. Las condiciones hidrogeológicas que se requieren son las de un acuífero detrítico, preferentemente arenoso, no confinado. No se puede implementar en suelos arcillosos ni donde existe una capa de arcilla que separa la superficie del acuífero. La infiltración es más rápida con aguas limpias que con aguas con cierta turbidez. Estas últimas conducen a una disminución de las tasas de infiltración muy rápidamente por procesos de colmatación.

Existen diferentes estrategias para minimizar la colmatación en la zona de recarga (además de tratar el agua). En algunos emplazamientos se construyen dos balsas, una para decantación y otra para infiltración. En otros sitios, las dos balsas se van alternando para permitir que la capa de decantación se seque y se rompa durante el periodo que no se utiliza. Para el mantenimiento es suficiente hacer periódicamente una escarificación o remoción de los primeros 25 cm y cada 1-2 años retirar estos primeros centímetros de suelo.

- **Humedales**

En algunos ambientes de humedales secos puede aprovecharse la zona para construir y adecuar superficies y lagunas de infiltración. Los humedales acostumbran a reflejar el

nivel freático y por lo tanto están conectados con el acuífero. En caso de disminución de niveles esta zona puede convertirse en un área de entrada de agua al acuífero mediante recarga artificial.

- **Zanjas, acequias o canales**

Se trata de estructuras lineales de conducción de agua, de poca profundidad, que siguen la topografía del terreno (curvas de nivel), ya sea para recoger agua o para transportarla a otros sitios por ejemplo para riego. De esta manera se aumenta el área de infiltración a lo largo de su extensión.

- **Superficies de recarga (campos de extensión o inundación)**

El agua se aplica en una superficie amplia normalmente no encauzada. Puede realizarse mediante aspersión (lo cual favorece la oxigenación del agua si así se requiere) o a través de inundación de terrenos con aguas de crecidas. También se realiza en algunas zonas agrícolas con excedentes hídricos. Es una recarga puntual donde la infiltración tiene lugar a lo largo de una amplia superficie.

- **Filtración inter-dunar**

Este sistema consiste en infiltrar agua a través de dunas de arena y a partir de balsas de infiltración y extraerlo en pozos o balsas ubicadas a menor elevación topográfica. Permite la mejora de la calidad del agua en función del tiempo de residencia en el acuífero. Es un método muy extendido en Holanda. Además, se aplica en acuíferos arenosos no confinados y no requiere normalmente mantenimiento elevado. Los problemas pueden relacionarse con procesos de colmatación en función del agua de recarga. Este sistema no puede aplicarse en todos los sitios, ya que requiere disponer de agua cerca de un sistema de acuífero dunar.

b) Ubicados dentro del cauce

- **Barreras, diques de retención y represas**

Consiste en la construcción de tanques en ríos, normalmente no permanentes, que permiten el almacenamiento del agua superficial y facilitan su infiltración hacia los acuíferos subyacentes no confinados. El agua recargada se puede extraer aguas abajo

mediante pozos o sondeos. Para poderse implementarse, el acuífero debe encontrarse en condiciones de no confinamiento y la geología superficial debe ser permeable. Se pueden colocar trampas para limos con la finalidad de reducir la colmatación. En este caso, su coste también depende del tamaño de la presa que se estima entre bajo y moderado.

- **Diques permeables y semipermeables**

Se construyen presas en los cauces de ríos intermitentes con la finalidad de retener el flujo del río especialmente en la época de crecidas o de mayor caudal. El agua que se retiene se va liberando gradualmente para facilitar la recarga a los acuíferos aguas abajo a través de la circulación por el río.

- **Serpenteos**

Esta técnica se basa en modificar la morfología del río construyendo más meandros y serpenteos. Esto disminuye la velocidad del agua, crea más zonas amplias de circulación y favorece la infiltración a través del lecho del río.

- **Presas de arena**

Esta tecnología se basa en la construcción de pequeñas presas en cursos de agua intermitentes que llevan mucha carga de sedimentos y donde la base del río es material de baja permeabilidad. Las presas atrapan el sedimento de los sucesivos flujos de manera que detrás de la presa se crea un "acuífero" con materiales permeables. En estos materiales pueden situarse pozos verticales o salidas horizontales a través de la presa para la extracción del agua recargada. Este método sólo se puede implementar en zonas de baja permeabilidad. En zonas donde el curso de agua transporte materiales muy finos no se podrá implementar, porque estos disminuyen la permeabilidad del medio. Se consideran que las zonas con arenas graníticas son las más recomendables (Borst y Haas, 2006). El coste depende del tamaño de la presa que por lo general tiende ser de bajo a moderado.

- **Filtración a través del banco del río**

Esta técnica es básicamente un proceso que favorece la infiltración natural. Consiste en extraer agua subterránea de un pozo o sondeo próximo a una masa de agua como un río

o un lago. Con este bombeo se crea un gradiente hidráulico que aumenta el proceso de infiltración al mismo tiempo que favorece la eliminación de determinados contaminantes del agua de inyección. Esta metodología solo puede aplicarse en las proximidades (pocas decenas de metros como máximo) de una masa de agua superficial y en materiales permeables.

- **Presas subterráneas**

Este tipo de presas se construyen en ríos efímeros, con caudal intermitente, y en los cuales los altos del zócalo constriñen el flujo. Se construye una zanja en el material del lecho del río y se rellena con material de baja permeabilidad para facilitar la retención del flujo en los materiales aluviales y favorecer la recarga.

3.2.3.2 *Dispositivos profundos*

- **Pozos abiertos de infiltración**

El agua se conduce hacia un pozo relleno con arena o grava el cual permite su infiltración hacia el acuífero. Normalmente se realiza con agua de escorrentía de una parcela o del tejado de un edificio la cual se recolecta y conduce al pozo. Las características ideales para su implantación son acuíferos arenosos, aunque también puede llevarse a cabo en rocas de baja permeabilidad mediante sondeos profundos. El coste tanto de construcción como de mantenimiento es entre moderado y bajo. Respecto al funcionamiento, la primera agua de la lluvia que está más cargada en contaminantes debería evitarse que se recargara al acuífero. Esta tecnología está siendo muy utilizada en ciudades como medida para paliar la sobreexplotación del agua freática.

- **Inyección mediante pozos para almacenamiento en acuífero y posterior recuperación con el mismo pozo de inyección (ASR: *Aquifer Storage and Recovery*)**

Se basa en la inyección de agua en un pozo para su almacenamiento y posterior recuperación en el mismo pozo. Este tipo es adecuado para acuíferos confinados y no confinados. Funciona mejor en zonas donde el gradiente hidráulico es muy bajo para evitar la mezcla con el agua del acuífero y obtener elevadas tasas de recuperación. Este

sistema acostumbra a tener problemas de *clogging* y hay que implementar un plan de lavado de los pozos cada cierto tiempo.

- **Inyección mediante pozos para almacenamiento en acuífero y posterior recuperación en un pozo distinto al de inyección (ASTR (*Aquifer Storage Transfer and Recovery*))**

En este caso la inyección del agua se realiza en un pozo diferente al de extracción de manera que hay un cierto tiempo de tránsito entre ambos pozos. Si se inyecta agua pre-potable se recomienda que el tiempo de tránsito entre ambos pozos sea suficiente para la eliminación de potenciales compuestos contaminantes y mejorar la calidad de la misma. Puede implementarse tanto en acuíferos confinados como no confinados y si el gradiente hidráulico es bajo o moderado entonces es poco influyente, porque puede controlarse con el pozo de extracción. Igual que en ASR requieren importantes tareas de mantenimiento relacionados con los procesos de colmatación.

- **Inyección mediante pozos para almacenamiento en acuíferos salinos**

En zonas con elevada salinidad donde el acuífero no puede utilizarse para su aprovechamiento puede recargarse agua no salinizada. Esta agua de recarga crea un efecto de burbuja cercano al pozo de inyección el cual se utilizará posteriormente para la recuperación de la misma agua. En estos casos, es muy importante conocer las características hidráulicas y controlar la zona de mezcla entre ambas aguas y la efectividad de recuperación del pozo.

- **Barreras en pozos de inyección**

En algunas zonas con problemas de contaminación como por ejemplo al intrusión salina pueden construirse barreras hidráulicas. Se dispone de una serie de pozos en configuración lineal en los cuales se inyecta agua para frenar el avance de la contaminación en el acuífero.

- **Galerías profundas**

Consiste en la construcción de estructuras horizontales en el subsuelo que realizan la función de recarga del acuífero (por debajo de niveles impermeables si es el caso).

Estas estructuras pueden combinarse con pozos (pozos con galerías o con zanjas).

En base a todas estas características de cada uno de los dispositivos se ha construido la Tabla 3-2 con las principales ventajas y puntos a tener en cuenta en los tipos principales.

Tabla 3-2 Principales problemas y ventajas de los dispositivos más comunes de recarga.

Tipo de dispositivo	Escala	Coste	Mantenimiento	Requerimientos del suelo	Atenuación de contaminantes	Acuífero permeable no confinado	Potencial evaporación	Complejidad	Potencial contaminación acuífero	Requerimientos de calidad agua recargada
Barreras en cauce, diques y represas	Variable	B	M	B	Sí	Sí	A	B	M	B
Diques permeables y semipermeables	Variable	B	M	B	Sí	Sí	B	M	M	B
Presa de arena	Pequeña	B	B	B	Limitado	No	M	B	A	B
	Tamaños de grano gruesos pueden requerir un nivel impermeable									
Balsas de infiltración	Variable	B	M	A	Sí	Sí	A	B	A	B
	En zonas con poca pendiente									
Zanjas, acequias o canales de infiltración	Pequeña	M	A	M	Sí	Sí	B	M	B	M
	Pueden ser subterráneas. Son viables aún si hay un nivel superior impermeable									
Pozos abiertos de infiltración (zona no saturada)	Media	M	A	B	Variable	Sí	B	M	B	A
	Son viables aunque haya un nivel superior impermeable									
Sondeos y pozos de inyección (zona saturada)	Grande	A	M	B	Limitado	No	B	A	B	A
	Son viables aunque haya un nivel superior impermeable. Necesitan monitoreo más continuo.									
Filtración a través del banco del río	Grande	A	M	B	Variable	Sí	B	A	A	B
	Sólo en ríos o masas de agua permanentes.									

Nota: A: alta importancia, M: media, B: baja

Fuente: Steinel, 2012.

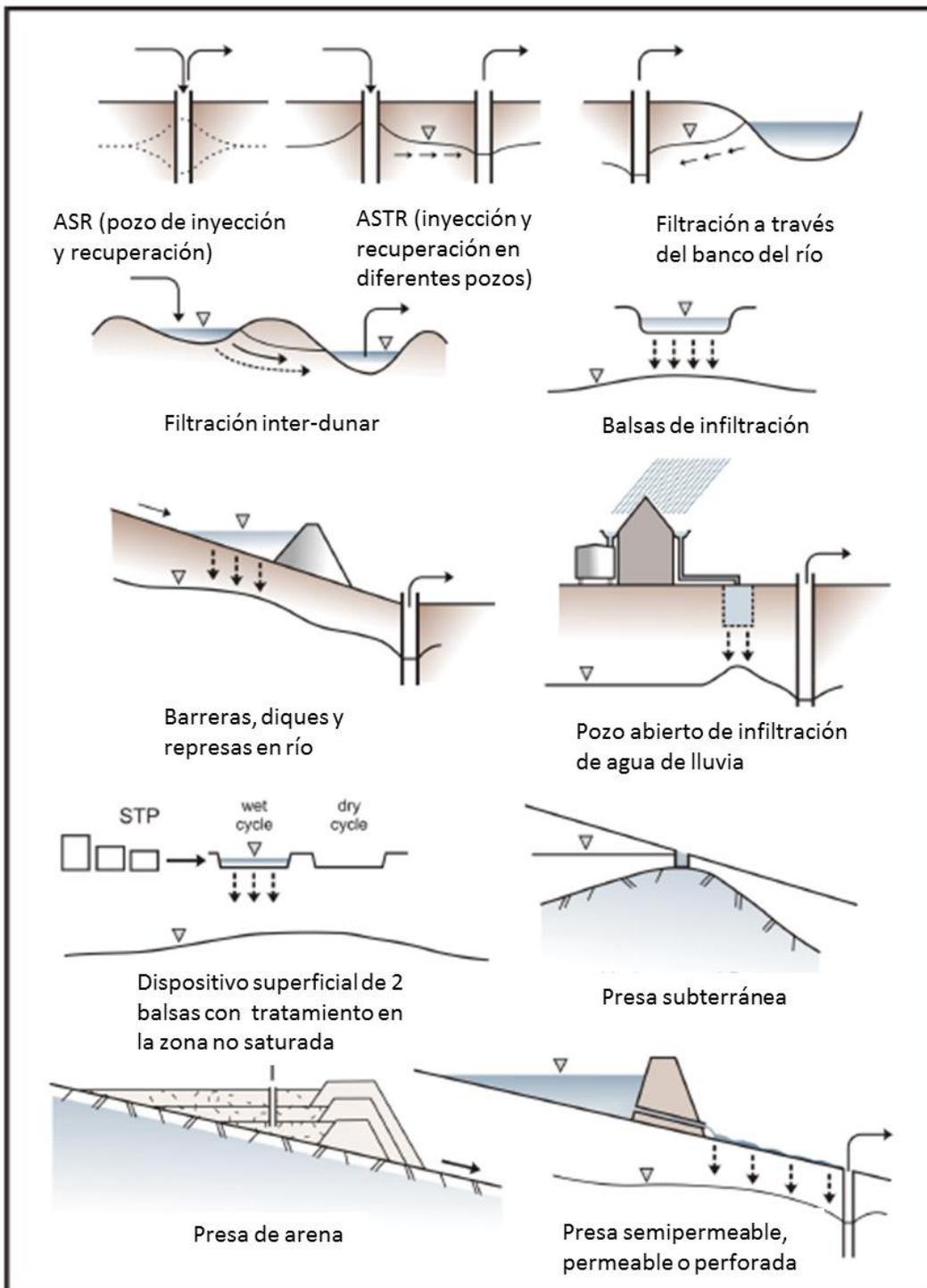


Figura 3-2 Tipos de dispositivos más habituales.

Fuente: Dillon (2005).

3.2.4 Principales tipos de dispositivos a considerar

Con la finalidad de agrupar los diferentes tipos y facilitar la implementación de las guías metodológicas se han realizado dos aproximaciones:

1. Se han seleccionado aquellos dispositivos que se implementan más habitualmente. Las menos comunes o que tienen lugar de manera indirecta relacionada con otra actividad (como los retornos de riego o las pérdidas de redes) no se han considerado en el análisis.
2. A continuación se han analizado cuatro parámetros básicos en la tabla de tipología de tipos de dispositivos de recarga. Se ha identificado la importancia relativa que cada uno de estos factores tiene para cada tipología de dispositivo atribuyéndole un valor de 1 a 3 (siendo el 3 la máxima importancia) (Tabla 3-3). Este valor se ha atribuido en base a la bibliografía (Fernández-Escalante, 2010; Raham *et al.*, 2012; Steinel, 2012).

Aquellos dispositivos principales con características de funcionamiento similares y cuyos parámetros se han categorizado de manera similar se han agrupado dando lugar a seis tipos principales de tipos de dispositivos de recarga artificial (Tabla 3-4). Todo el resto se puede asimilar a uno de estos seis tipos. Tanto el análisis Técnico y Legal como las Guías metodológicas se han enfocado bajo esta consideración.

Para la selección de emplazamientos favorables en acuíferos mediante el SIG, se tendrán en cuenta sólo dos categorías: infiltración mediante balsas o diques e inyección con pozos. El resto de dispositivos constituyen estructuras y acciones en ríos de manera que se considerarán a través de la cartografía de ríos.

Tabla 3-3 Selección de los principales tipos de recarga artificial.

Tipo de dispositivo de recarga	Zona	Dispositivo	Permeabilidad de la zona (mapa)	Geología del acuífero (aluvial, detrítico, cárstico, metamórfico, volcánico, intrusivo, evaporítico)	Tiempo de tránsito en el acuífero	Calidad del agua de inyección	Tipologías principales
Dispositivo superficial (Recarga por dispersión/infiltración)	Fuera de cauces	Balsas de infiltración, lagunas o piscinas	3	3	3	2	TIPO 1: INFILTRACIÓN
		Humedales	3	3	3	2	
		Canales, zanjas o acequias de infiltración	3	2	3	2	
		Superficie de recarga (campos de infiltración o inundación)	3	3	3	2	
		Presas subterráneas	1	2	2	2	
	En cauce de ríos	Barreras en cauces, diques de retención y represas	3	2	2	2	TIPO 2: DIQUES EN RÍOS
		Diques permeables y semipermeables	2	2	3	2	
		Serpenteos	2	2	2	2	
		Escarificación del lecho	3	3	2	2	TIPO 3: ESCARIFICACIÓN DE CAUCES
		Diques perforados	2	2	2	2	
		Filtración a través del banco del río (<i>River Bank Filtration</i>)	1	1	3	1	TIPO 4. FILTRACION EN MÁRGENES DE RÍO
		Filtración a través de las dunas (en márgenes de río)	3	3	3	1	
	Dispositivo profundo (Recarga por inyección mediante pozos)		Sondeos y pozos de inyección	1	3	3	3

Tipo de dispositivo de recarga	Zona	Dispositivo	Permeabilidad de la zona (mapa)	Geología del acuífero (aluvial, detrítico, cárstico, metamórfico, volcánico, intrusivo, evaporítico)	Tiempo de tránsito en el acuífero	Calidad del agua de inyección	Tipologías principales
		Almacenamiento en acuífero, transferencia y recuperación en otro pozo(ASTR)	1	3	3	3	
		Barreras de pozos	1	3	3	3	
		Pozos abiertos de infiltración	3	3	2	3	
		Simas y dolinas	3	3	1	3	
		Galerías o túneles filtrantes	1	3	2	3	
		Zanjas o balsas combinadas	1	3	2	3	
		Almacenamiento en acuífero y recuperación posterior en el mismo pozo(ASR; <i>Aquifer Storage and Recovery</i>)	1	3	1	3	TIPO 6: ASR
		Inyección y almacenamiento en acuíferos salinos	1	2	1	2	

 Poco Habituales
 Tipos comunes

Tabla 3-4 Tipos principales de recarga artificial seleccionados.

TIPO 1: INFILTRACIÓN (incluye también pozos abiertos de infiltración)
TIPO 2: DIQUES EN RÍOS
TIPO 3: ESCARIFICACIÓN DE CAUCES
TIPO 4. FILTRACIÓN ATRAVÉS DE LOS MÁRGENES DEL RÍO
TIPO 5: INYECCIÓN CON POZOS Y ASTR
TIPO 6: ASR

3.3 Toma de decisiones en un proyecto de recarga artificial

3.3.1 Proceso de decisión

Previamente a la implantación de un dispositivo de recarga artificial, existen siete preguntas que deberían tenerse en cuenta y que condicionarán el éxito del método de recarga determinado (Dillon, 2009):

- ¿Existe una demanda de agua que no puede satisfacerse de manera sostenible con los recursos actuales?
- ¿Se dispone de una fuente de agua de recarga adecuada en cantidad y calidad?
- ¿Se cuenta con los derechos constituidos sobre el agua?
- ¿Se dispone de un acuífero adecuado para poder proceder a la recarga?
- ¿Se cuenta las autorizaciones de las obras de recarga artificial?
- ¿El emplazamiento reúne las condiciones necesarias de espacio y accesos?
- ¿Existe suficiente capacidad para el manejo del proyecto?

En base a estas preguntas y según la Figura 3-3 se toma la primera decisión respecto el inicio del proyecto de recarga artificial.

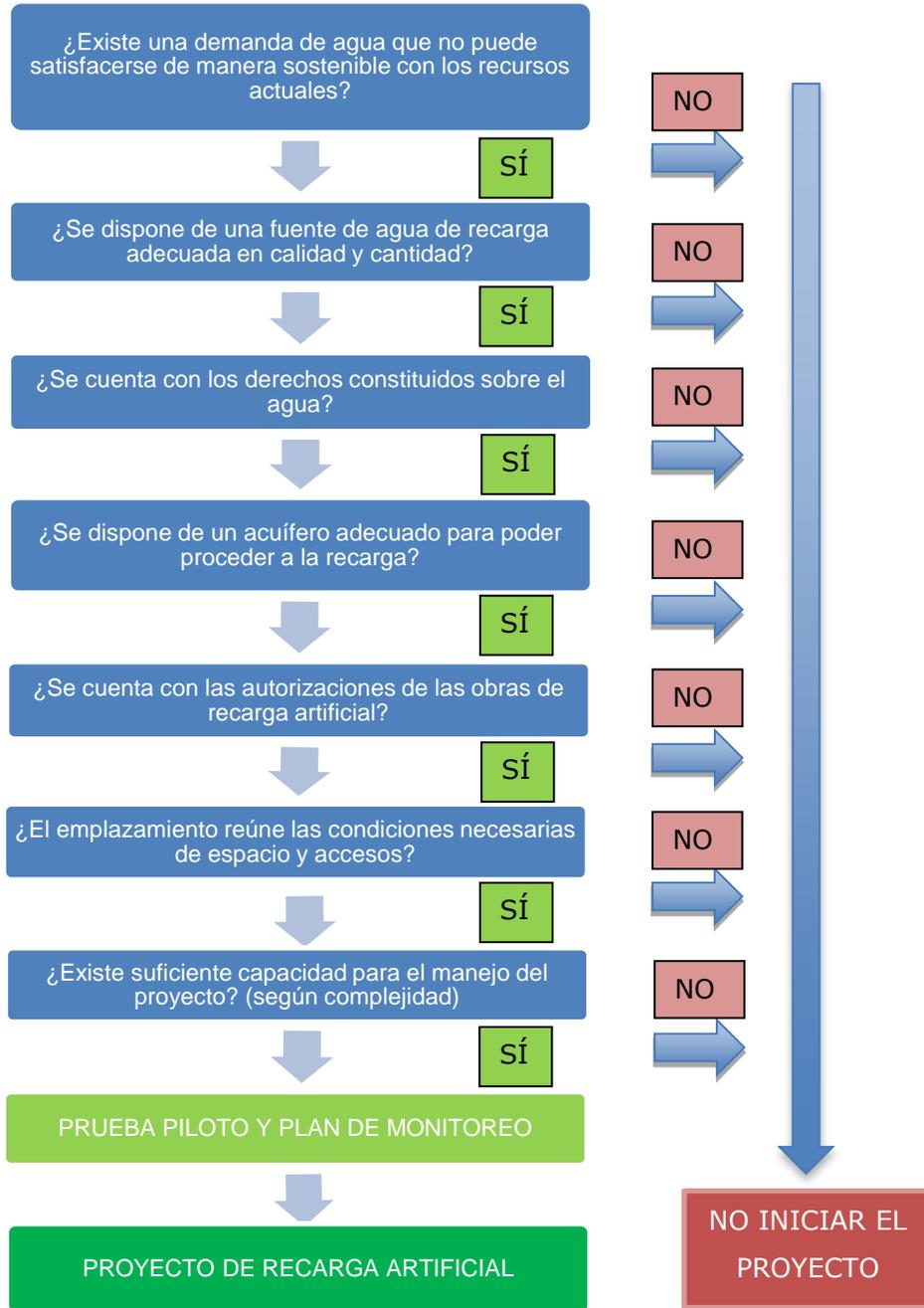


Figura 3-3 Proceso de toma de decisión para el inicio de un proyecto de recarga artificial.

Fuente: Modificado de Dillon, 2009.

Una vez se obtengan resultados positivos a las siete preguntas planteadas, se recomienda proceder con la realización de una prueba piloto de recarga artificial e iniciar la

monitorización de los niveles piezométricos de la zona de estudio y de la calidad del agua superficial existente (Murray, 2009). Sólo en caso de obtenerse un resultado positivo del proyecto piloto demostrativo se recomienda proceder con el proyecto de recarga artificial a gran escala. Este paso es fundamental, ya que se pueden generar impactos sobre la calidad del agua. Asimismo, no es recomendable iniciar un proyecto de recarga artificial si no dispone de datos de las variaciones del nivel freático y de calidad durante un año, como mínimo. Además, si no se cumple la legislación en cuanto a los derechos constituidos sobre el agua, o si no se tienen las autorizaciones a las obras a realizar y la calidad de las aguas a infiltrar, no es recomendable iniciar un proyecto de recarga artificial. Esto permite asegurar la capacidad del acuífero, evaluar la respuesta del mismo al flujo subterráneo, identificar potenciales impactos ambientales y evaluar la sostenibilidad del sistema a largo plazo.

3.3.2 Demanda de agua

Si no existe una demanda de agua real no suplida, no es habitual iniciar el desarrollo de un proyecto de recarga artificial, ya que no hay una realidad que lo justifique.

Las áreas idóneas para llevar a cabo un proyecto de recarga son aquellas zonas con acuíferos sobreexplotados, con disminuciones continuadas de la napa freática, con problemas de intrusión salina o contaminación en general relacionados con el uso extensivo del acuífero (Galloway *et al.*, 2003). Para la evaluación del grado de sobreexplotación de un acuífero es necesario disponer de datos de la variación del nivel freático de más de un año.

3.3.3 Agua de recarga

La disponibilidad de agua, la garantía de suministro y la calidad del agua son factores clave para determinar la viabilidad para implementar un proyecto de recarga artificial. Esta agua se puede encontrar en ríos, presas, efluentes tratados, aguas servidas, escorrentía urbana, excedentes de riego, agua de crecidas, entre otros. Las características físicas y químicas de este agua tendrán influencia tanto en el diseño del dispositivo de recarga para minimizar los potenciales impactos ambientales como en las consideraciones legales. En este sentido, en algunos países, si se utiliza agua depurada o regenerada hay que atenerse a la normativa de reutilización de aguas. Además, en Chile,

en caso de recargar efluentes, habrá que considerar la vulnerabilidad del acuífero y las legislaciones vigentes sobre emisión residuos líquidos (DGA, 2004).

Si las condiciones del medio son las adecuadas y el diseño del dispositivo de recarga es correcto, se ha demostrado que la recarga con agua depurada o regenerada no tienen impacto negativo sobre el acuífero.

Tipos de agua a utilizar en los dispositivos de recarga (Tabla 3-5):

- Agua de lluvia.
- Agua del acuífero.
- Agua de retorno de riego.
- Agua del río sin tratar.
- Agua potabilizada (río, acuífero, laguna y otros).
- Agua procedente de desalinizadora.
- Agua procedente de planta depuradora.
- Agua regenerada (agua de depuradoras tratada).

En función del tipo de agua será necesario aplicar algunos pre-tratamientos previos a la recarga artificial. En algunos casos será suficiente un filtrado (agua de río, lluvia, tormenta) mientras que en otros casos puede ser recomendable un tratamiento terciario (agua regenerada) (Tabla 3-5). Es por ello, que cada uno de estos tipos de agua no ofrece la misma **garantía de suministro**. Las mayores garantías las ofrecen los ríos perennes, las presas, el agua regenerada y el agua procedente de otros acuíferos. El agua de tormenta o de crecida es muy variable de cantidad impredecible.

Tabla 3-5 Procedencia del agua, métodos de captura y pre- y post-tratamientos.

Proceso de recarga						
Procedencia del agua	Captura	Pre-tratamiento	Recarga + Almacenamiento + Recuperación	Post-tratamiento y uso final	Sostenibilidad	
Agua de red	Red de tuberías	Ninguno o filtro		Recarga + Almacenamiento + Recuperación	Desinfección para agua de bebida. Ningún tratamiento para: - agua industrial - agua de riego - uso doméstico (excepto uso de boca) - usos ambientales	Buena calidad, garantía de suministro y baja colmatación.
Agua de lluvia (*)	Tanques	Filtro				Buena calidad y baja colmatación.
Agua de crecida o aluvionales (*)	Humedal o tanques	Humedal, microfiltración, filtración por carbón activo				Buena calidad (excepto los primeros mm).
Agua reutilizada o desalinizada	Tubería desde planta de tratamiento	Filtración, membranas, ósmosis inversa...				Garantía de suministro.
Escorrentía (rural o ríos)	Humedales, tanques, presas o zanjas	Humedal o filtro				Garantía de suministro moderada.
Acuífero	Bombeo de un pozo	Ninguno				Buena calidad y garantía de suministro.

(*) Este tipo de aguas de recarga no requeriría acreditar el dominio vigente de los derechos de aprovechamiento. Se podrá utilizar esa agua siempre y cuando no afecte la recarga natural del acuífero o no provoque un daño en los derechos a terceros.

Fuente: Modificado de Dillon et al., 2009.

Generalmente, **la calidad del agua** es más elevada en el caso de los acuíferos y determinados tipos de escorrentía (rural o urbana). Por ejemplo, los ríos y presas pueden presentar variaciones de calidad importante a lo largo de un año. No obstante, la escorrentía superficial presenta una calidad de agua muy variable, tanto especial como temporalmente, dependiendo del uso y las características del suelo (Eriksson *et al.*, 2007). La escorrentía en zonas rurales puede contener importantes concentraciones de nutrientes y pesticidas, mientras que en las zonas urbanas pueden detectarse también metales y contaminantes orgánicos (Pitt *et al.*, 1999). El agua pluvial recogida en los tejados es la que contiene los menores niveles de contaminantes si no se recogen los primeros flujos. La carga de sedimentos es el mayor problema en todas las aguas de

escorrentía, ya que la mayor parte de contaminantes no están disueltos sino en suspensión (Mikkelsen *et al.*, 1994) que provoca la colmatación física y disminución de las tasas de infiltración.

El agua regenerada si bien es predecible en cantidad puede presentar problemas de calidad como nutrientes (en cantidades más elevadas que las aguas de escorrentía), patógenos, COT o salinidad que repercutirán en el aumento de la colmatación biológica si no se le aplica un pretratamiento adecuado antes de la recarga (Stein *et al.*, 2012). Normalmente, presentan pocos sólidos en suspensión. Los efluentes de las plantas de tratamiento acostumbran a registrar variaciones en la calidad del agua a lo largo del año y especialmente en zonas turísticas donde los volúmenes son muy variables a lo largo del año. De todas maneras, estos cambios son también predecibles en base a los datos históricos. El principal tipo de colmatación que genera este tipo de agua es la biológica. También hay que considerar que la materia orgánica y los nutrientes son los principales causantes de cambios en las condiciones *Redox* y en las reacciones asociadas como la degradación de contaminantes orgánicos o reacciones minerales de disolución/precipitación (Stumm y Morgan, 1996).

Actualmente, uno de los parámetros que está siendo estudiado en diferentes emplazamientos son los contaminantes orgánicos traza o contaminantes emergentes que proceden de las plantas de tratamiento y llegan al acuífero a través de la recarga. Estos contaminantes (normalmente farmacéutico y disruptores) requieren tratamientos terciarios adicionales para su eliminación y algunos de ellos se eliminan a través de su paso por la zona no saturada.

En algunos países del Golfo están evaluando la posibilidad de recargar con agua desalinizada para tener agua almacenada para situaciones de emergencia (Koziorowski, 2012). Estas aguas son de baja mineralización y pueden provocar la disolución de minerales durante su almacenamiento conllevando una disminución de la calidad del agua y generando un riesgo respecto la estabilidad el acuífero (Pavelic *et al.*, 2006).

La calidad del agua de recarga determinará los pretratamientos mientras que su uso final condicionará los post-tratamientos. En principio, sólo se requiere desinfección cuando se destina a abastecimiento de consumo humano.

Los impactos ambientales potenciales vendrán condicionados por el tipo de agua y sus características químicas en función del pretratamiento aplicado.

En base a estas características del agua de recarga se propone agrupar los tipos de agua en tres categorías que serán los que se considerarán tanto en las solicitudes de autorizaciones como en el análisis de los aspectos legales. Estos tres tipos principales de agua de recarga son:

- Agua del río.
- Agua potable (acuífero, lluvia).
- Agua reutilizada (agua depurada, regenerada, retorno de riego y desalinizada).

3.3.4 Características del acuífero

En términos generales, el mejor acuífero para la recarga artificial es que cuenta con suficiente capacidad de almacenamiento, permite una elevada eficiencia de recuperación del agua inyectada y no supone un deterioro de la calidad del agua subterránea. Los acuíferos porosos acostumbran a ser más favorables que los fracturados y además, si se trata de acuíferos no confinados son los de menor coste (Steinel, 2012).

3.3.4.1 Geología y geometría del acuífero

Previamente a la caracterización hidráulica del acuífero se deben establecer las características geológicas del emplazamiento. Esto incluye definir las formaciones geológicas que forman el acuífero y a las cuales se desea aplicar la recarga artificial. Por lo tanto, es necesario conocer las profundidades de techo y muro de la formación, su extensión lateral, la presencia de fallas, entre otros. En base a esta información se puede desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero teniendo en cuenta los límites del mismo e identificando las principales zonas de recarga y extracción de agua subterránea.

La presencia de formaciones impermeables en profundidad en la zona no saturada pueden condicionar el tipo de recarga (por ejemplo, no es posible aplicar métodos de infiltración).

3.3.4.2 Consideraciones hidráulicas

Las dos características físicas principales del acuífero que determinan la viabilidad de un acuífero para recibir, almacenar y posteriormente recuperar agua son la conductividad hidráulica y la capacidad de almacenamiento. A estas dos propiedades se le suman el gradiente hidráulico y la geología del emplazamiento. Estos últimos tienen más incidencia en la recuperación del agua recargada que en el proceso de recarga.

Los mejores acuíferos son los que presentan elevadas conductividades hidráulicas y grandes capacidades de almacenamiento (Figura 3-4).

		Capacidad de almacenamiento		
		Baja	Moderada	Alta
Conductividad Hidráulica	Alta			
	Moderada			
	Baja			

Figura 3-4 Viabilidad de realizar recarga artificial en un determinado acuífero.

Fuente: Murray y Tredoux, 1998.

De todas maneras, los acuíferos muy permeables no son siempre ideales para la recarga artificial, ya que en caso de tratarse de un acuífero salino facilitaría la mezcla entre los dos tipos de aguas. Los acuíferos con elevada conductividad y gradiente hidráulico elevado tampoco son recomendables, ya que el agua puede fluir lejos del punto de recarga y dificultar así su recuperación. Este problema puede ser aún más marcado en acuíferos fracturados, aunque esta agua puede recuperarse instalando pozos de extracción aguas debajo de la recarga o forzando un flujo inverso.

- **Conductividad hidráulica**

La conductividad hidráulica de una formación geológica define la habilidad de transmitir agua. Esta depende de una variedad importante de factores físicos. En los acuíferos arenosos incluye la porosidad, el tamaño de los granos y su distribución, la forma de estas partículas, entre otros. En los acuíferos en rocas de baja permeabilidad los factores que la determinan son la densidad, la distribución, la obertura y la tipología de fracturas.

La conductividad hidráulica tiene que ser suficiente tanto en la zona de inyección como en la zona de recuperación. En el caso de ambientes fracturados esto significa que las fracturas tienen que ser lo suficientemente extensas e interconectadas entre ellas. Una aproximación que se puede realizar para evaluar las propiedades hidráulicas de una formación es a través de los datos de rendimiento de los pozos existentes.

A modo aproximativo los rangos de conductividad hidráulica que se proponen son los que se presentan en la siguiente Tabla 3-6:

Tabla 3-6 Rango de conductividades hidráulicas (m/d).

Conductividad Hidráulica idónea	Entre 100 y 0,1
Conductividad Hidráulica Buena	Entre 1000 y 100
Conductividad Hidráulica Moderada	Entre 0,1 y 0,001 y >1000
Conductividad Hidráulica poco recomendable	< 0,001

Las mayores capacidades de almacenamiento se dan en acuíferos de materiales no consolidados intergranulares. Por lo tanto, los acuíferos aluviales y arenas son los más idóneos para el almacenamiento de grandes volúmenes de agua. Además, estas zonas son también adecuadas para procesos de infiltración y tratamiento a través del paso por la zona no saturada.

- **Gradiente hidráulico y direcciones de flujo**

El gradiente hidráulico indica la dirección hacia la que fluirá el flujo subterráneo una vez inyectado. Esta información es indispensable para situar los pozos de recuperación y de monitoreo. El gradiente hidráulico es directamente proporcional a la velocidad del flujo. Este parámetro es importante, porque afecta a la recuperación del agua recargada y condiciona el tiempo de residencia o tiempo de tránsito en el acuífero.

- **Capacidad de almacenamiento**

Las mayores capacidades de almacenamiento se dan en acuíferos de materiales no consolidados intergranulares. Su coeficiente de almacenamiento, el cual está relacionado con la porosidad, normalmente es de entre 1 y 3 órdenes de magnitud más elevado. Por lo tanto, los acuíferos aluviales y arenas son los más idóneos para el almacenamiento de grandes volúmenes de agua. Además, estas zonas son también adecuadas para procesos de infiltración y tratamiento a través del paso por la zona no saturada.

- **Volumen de almacenamiento**

El volumen de almacenamiento del acuífero depende de la permeabilidad de la formación hidrogeológica del acuífero, de la potencia de la formación, de la profundidad de la napa freática y del grado de confinamiento. Las formaciones que poseen mayor capacidad de almacenamiento son las no confinadas en materiales detríticos porosos poco consolidados. Si el nivel freático está muy cerca de la superficie del terreno se disminuye la capacidad de almacenamiento, al producirse la recarga se podrán generar impactos no deseados (por ejemplo, inundaciones de infraestructuras hidráulicas subterráneas, contaminación, anegación de tierras de cultivos y otros). En los acuíferos confinados, la capacidad de almacenamiento también es limitada por el aumento del nivel hidráulico y la estabilidad del nivel confinante. Si la permeabilidad es baja la capacidad de almacenamiento es también baja así como la velocidad de recarga. Es importante tener en cuenta que si esta velocidad es lenta aumenta el riesgo de colmatación. En algunos sitios, la colmatación se puede ver contrastada por la disolución de calcita si ésta se encuentra en el acuífero pero hay que tener en cuenta otros potenciales impactos (Pavelic *et al.*, 2007).

La **eficiencia en la recuperación** (que corresponde al porcentaje de agua inyectada respecto el volumen inyectado de la misma calidad) depende en gran medida del gradiente hidráulico, la homogeneidad de las características hidráulicas y de la salinidad del acuífero. Las menores tasas de recuperación se identifican en acuíferos fracturados y de doble porosidad donde los flujos preferenciales subterráneos son poco conocidos. En cambio, los acuíferos porosos más o menos homogéneos permiten predicciones más o menos fiables del movimiento del agua subterránea y por lo tanto es posible evaluar el grado de recuperación.

Si se utilizan acuíferos salinos hay que crear una zona de protección o de mezcla que actúan de barrera entre el agua recargada y al existente en el acuífero (Pyne, 1995). Si hay filtraciones hacia acuíferos inferiores o si la velocidad del flujo es muy elevada la eficiencia en la recuperación puede verse afectada y disminuida. En el segundo caso se podría solucionar colocando pozos de extracción aguas abajo. Cuando un acuífero no dispone de las propiedades hidráulicas adecuadas aún existe la posibilidad de llevar a cabo un proyecto de recarga artificial mediante presas de arena que contribuyen a la creación de un acuífero.

Tal y como se ha indicado, se considera que es un buen acuífero para implementar un sistema ASR cuando la recuperación del agua inyectada es del 90% en 180 días o del 75% en 480 días. Una zona poco adecuada es cuando la recuperación a 180 días es de menos del 75% (OCWP, 2010). De esta manera, se considerada que la recuperación es moderada cuando es de entre el 40 y 75% y no es recomendable cuando es inferior al 40% en 180 días.

Las **tasas de infiltración** dependen de la permeabilidad vertical y de grado de saturación del suelo y además pueden verse drásticamente reducidas debido a la colmatación superficial. Esta reducción puede ser de 2 o 3 órdenes de magnitud y generar una zona no saturada debajo de la balsa de infiltración (Bouwer *et al.*, 2001). Normalmente, las tasas de infiltración más típicas pueden variar entre pocos y muchos m/d en zonas de gravas y arenas, ser del orden decenas de cm/d en suelos arenosos y limosos y disminuir hasta pocos mm/d en zonas con arcillas o colmatadas. Hay que tener en cuenta que en algunas ocasiones pueden existir pequeñas capas de arcilla a cierta profundidad que limitarán la capacidad de almacenamiento al acuífero. Se considera que un rango de

infiltración mayor a 1 m/d es aceptable, pero si este disminuye de 0,5 m/d pasa a ser inviable (Ghayoumian *et al.*, 2007).

La infiltración normalmente sigue vías preferenciales y pocas veces se produce flujo de tipo *piston-flow*, especialmente cuando ya se ha formado una capa de colmatación. El flujo preferencial puede tener lugar a través de *mudcracks*, fallas, raíces, espacios de disolución, entre otros. Las zonas cársticas con elevada permeabilidad pueden ser zonas viables siempre y cuando la calidad del agua de recarga no comprometa la calidad de agua del acuífero (Murray, 2009).

Las **tasas y volúmenes de inyección** dependen básicamente de la permeabilidad horizontal del emplazamiento. Esta normalmente es 10 veces más elevada que la permeabilidad vertical. Además, la colmatación en los pozos puede reducir estas tasas de inyección de una manera notable debido tanto a procesos biológicos como químicos y físicos (Asano, 1985).

3.3.4.3 Estudios para la caracterización del acuífero y la zona de recarga

Para la caracterización de las diferentes propiedades del acuífero y de la zona de recarga será necesario llevar a cabo una serie de trabajos de campo enfocados a caracterizar el suelo, la geología, la hidrología, el clima, la calidad del agua, los usos del suelo y posibles presiones sobre el medio hídrico y otros.

- **Estudio topográfico**

Se recomienda realizar un estudio topográfico en la zona de estudio. En caso de tratarse de una balsa de infiltración, el estudio topográfico permitirá evaluar la posición de la balsa respecto al nivel piezométrico y el resto de puntos, al mismo tiempo que estimar el volumen disponible para la recarga. Además, en caso de pretender construir una infraestructura en el río, el estudio topográfico proporcionará la información para elegir la zona más idónea. Así mismo, permitirá disponer de valores más exactos en la elaboración de la cartografía piezométrica.

• **Estudio geológico e hidrogeológico**

Debe realizarse una evaluación de la geología tanto a nivel subterráneo para evaluar la tipología de formaciones como a nivel superficial. Este último debe permitir la identificación de posibles fracturas y las áreas de mayor potencial de infiltración. En la Figura 3-5 se presenta el flujograma recomendado para elaborar un estudio geológico.

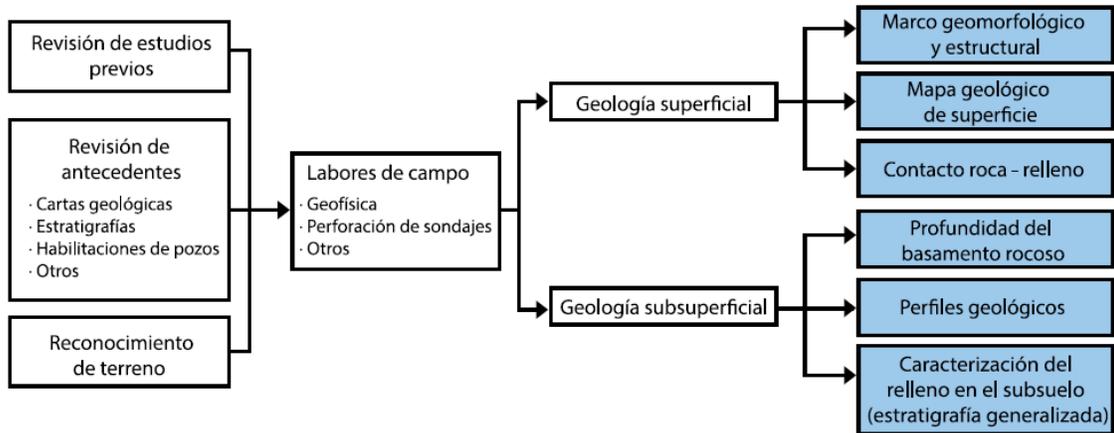


Figura 3-5 Flujograma recomendado para elaborar un estudio geológico.

Fuente: SEA (2012).

En términos generales, el mejor acuífero para la recarga artificial es que cuenta con suficiente capacidad de almacenamiento, permite una elevada eficiencia de recuperación del agua inyectada y no supone un deterioro de la calidad del agua subterránea. El estudio hidrogeológico debe enfocarse a la caracterización del acuífero y del sistema de flujo subterráneo con la finalidad de determinar la capacidad de almacenamiento, predecir su comportamiento y evaluar potenciales impactos. En la Figura 3-6 se presenta el flujograma recomendado para elaborar un estudio hidrogeológico.

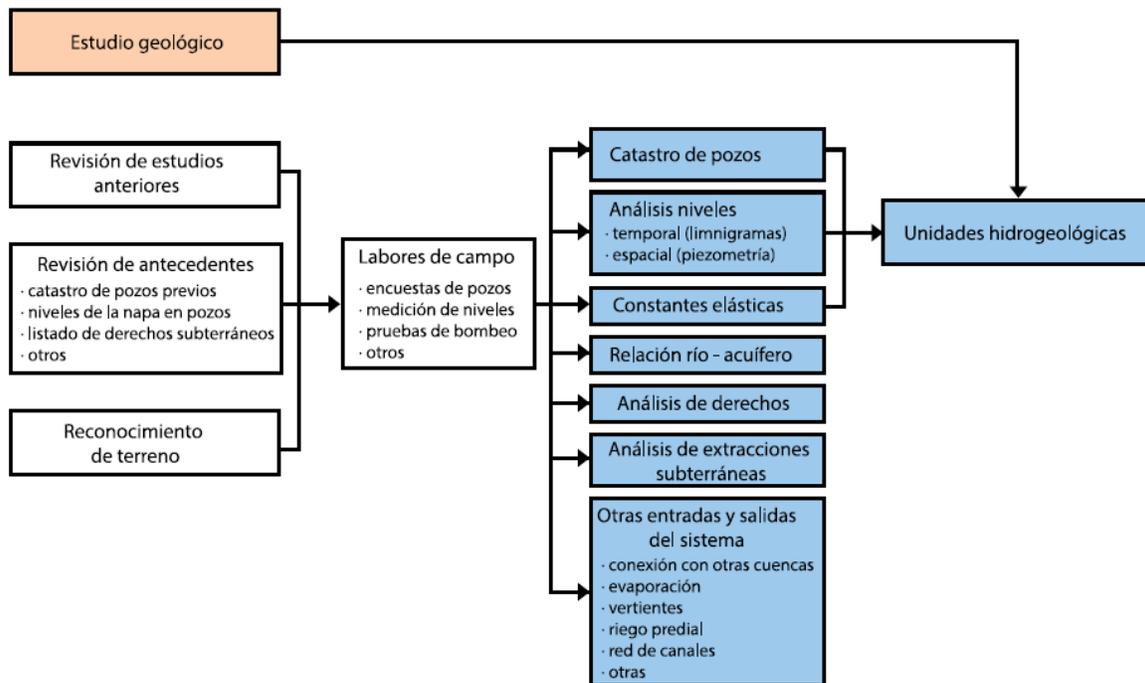


Figura 3-6 Flujograma recomendado para elaborar un estudio hidrogeológico.

Fuente: SEA (2012).

- **Muestras de suelo**

Con la finalidad de evaluar la viabilidad de la construcción del dispositivo de recarga se pueden recoger muestras de suelo y analizar sus características: tamaño del grano (como indicador del grado de erosión esperable y de la presencia de materiales de suspensión) y distribución de los diferentes tamaños de grano, porosidad y otros.

- **Muestreo de agua subterránea**

Previamente al inicio del proyecto es importante caracterizar el agua subterránea del acuífero donde se va aplicar la recarga artificial tanto aguas arriba como aguas debajo de la zona del dispositivo. Idealmente, debería disponerse de datos de durante un año con la frecuencia suficiente para identificar los posibles cambios estacionales (normalmente trimestral es suficiente). El muestreo debe cubrir tanto los elementos mayoritarios como los minoritarios y especialmente los metales y contaminantes más susceptibles a los cambios redox del medio (As, Fe, Mn y otros). Una vez iniciado el proyecto de recarga

debe continuarse el monitoreo del agua subterránea, a poder ser utilizando los mismos métodos, para poder evaluar posibles cambios en el agua subterránea. Más adelante se describen las características del monitoreo.

A continuación, se detallan todos los parámetros y aspectos que el estudio hidrogeológico debe caracterizar. El estudio hidrogeológico se basará en los valores de los parámetros hidráulicos evaluados en la fase previa, el análisis de los cuales se detalla a continuación:

- **Piezometría**

Los datos de la profundidad del nivel piezométrico son necesarios por varios motivos:

- Para estimar la capacidad de almacenamiento, tal y como se ha indicado.
- Para conocer la dirección el flujo y el gradiente hidráulico (que condiciona la velocidad del flujo).
- Para evaluar los cambios estacionales esperables en una determinada zona.

De esta manera, los datos piezométricos son indispensables en un proyecto de recarga artificial. Es recomendable disponer de datos de al menos un año antes de iniciar el proyecto para poder comprar posibles efectos del proceso de recarga (Steinel, 2012). También, permiten evaluar si es necesario realizar una recarga continua o si puede realizarse de manera estacional.

El gradiente hidráulico probablemente se verá afectado por el proceso de recarga. El gradiente natural es proporcional a la velocidad del flujo y permite evaluar los tiempos de tránsito del agua inyectada hacia un determinado punto.

La dirección del flujo subterráneo indicará la dirección de migración del agua recargada y por lo tanto condicionará la ubicación de los puntos de control. La evaluación de las zonas potencialmente afectadas por el proceso de recarga se basará en la dirección principal de flujo y su velocidad.

Si no se dispone de suficientes datos para evaluar el flujo subterráneo se pueden realizar ensayos de trazadores para identificar las direcciones de flujo, la velocidad y la porosidad (Kalbus *et al.*, 2006; Luhmann *et al.*, 2012). Con esta información se podrán situar los

pozos de extracción en las zonas de mayor eficiencia de recuperación y con el tiempo de tránsito deseado.

- **Cálculo de la recarga**

Es muy importante determinar correctamente este parámetro, ya que será el que determinará la sostenibilidad del sistema en temas ambientales y el mantenimiento de la instalación en términos económicos.

Determinar la cantidad de agua que finalmente llegará al acuífero y que podrá ser posteriormente recuperada no es un cálculo directo y debe considerar diferentes aspectos de funcionamiento. Esta estimación se basará en los resultados del resultado hidrogeológico el cual permitirá determinar los parámetros del acuífero.

Dada su importancia este valor se introducirá, calibrará y evaluará en el posterior modelo numérico de flujo subterráneo de la zona.

- **Estudio geofísico**

Si se desconoce la estructura y geometría del acuífero objeto del estudio pueden aplicarse métodos geofísicos para su caracterización. Los límites del acuífero son básicos para evaluar la capacidad de almacenamiento y por consiguiente, la viabilidad del proceso de recarga. Adicionalmente, se utilizan para caracterizar la heterogeneidad espacial del acuífero y para identificar la presencia de niveles impermeables en profundidad que podrían limitar la infiltración desde la superficie.

En caso de tratarse de un acuífero con intrusión salina, estos métodos de estudio también ofrecen soluciones para identificar la posición de la cuña salina y sus variaciones anuales.

- **Piezómetros**

Si no dispone de puntos de control suficientemente cercanos, se recomienda la construcción de piezómetros de control. Estos servirán para la caracterización y testificación en detalle de los materiales en profundidad, para la caracterización del agua subterránea antes de la inyección y para el monitoreo durante el proyecto. El agua recargada se moverá en tres dimensiones y probablemente se desplazará a diferentes profundidades con diferentes velocidades. Por este motivo, es recomendable disponer de

más de un piezómetro de control y a diferentes profundidades de muestreo para evaluar la eficiencia del proceso en la vertical.

En caso de existencia de capas impermeables, la testificación del sondeo dará información detallada al respecto.

La construcción de nuevos piezómetros permitirá realizar un análisis de los componentes geoquímicos que pueden interaccionar con el agua de recarga. Esto puede ser más importante en el caso de utilizar agua regenerada, ya que se recomendaría realizar una modelización geoquímica para evaluar potenciales reacciones (especialmente de disolución y precipitación) que el agua tratada puede provocar en la matriz del acuífero y que podrían suponer un riesgo para el funcionamiento del dispositivo del recarga.

- **Ensayos de bombeo**

Este tipo de ensayos es el más ampliamente utilizado para determinar las características hidráulicas de un acuífero. Consiste en la extracción de agua de manera continuada o escalonada en un pozo y la monitorización del caudal de extracción y de los niveles piezométricos en el mismo pozo de extracción y en pozos cercanos. La ejecución de las pruebas de bombeo permite por un lado estimar la cantidad de agua que puede extraerse de un pozo bajo condiciones previamente establecidas y por otro lado determinar las propiedades hidráulicas de un acuífero, para poder predecir posteriormente su comportamiento bajo situaciones diversas, evaluar la disponibilidad de recursos de agua subterránea, entre otros. Idealmente, se recogerán datos de más de un punto de observación. La variación del nivel freático en estos puntos como resultado de la extracción de agua en el pozo principal permitirá estimar la permeabilidad, grado de comunicación entre zonas acuíferas, la transmisividad, existencia de barreras o bordes impermeables y el coeficiente de almacenamiento del acuífero, si es el caso.

- **Tensiómetros y sondas de disipación de calor**

La instalación de estos dos tipos de dispositivos cerca de la zona de infiltración pueden aportar información sobre el movimiento del agua subterránea y la recarga a través de la zona no saturada (Izbicki *et al.*, 2008).

- **Tests de infiltración**

Uno de los parámetros más importantes para la viabilidad de un proceso de recarga es la permeabilidad de la zona (Figura 3-7). La capacidad de infiltración de un suelo depende de la porosidad efectiva, la cual viene determinada por la distribución del tamaño de los granos y por la densidad de recarga. Las tasas de infiltración vienen controladas por la capa superior si bien se verán reducidas de una manera importante aún con finos niveles de colmatación. Además de la colmatación, el agua de recarga debe travesar la zona no saturada para llegar al acuífero y esto no siempre se produce. El agua almacenada en la zona no saturada puede evaporarse antes de su llegada al acuífero. Este proceso es habitual en zonas áridas.

La capacidad de infiltración se refiere a la infiltración superficial (transición desde la superficie al suelo) y a la circulación a través de la zona no saturada (Warburton, 1998). En el caso de acuíferos no consolidados, la permeabilidad vertical acostumbra a ser inferior a la permeabilidad horizontal debido a las heterogeneidades de las capas. Cualquier cambio en la distribución de los granos (colmatación, precipitación/disolución de minerales) tendrá una influencia directa en la permeabilidad (Pedretti *et al.*, 2012).

Los tests de infiltración son la mejor herramienta para estimar la capacidad de infiltración. Se utiliza un infiltrómetro de doble anillo y el procedimiento consiste en registrar la velocidad de infiltración de un volumen de agua delimitado por un anillo. Este anillo se encuentra dentro de otro anillo de mayores dimensiones al que se le mantiene un nivel de agua constante durante el test. Se recomienda realizar tests en diferentes ubicaciones y en cada una de ellas, realizar dos pruebas como mínimo para evitar estimar la permeabilidad con el terreno seco. De todas maneras, debido al hecho que la tasa de infiltración aumenta con la disminución del diámetro de los anillos debido al efecto de la dispersión horizontal, normalmente se obtienen tasas de infiltración sobreestimadas (Bouwer, 1986). Se recomienda utilizar un radio mínimo 40 cm para los suelos homogéneos y de 80 cm para los heterogéneos (Lai y Ren, 2006). Se ha observado que las balsas de infiltración pueden presentar tasas de infiltración tres veces inferiores a las obtenidas mediante el test (Bouwer, 1988).

La profundidad en la cual se considera que el agua recargada no se verá afectada por procesos evaporativos dependerá de la textura del suelo, aunque se estima del orden de

1,5 m para arenas arcillosas (Sorman *et al.*, 1997), de 3 m para aluviales en Omán (Haimerl, 2004) y de 4 m en aluviales arenosos en Paraguay (Tuinhof *et al.*, 2012).



Figura 3-7 Tests de infiltración.

- **Caudalímetros**

En los casos en que la recarga artificial utilice el agua de cursos superficiales y/o se base en estructuras en el mismo cauce es necesario disponer de datos de las variaciones anuales del caudal. El objetivo de esta información es:

- Evaluar la disponibilidad de agua que podrá ser recargada.
- Estimar los periodos de tiempo en que funcionarán los dispositivos.
- Dimensionar las estructuras de recarga.
- Evaluar el riesgo de crecidas.
- Analizar el comportamiento del río.

En la medida posible se recomienda recoger datos de caudal en diferentes puntos del río. Estos aforos diferenciales permitirán evaluar la capacidad de recarga o de drenaje actual del río y tener en cuenta los usos y procesos aguas abajo.

Existen diferentes métodos para estimar el caudal del río, más o menos automáticos. Se puede realizar mediante medidas de la lámina de agua, con molinetes, con sensores electromagnéticos, utilizando sensores de ultrasonido o con sensores Doppler.

- **Pluviómetros**

Para evaluar la recarga y especialmente en el caso de recarga en ríos, es muy útil disponer de datos de precipitación diaria (y horaria) del mismo emplazamiento. El uso de datos en tiempo real permite hacer predicciones sobre el funcionamiento del sistema y actuar en consecuencia.

- **Ensayo de trazadores**

Un ensayo de trazadores refleja el flujo de agua y el transporte de masa en un sistema hidrogeológico y permite caracterizar los procesos de transporte y transferencia de masa en los acuíferos estimando las propiedades del medio. Consiste en inyectar un elemento conservativo en el subsuelo y estudiar el tiempo que tarda en salir en otro punto (por ejemplo un pozo de extracción). Debe medirse la concentración del elemento inyección a intervalos de tiempo con el objetivo de identificar tanto la llegada al punto de observación como el momento de máxima concentración así como la cola de la disminución de concentración. Es importante caracterizar primero el agua de la zona para no inyectar ningún elemento trazador de manera natural en el agua subterránea. Normalmente, los trazadores más habituales son haluros o sales y colorantes orgánicos (fluoresceína, rhodamina y eosina).

3.3.4.4 *Uso del acuífero*

El uso actual del agua del acuífero es riego, doméstico, agricultura, industrial, abastecimiento, mantenimiento de ecosistemas asociados, entre otros. En los dos últimos casos, se recomiendan consideraciones adicionales de protección de los recursos hídricos en caso de poner en marcha un proyecto de recarga. En caso de localizarse un pozo de abastecimiento municipal cerca de las instalaciones de recarga se recomienda llevar a cada un análisis de riesgo sobre la salud humana (Kazner *et al.*, 2012; NRMCC, 2009). Asimismo, en algunos países, si el acuífero en el que se quiere recargar agua no potable se utiliza para abastecimiento de la población, la recarga artificial está prohibida o muy limitada.

Hay casos que se utilizan acuíferos que no se explotan por diferentes motivos (elevada salinidad, ubicación, entre otros) en los que la recarga de acuíferos puede considerarse una mejora ambiental y la normativa que rige esta práctica puede ser más laxa.

En el caso de instalar dispositivos de recarga en el río que favorezcan la recarga y disminuyan las aportaciones aguas abajo del río, se recomienda analizar qué uso se realiza a esa agua que no se recarga. Además, es aplicable a derivaciones de agua del río para zanjas o canales. En muchos casos, se tratará de aguas de crecidas que no son aprovechadas pero, en el caso de tratarse de río influyentes y que aguas abajo aportan agua a otros acuíferos deberá ampliarse el análisis hidrológico e hidrogeológico a estas zonas. De esta manera, se estimarán los balances hídricos pertinentes para asegurar la sostenibilidad del sistema hídrico aguas debajo de la zona de recarga.

3.3.5 Características del emplazamiento

La instalación de un dispositivo de recarga debe tener en cuenta las características físicas del emplazamiento.

El primer paso es analizar la técnica y el método de recarga en base a los factores que pueden verse condicionados en determinados emplazamientos:

- La necesidad y tipo de instalaciones auxiliares (decantadores, filtros, balsas de sedimentación, electrificación, sistema de inyección a presión, conducción, entre otros).
- Los métodos, equipos de control y seguimiento (caudalímetros, piezómetros, presión de inyección, toma de muestras, entre otros).
- Las instalaciones de transporte del agua de recarga (acequias, canales, tuberías, entre otros).

A continuación se recomienda comparar las características del emplazamiento con las requeridas para cada método:

- **Dimensiones del emplazamiento:** el espacio debe ser suficiente para albergar la infraestructura. En este sentido, las balsas de infiltración requieren disponer de mayor espacio que los pozos de inyección
- **Uso del suelo.** Los usos del suelo previos tienen que ser compatibles con la instalación de esta nueva infraestructura. Por ejemplo, no hay ningún problema para llevarlo a cabo en una zona agrícola si no hay extracciones cercanas importantes. Sin embargo, en caso de ubicarse cerca de un camping se recomendaría realizar un análisis de riesgo. La instalación de balsas de recarga

podría generar problemas de mosquitos que deberían evaluarse en caso de haber una población cercana.

- **Estructuras existentes.** Si en la zona existen determinadas estructuras, éstas pueden dificultar tanto la construcción de las balsas o pozos como su sostenibilidad a largo plazo.
- **Pendiente.** Los dispositivos de recarga artificial por infiltración tienen serios problemas de funcionamiento si se ubican en zonas con elevada pendiente, ya que no se dan las condiciones idóneas para su funcionamiento.
- **Propiedad del terreno.** En caso de necesitar adquirir el terreno conviene evaluar la actitud e intención del propietario del emplazamiento.
- **Accesibilidad.** Para facilitar las tareas de mantenimiento y explotación, la instalación debería ubicarse en una zona de fácil acceso. Se considera que en determinados casos es recomendable vallar el acceso a las diferentes líneas de trabajo y especialmente si se utiliza agua regenerada.

3.3.6 Complejidad del dispositivo

Tal y como se ha detallado en el apartado 3.2, existen diferentes tipos de dispositivos de recarga con infinitas combinaciones. Estos pueden abarcar desde un simple pozo de inyección-extracción a una balsa de recarga pasando por una presa en el río, riego en exceso, entre otros. La entidad responsable del mantenimiento y operación de la instalación debe contar con la experiencia demandada suficiente para poder realizar las tareas necesarias que aseguren la sostenibilidad de la instalación.

Para obtener el máximo provecho de la instalación de recarga artificial es necesario integrarla en la planificación integral de la gestión de recursos hídricos de una región. En función de las dimensiones y objetivos de la instalación, puede ser necesario tener en cuenta la gestión a nivel de cuenca e integrando recursos superficiales y subterráneos.

Por otro lado, la recarga aguas arriba puede tener implicaciones aguas abajo que deben ser planificadas y evaluadas en el marco de la gestión integrada. En el caso de estar relacionadas con infraestructuras de tratamiento de aguas o requerir tratamientos adicionales esta planificación conjunta se hace más evidente y aumenta la complejidad del sistema. Esta infraestructura de recarga entonces debe ser tratada con un elemento

individual dentro del sistema general de gestión y administrada por expertos en este tipo de instalaciones, ya que en algunos casos pueden requerir inspecciones semanales.

Se recomienda que los gestores de la instalación tengan conocimientos de (DWA, 2009):

- Hidrogeología de la cuenca y estudios hidrogeológicos.
- Gestión integral del ciclo del agua.
- Tecnología de recarga y recuperación.
- Calidad y tratamientos del agua.
- Ingeniería de abastecimiento.

3.4 Selección del tipo de dispositivo

En el apartado 3.2.2 se han descrito las características principales de los diferentes tipos de dispositivos que pueden aplicarse. Una vez caracterizado el medio, teniendo en cuenta las características descritas y según el esquema de la Figura 3-8 se procede a la selección del tipo de dispositivo más idóneo para la zona en concreto y los objetivos deseados.

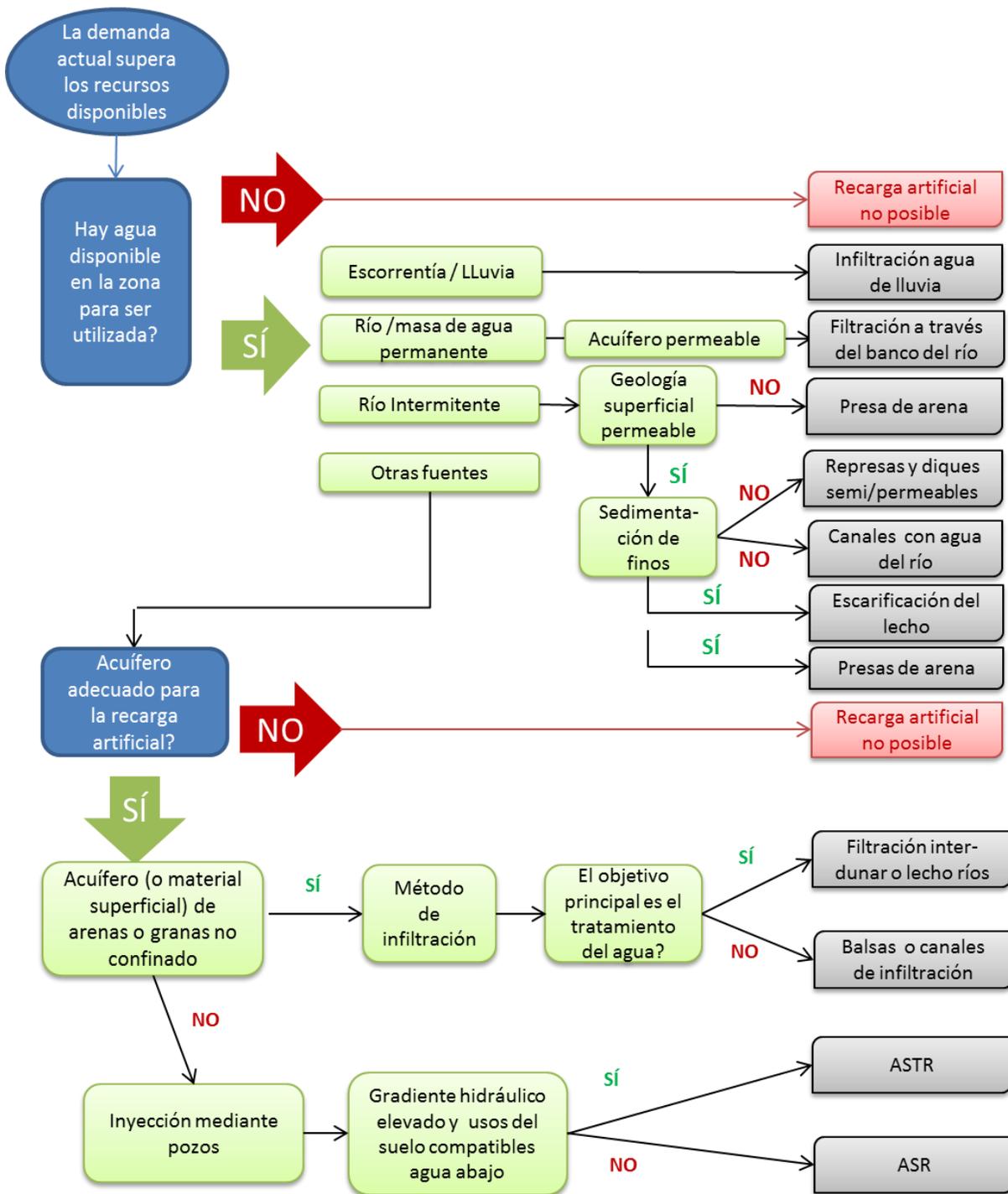


Figura 3-8 Diagrama de flujo para identificar el método o dispositivo de recarga más adecuado.

Fuente: Modificado de DWA, 2010.

3.5 Plan de operación y mantenimiento de un proyecto de recarga artificial

3.5.1 Técnicas de monitoreo y verificación de la efectividad de la recarga

Además de los criterios necesarios para un correcto diseño de un sistema de recarga, si se quiere asegurar un correcto funcionamiento del mismo, hay que diseñar un plan de monitoreo adecuado y considerar los aspectos de mantenimiento.

De esta manera y desde el inicio, en todos los proyectos de recarga artificial hay que contemplar un plan de muestreo y control que cumpla con los objetivos de:

- Proporcionar información detallada de la calidad del agua recargada.
- Demostrar la eficiencia de posibles tratamientos previos.
- Aportar información sobre la calidad del agua intrínseca del acuífero.
- Demostrar que no hay deterioro en la calidad del agua del acuífero y visualizar posibles mejoras.
- Monitorear la calidad del agua recuperada teniendo en cuenta el destino al que se quieran dedicar.
- Determinar la efectividad del dispositivo de recarga.

El monitoreo además de ser indispensable para evaluar el funcionamiento del proceso es una herramienta importante en el análisis de riesgo. El monitoreo empieza con la caracterización de la línea de base antes de la implantación del sistema de recarga. Este monitoreo debe cubrir tanto las variaciones temporales como espaciales y basarse en datos medios de calidad en un punto más que en *peak* de concentración que pueden no ser representativos del agua de recarga.

Los resultados del monitoreo del agua, una vez implementado el sistema, permiten evaluar los procesos de atenuación natural de los contaminantes y, esto es especialmente relevante, si estos procesos de atenuación natural son parte del tratamiento a través de la zona no saturada.

La cantidad y ubicación de los puntos de control dependerá tanto de las dimensiones del dispositivo de recarga como de su tipología.

Para la definición de la red de monitoreo hay diferentes pasos a realizar:

- Identificar posibles usos del agua en las inmediaciones de las instalaciones. De existir, deberían colocarse puntos de control en estas zonas.
- Evaluar la existencia de posibles ecosistemas relacionados. En tal caso, también deberían tenerse en cuenta en el plan de monitoreo.
- Elaborar el modelo conceptual de flujo subterráneo y posible modelo numérico. Debe situarse como mínimo un punto de control aguas de arriba de las instalaciones y dos puntos de control aguas abajo. La cantidad de los puntos de control dependerá del acuífero. Así, en un acuífero cárstico se recomienda la instalación de más puntos de control.

Los puntos de control situados aguas debajo de la instalación de recarga artificial tienen que tener en cuenta diferentes aspectos relacionados al tiempo de tránsito y la periodicidad del muestreo:

- **El tiempo de tránsito.** Este se calcula según la velocidad del flujo y la porosidad y permite estimar el tiempo que tardará el agua de recarga en llegar a este punto. Mientras más tiempo, más diluida estará el agua de recarga pero más degradados estarán los posibles contaminantes.
 - Se propone la colocación de un punto de muestreo a escasos metros del dispositivo de recarga. Su objetivo será el de evaluar el correcto funcionamiento de la recarga. Permitirá evaluar la efectividad y realizar ensayos de trazadores si es necesario.
 - El siguiente punto de muestreo se puede situar a un tiempo de tránsito de 30 días aproximadamente. A esta distancia no todos los compuestos son eliminados y el grado de dilución puede no ser aún muy significativo. A esta distancia se recomendaría instalar un punto que permitiese el muestreo a diferentes profundidades para poder analizar vías de circulación preferente.
 - Finalmente, un punto situado a 90 días de tiempo de tránsito debería contener concentraciones insignificantes de los contaminantes degradables.
- **La periodicidad de muestreo** dependerá de cada emplazamiento, aunque se recomienda iniciar con una periodicidad trimestral que puede luego espaciarse a cada seis meses si se hace coincidir con los dos periodos de aguas altas (épocas de lluvias que resultan en los niveles piezométricos más elevados) y aguas bajas

(época de menor precipitación y más evapotranspiración/extracción que dan lugar a los niveles piezométricos más bajos).

3.5.2 Evaluación de la dilución en los puntos de muestreo

Uno de los principales problemas en la evaluación tanto de la efectividad de la recarga como de la atenuación de la concentración de contaminantes es la dilución. Esto es la mezcla del agua de recarga con el agua del acuífero con cierta proporción, que en cierta ocasión, puede dificultar la identificación del comportamiento del proceso de recarga.

Básicamente, hay dos métodos para poder tener en cuenta este efecto y el proceso de recarga:

- **Los cambios en los niveles piezométricos** de los puntos de control serán un indicativo de la recarga. Sus variaciones y relación con las tasas de aplicación de agua darán una indicación del volumen recargado de manera efectiva.
- **Mediante el uso de componentes conservativos.** Si se tienen bien caracterizados los componentes conservativos del agua de recarga y del agua del acuífero antes de la infiltración, su concentración en agua de muestreo dependerá del grado de mezcla entre ambos tipos de agua. Por esta razón, se requiere disponer de como mínimo datos de un año de muestreo del agua del acuífero. Si la concentración de Cl o la salinidad en general es muy diferente entre ambos tipos de aguas, este puede ser un dato muy útil. Además, se pueden utilizar componentes minoritarios como el F, B, Br, Li, etc. o datos isotópicos (D y ^{18}O de las aguas del acuífero y de las aguas de recarga). Otra opción, es añadir algún trazador al agua de recarga. Esto será complicado en el caso de balsas debido a las concentraciones que se deben manejar, aunque podría realizarse en pozos de inyección. Se acostumbra a utilizar sales o trazadores colorimétricos.

3.5.3 Consideraciones ambientales: posibles contaminaciones eventuales y detección de impactos

La recarga artificial de acuíferos puede tener tanto impactos positivos como negativos para el medio ambiente si no se tienen en cuenta todos los factores.

Los mayores impactos ambientales están asociados con el aumento y disminución de los niveles piezométricos y con los potenciales cambios de la calidad del agua del acuífero (DWA, 2009). A continuación se indican los potenciales impactos negativos para estos cambios citados por esos autores.

- **Aumento de los niveles piezométricos**

- *Muerte de la vegetación.* La saturación del suelo por aumento del nivel freático puede provocar la muerte en determinadas plantas y la aparición de especies invasivas.
- *Afectación a infraestructuras.* El aumento del nivel freático puede conllevar la desestabilización de estructuras como carreteras o edificios, así como inundación de las mismas.
- *Contaminación.* El hecho que el nivel freático esté más próximo a la superficie aumenta el grado de vulnerabilidad del acuífero ante eventuales contaminaciones de actividades industriales, vertidos, interferencia con rellenos sanitarios, cementerios, entre otros.
- *Inundación.* El aumento de la napa piezométrica puede facilitar la inundación durante periodos de aguas altas debido a la saturación superficial y a la disminución de la capacidad de infiltrar.
- *Descargas a ríos, humedales u otros ecosistemas.* Determinados ecosistemas y los humedales son muy sensibles a cambios en la calidad del agua, temperatura del agua, pH, niveles de oxígeno, salinidad, turbidez y otros. Pequeños cambios en estos parámetros podrían tener impactos en los organismos y plantas de estos ecosistemas relacionados con el agua subterránea.
- *Salinización por aumento de la evaporación.* La salinidad en agua cercana a la superficie puede aumentar debido a la evaporación.

- **Descenso de los niveles piezométricos**

- *Humedales y ríos:* en función de la relación aguas superficiales – aguas subterráneas, el descenso de los niveles freáticos puede afectar los caudales de base del río y el mantenimiento de ecosistemas asociados aguas abajo o dependientes del nivel. Además, determinados ecosistemas se alimentan de las inundaciones que en caso de construir elementos de regulación en el río, éstas se verán reducidas.

- *Árboles*. Las raíces de los árboles más grandes pueden llegar hasta los acuíferos en determinados ambientes, ya que algunas pueden tener hasta 15 o 20 m (zonas de ribera especialmente). Si las raíces no llegan al agua subterránea pueden morir los árboles los cuales acostumbran a ser hábitats de pájaros y otros animales además de ayudar a evitar la erosión y desertificación en determinadas áreas.
- *Subsidencia del terreno*. En determinadas zonas, y especialmente con presencia de sedimentos no consolidados, el descenso acentuado del nivel freático puede conllevar la subsidencia del terreno. En zonas cársticas, pueden producirse procesos de dilución que resulten en la formación de sumideros y colapso del terreno.
- *Secado de pozos y sondeos*. El descenso puede afectar a otros usuarios de aguas subterráneas a los que se les pueden secar las captaciones o reducir el caudal de extracción.
- **Cambios en la calidad del agua**
 - *Colmatación*. Los cambios en la calidad del agua pueden conllevar a precipitación química o crecimiento microbiológico en pozos de recarga resultando en una disminución de la tasa de infiltración.
 - *Movilización de determinados componentes químicos*. Algunos elementos existentes en el acuífero como el As, Fe o Mn pueden moverse debido a cambios en la posición de la lámina de agua y con el cambio de las condiciones redox del acuífero. La disolución de estos elementos y su incorporación en el agua del acuífero puede tener importantes repercusiones para la salud humana según el uso del agua.
 - *Organismos del acuífero*. Los acuíferos existentes en el acuífero acostumbran a ser sensibles a los cambios de calidad del mismo. Este efecto es particularmente notable si se utilizan aguas tratadas o regeneradas. Por ejemplo, la presencia de cloro en el agua puede tener un impacto negativo sobre los microorganismos existentes.

3.5.4 Aspectos operacionales: colmatación o “clogging”

3.5.4.1 Proceso de colmatación

El mayor problema operacional al que se enfrenta la recarga artificial de acuíferos es la colmatación. Consiste en el proceso de acumulación de materiales sobre la superficie de infiltración del agua o en las paredes de los pozos de inyección. Su efecto es la reducción de la capacidad de la recarga por reducción de la permeabilidad del medio poroso como resultado de procesos físicos, biológicos y químicos (Custodio, 1986). Debido a este problema, se produce un aumento del nivel freático o una disminución de la tasa de infiltración. De esta manera, independientemente de la metodología de recarga, la colmatación puede tener un mayor impacto en el proceso de recarga, ya que puede requerir tratamientos adicionales al agua de recarga que repercutirán en un aumento de costes (Pérez-Paricio y Carrera, 1999).

Además, la colmatación es el principal factor que limita la vida útil de las instalaciones. Por ejemplo, las balsas de infiltración raramente tienen una vida útil superior a los 10 años (IGME, 2008).

Los mecanismos que afectan principalmente al proceso de colmatación son interdependientes entre ellos y es difícil distinguirlos. Los principales mecanismos de colmatación son (Pérez-Paricio y Carrera, 1999):

- Sedimentación de partículas en suspensión (colmatación física). Estas partículas pueden estar presentes en el agua de recarga o bien en el propio acuífero (Pavelic *et al.*, 1998).
- Crecimiento y muerte de bacterias, o biocolmatación, que se produce por la acumulación de las células microbianas y sus productos extracelulares (Baveye *et al.*, 1998).
- Precipitación y disolución de minerales, denominada colmatación mineral, que puede ser catalizada por poblaciones microbianas (Lluria *et al.*, 1991).
- Generación de gas (Olsthoorn, 1982) que puede producirse por motivos físicos como la disminución de presión o aumento de la temperatura o por entrapamiento de subproductos de procesos bacterianos.

- Compactación del nivel de colmatación que se desarrolla en la parte superficial de un sistema de recarga (Bouwer *et al.*, 2001).

Se identifican tres factores principales que son los que afectan al proceso de colmatación: la **velocidad**, la **turbulencia** y la **permeabilidad** (Ortiz, 2012). Estos factores definen las funciones de permeabilidad, el volumen de colmatación y la colmatación que permiten evaluar la variación de la permeabilidad en el entorno de las superficies de infiltración.

La **velocidad de flujo** es un parámetro de especial relevancia para el proceso de la colmatación, ya que condiciona la capacidad de arrastre o deposición de sólidos en suspensión en el medio granular. El concepto de velocidad real se refiere a las trayectorias de las moléculas de agua a través de la porosidad eficaz del acuífero.

En las balsas de infiltración, la velocidad horizontal de flujo es lo suficientemente baja como para permitir que las partículas decanten. Este proceso de sedimentación en el fondo de la balsa depende de factores como el tamaño, la densidad y forma de las partículas, o la viscosidad y densidad del fluido. Una vez alcanzada la base de la balsa de recarga, las partículas sólidas son arrastradas por advección-dispersión hacia el interior de la formación permeable. Este movimiento de flujo hacia el interior de la formación se cuantifica, mediante la Ley de Darcy que contempla el gradiente hidráulico, la permeabilidad y la sección. Este movimiento se considera decantación y no filtración por el hecho que el diámetro de los poros o de las granulometrías entre las arenas es mucho mayor que el de las arcillas. El tamaño de los finos es de unas 100 veces inferior a la granulometría de las arenas. La velocidad real que adquiere el flujo en estas circunstancias se obtiene a partir de la velocidad de Darcy y la porosidad eficaz del medio. Esta porosidad eficaz obliga que la velocidad real sea mucho mayor que la de Darcy.

La turbulencia o régimen de flujo depende de tres parámetros físicos: el tamaño medio de las partículas del medio poroso, la velocidad del flujo y la viscosidad dinámica del fluido. De esta forma, tamaños y velocidades suficientemente elevadas, así como viscosidades reducidas, son la causa de un posible régimen turbulento (Ortiz, 2012). Normalmente, el flujo en un medio poroso presenta una velocidad relativamente baja y por lo tanto presenta un régimen laminar. En las balsas de recarga el flujo suele mantenerse laminar (Ortiz, 2012).

Las velocidades aumentan en las proximidades de las rejillas de los pozos de bombeo donde disminuye la sección de paso del flujo. El flujo pasa entonces de laminar a turbulento y deja de cumplirse la ley de Darcy. La distancia a la cual el régimen pasa de turbulento a laminar marca el radio a partir del cual las partículas en suspensión pierden la energía suficiente y se acumulan en los espacios intergranulares de la formación permeable. Este límite de laminaridad es proporcional al caudal inyectado por metros de acuífero enrejillado y al diámetro medio de los granos del medio detrítico. Como ejemplo, para caudales de 4 l/s y diámetro de los granos de 0,12 cm, el radio es de aproximadamente 2 m. El radio prácticamente se duplica al duplicar el tamaño medio de los granos con este caudal (Ortiz, 21012). Se concluye que un menor tamaño de grano influye fuertemente en la permeabilidad de la formación, disminuyendo su valor y favoreciendo la acumulación de sólidos en suspensión del agua de recarga. Asimismo, los menores caudales de inyección implican disminuciones de la velocidad de flujo y fomentan la deposición de dichas partículas.

Finalmente, **la permeabilidad** permite cuantificar la capacidad de una formación de transmitir un fluido, con independencia de su estructura o forma geométrica (Iglesias, 2006). La permeabilidad puede ser efectiva (conductividad hidráulica) o intrínseca. La primera viene determinada por las características texturales del medio y por las propiedades del fluido, mientras que la segunda únicamente depende de las propiedades del medio como tamaño, forma y superficie de los granos. Ambas permeabilidades vienen condicionadas por el tamaño del grano de manera que, en caso de colmatación, ambas permeabilidades se verán reducidas.

La disminución de la permeabilidad puede relacionarse con la fracción de finos que se deposita en cada punto del espacio. Esta reducción puede evaluarse mediante la función de colmatación que relaciona el proceso de deposición con la pérdida de la velocidad.

Uno de los parámetros fundamentales para determinar la viabilidad de una operación de recarga artificial es la **concentración de sólidos en suspensión en el agua de recarga**. La magnitud de este valor depende del tipo de dispositivo empleado (superficial o profundo) y de las propiedades intrínsecas del medio (permeabilidad, porosidad eficaz, entre otros). Por lo general, en caso de importantes cargas de finos en el agua de recarga, las técnicas superficiales son más eficientes que las subterráneas (Pérez-Paricio, 2001).

Los límites de concentración para el caso de las balsas han ido variando a lo largo de los años. A mediados del siglo XX se apuntaban concentraciones de sólidos en suspensión inferiores a 300 ppm (Richter y Chun, 1959) para recarga directa y aquellas entre 300 y 1.000 ppm recomendaban someterlas a un proceso de floculación.

Actualmente, las operaciones de recarga artificial han recomendado trabajar con valores inferiores para aumentar la vida útil de los dispositivos. Según Pérez-Paricio (2001), las concentraciones de sólidos en suspensión superiores a 10 mg/l implican notables reducciones de la permeabilidad y que si se superan los 20 mg/l se hace necesaria una filtración previa del agua de recarga. En este sentido, Murillo *et al.* (2002) recomiendan utilizar aguas con contenidos en suspensión inferiores a 10-12 mg/l.

3.5.4.2 Mantenimiento y descolmatación

La prevención es el mejor método y el más económico para gestionar los procesos de colmatación (Martin, 2013). Este proceso se puede minimizar utilizando agua con bajas concentraciones de sólidos disueltos, gestionando el pH o extrayendo el oxígeno disuelto. De esta manera, controlando la calidad del agua de recarga se puede evitar el 50% de las causas de la colmatación, aunque seguirá siempre existiendo el riesgo de colmatación. El monitoreo continuo permitirá identificar si se está produciendo colmatación y de qué tipo e indicará el tipo de mantenimiento operacional más adecuado. El mantenimiento y las técnicas para descolmatar son diferentes para el caso de dispositivos de infiltración (balsas, canales, zanjas) de los pozos de inyección (AST y ASTR).

3.5.4.2.1 Dispositivos profundos con pozos de inyección

Cuando la recarga se realiza mediante pozos es necesario efectuar una adecuada caracterización del agua subterránea y de la matriz del acuífero para diseñar el pozo de manera pertinente. Además, es importante disponer de un plan de monitoreo adecuado. El diseño del pozo debe ser suficientemente flexible para permitir el uso de diferentes tecnologías de remediación en caso de colmatación. No obstante, hay que tener en cuenta que muchas veces están actuando diferentes procesos de manera simultánea con múltiples factores interrelacionados. Por ejemplo, la entrada de gas puede conducir a la precipitación de Hierro el cual puede estimular el crecimiento de bacterias consumidoras de Hierro. Las técnicas de remediación dependen mucho de las características del

emplazamiento. Algunas de las medidas preventivas que pueden considerarse en el caso de los pozos de inyección son (Martin, 2013) (Tabla 3-7):

- Selección de los métodos de perforación adecuados y de los fluidos que eviten el deterioro de la formación donde se emplaza.
- Correcta instalación del pozo y del sellado.
- Diseño adecuado del pozo para el acuífero objetivo.
- Realizar un lavado periódico (mediante extracción de agua) de los pozos de recarga, en función del tiempo y de los volúmenes infiltrados. Se recomienda bombear a caudal superior al de recarga.
- Eliminación del aire en el agua de recarga mediante eliminadores de oxígeno o añadiendo dióxido de carbono (CO₂).
- Eliminación en la medida posible de la posibilidad del entrapamiento de aire en la infraestructura de recarga.
- Adición periódica de componentes químicos que disminuyan la actividad microbiológica y de las algas.
- Ultrafiltración (tratamiento de membranas y ultravioleta) antes de la recarga al pozo.
- Pretratamiento con ósmosis inversa y ultrafiltración si se recarga con agua regenerada.
- Tratamiento químico que ayude en la floculación de los sedimentos en suspensión seguido de una ultrafiltración para mejorar la calidad del agua.
- Gestionar las presiones de inyección para evitar el fallo del acuífero y posibles fracturas.
- Tratamiento químico de las tuberías y pozos.
- Aplicar técnicas de raspado de pozos y tuberías después del tratamiento químico, si es necesario.
- Gestionar los valores de pH y de salinidad para evitar posibles reacciones geoquímicas subsuperficiales.

En el caso de dispositivos de recarga profunda se dispone de diferentes métodos de remediación una vez se produzca la colmatación:

- El método más usual y sencillo de descolmatación es el **bombeo intenso**, a veces intermitente, con un caudal superior al de recarga. Este flujo en el sentido inverso

al de la inyección suele arrastrar gran parte de las partículas que obturan los filtros.

- Cuando la colmatación es importante se acostumbra a proceder a un *Airlift*. Este método también sirve para el mantenimiento o limpieza. Si se aplica demasiado aire en el pozo de inyección se puede causar un colapso de la zona ranurada. Por esta razón, se recomienda empezar aplicándolo a la zona más superficial e irlo profundizando cuando se consiga un estado estacionario. En algunos casos, si hay acumulación de finos en la zona de las rejillas puede ser conveniente aplicar compuestos químicos previamente al aire comprimido. En la medida posible este aire no debería entrar en el acuífero.
- Otra opción es mediante bombas de vacío en el pozo que genera un movimiento de aire hacia la base del pozo por el tubo interior y su posterior ascenso por el espacio anular. El método es efectivo pero puede provocar que entre aire en el acuífero. No se puede aplicar si hay gravas en el espacio anular.
- La acidificación del pozo también elimina los materiales de colmatación si son particulados o procedentes de la actividad microbiana. Evitar la disolución de otros materiales que pueden aportar finos adicionales. Los ácidos que más comúnmente se utilizan son: HCl, HF, CH₃COOH (acético), HCOOH (fórmico), H₂NSO₃H (sulfámico) y ClCH₂COOH (cloroacético). No todos los ácidos se pueden aplicar en todos los casos y dependerá tanto de las características de la colmatación como del pozo o del acuífero. Los ácidos de actuación más rápida como HCl a veces no penetran suficientemente en la formación. En algunos casos se pueden añadir polímeros o surfactantes para reducir esta velocidad y conseguir una mayor penetración. En este sentido, se está evaluando el uso de ácido hidroxiacético el cual, además de no ser corrosivo, actúa más lentamente y es bactericida.
- Si la regulación lo permite se puede aplicar cloración al pozo (en concentraciones de entre 500 a 2.000 ppm). Junto con la cloración se aplica una agitación del agua y posteriormente hay que realizar un lavado del pozo.
- También se puede reperforar el pozo para aumentar su diámetro eliminando la colmatación de las zonas ranuradas y del espacio anular. Normalmente se aplica cuando los otros métodos no han funcionado.
- El raspado o rascar las paredes del pozo es una buena solución, aunque no siempre se dispone de las herramientas necesarias.

- La aplicación de calor al pozo ha demostrado que puede aumentar la efectividad de los procesos químicos e incluso, en algunos casos, puede ser suficiente para eliminar determinadas capas acumuladas.

Tabla 3-7 Técnicas de prevención de la colmatación y descolmatación en dispositivos de inyección.

DISPOSITIVOS DE INYECCIÓN	
MEDIDAS PREVENTIVAS	SOLUCIONES PARA DESCOLMATACIÓN
<ul style="list-style-type: none"> • Selección del método de perforación más adecuado y de los fluidos. • Sellado correcto del pozo. • Diseño adecuado para el acuífero. • Lavado periódico de pozos bombeando a caudal superior al de la recarga. • Eliminación del aire en el agua de recarga. • Adición periódica de componentes químicos. • Pretratamientos del agua: ultrafiltración, ósmosis inversa y/o tratamiento químico. • Gestión de las presiones de inyección. • Raspado de pozos y tuberías después de tratamiento químico • Control de los valores de pH y salinidad 	<ul style="list-style-type: none"> • Bombeo intenso. • Airlift. • Bombas de vacío. • Acidificación del pozo. • Cloración. • Reperforación del pozo. • Raspado de las paredes del pozo. • Aplicación de calor al pozo.

3.5.4.2.2 Dispositivos superficiales de infiltración

Los procesos de colmatación en balsas o canales suelen ser más sencillos tanto de diagnosticar como de prevenir y solucionar. Los factores que conducen a la colmatación en balsas son la calidad del agua de recarga, la textura de la balsa, su profundidad, la carga de sedimentos, la potencia del nivel colmatante y la vegetación. Estos factores pueden actuar conjuntamente o alternarse en el tiempo y en el espacio para contribuir al proceso de colmatación dificultando la identificación de la causa principal. El nivel de colmatación superior en las balsas suele tener un grosor máximo de 4 cm y suele estar

constituido por sólidos en suspensión, algas, microbios, polvo y sales (Hutchison *et al.*, 2013). Este nivel reduce la conductividad hidráulica hasta incluso en cinco órdenes de magnitud de manera que, por debajo de la balsa o canal, se crea una zona no saturada. En estos dispositivos, tal y como se ha descrito, se diferencian dos tipos de niveles de colmatación: el nivel superior que corresponde a la acumulación de algas, partículas, microbios, entre otros y encima de la superficie original del fondo de la balsa o canal; el nivel inferior corresponde a los sedimentos originales con sólidos orgánicos e inorgánicos atrapados en los poros.

Para prevenir los procesos de colmatación se proponen soluciones que atacan a los principales factores causantes de la misma:

- **Calidad del agua:**
 - Tratar el agua hasta los estándares de bebida permite evitar los procesos de clogging (Bouwer, 2002), aunque este elevaría notablemente los costes de la instalación.
 - Reducir la cantidad de sólidos en suspensión, la demanda biológica de oxígeno y la relación C/N. En este sentido, en Holanda y reino Unido no está permitida la recarga en balsas si la turbidez es más elevada de 2 NTU. En España, sólo se pone límite a la turbidez para recarga directa (pozos) y es también de 2 NTU. Muchas de las instalaciones de recarga cuentan con un valor máximo propio de recarga. El riego con aguas con una relación C/N elevada y/o con elevada Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) experimentan un aumento de la biomasa en el suelo
- **Tamaños de las partículas del medio.** En el corto plazo la formación del nivel de colmatación es más rápida en sedimentos de grano fino, pero la profundidad del nivel de colmatación será más elevada en los tamaños de grano más elevados. La reducción relativa de permeabilidad efectiva también será relativamente más elevada en los sedimentos de tamaño más grueso (Rodgers *et al.*, 2004).
- **Profundidad de la balsa.** Este parámetro tiene influencia en dos factores opuestos:
 - Si aumenta la profundidad entonces aumentará la tasa de infiltración, siempre y cuando el resto de factores no varía por aumento del gradiente hidráulico.

- El aumento de la profundidad conlleva un aumento de la compactación del nivel de colmatación provocando una reducción de la tasa de infiltración. Como consecuencia se prefieren profundidades moderadas del orden de 1 a 2 m.
- **Carga hidráulica.** La tasa en la que el agua se aplica sobre la superficie de recarga también es importante, ya que afecta a la extensión del clogging. Tasas de carga lenta pueden reducir la formación del nivel de colmatación (Siegrist, 1987). No obstante, se ha observado que a largo plazo la formación del nivel de colmatación es independiente de la tasa de recarga y la velocidad, por cual se recomienda aplicar el agua en ciclos.
- **Ciclos de carga.** Una de las técnicas que se ha observado más efectiva para restaurar la conductividad hidráulica de un dispositivo de infiltración y permitir que vuelva a niveles iniciales es mediante la aplicación de agua según ciclos de inundación-secado. Se obtiene mejores resultados que con el rascado del suelo (Houston *et al.*, 1999). Normalmente, se construyen dos balsas que se rellenan alternativamente para permitir el secado de una mientras la otra recarga. Durante el secado se rompe el nivel de colmatación recuperando su conductividad hidráulica.
- **Vegetación.** La presencia de vegetación disminuye la conductividad hidráulica del suelo especialmente en las zonas de humedales y se relaciona tanto a la presencia de las raíces como de las hojas de las plantas. No obstante, algunas plantas, pueden romper el nivel de colmatación con sus raíces.

En base a estos procesos se aplican una serie de técnicas de descolmatación o remediación para dispositivos de recarga por infiltración (IGME, 2008):

- Dejar secar la instalación de recarga. Esto contrarresta el hinchado de las arcillas restituyendo parte de la permeabilidad. En ocasiones se deja crecer la vegetación, cuyas raíces perforan y rompen el nivel de colmatación, facilitando así el paso de agua. En el caso de balsas de infiltración para poder realizar este proceso, se construyen dos balsas que se utilizan de manera alternativa.
- Se puede realizar una escarificación de la parte colmatada. Normalmente, la capa de colmatación es de pocos centímetros y este proceso puede realizarse con rastrillos, evitando así, que se altere la composición del filtro inferior de la balsa. Es recomendable realizar una escarificación de manera periódica y luego retirar

estos primeros centímetros que se van removiendo con periodicidad anual o bianual.

- Si la colmatación es profunda se recomienda extraer la zona colmatada e incluso el filtro de arenas si es el caso. Posteriormente se lava la zona y se vuelve a colocar un filtro para reanudar la operación.

4. Análisis legal de la recarga artificial

4.1 Normativa referida a la recarga artificial de acuíferos

Se encuentra establecida en los artículos 66 y 67 del Código de Aguas y en los artículos 47 a 50, ambos inclusive, del Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas del año 2013. Establece dos procedimientos diferentes que deben realizarse para poder extraer aguas con cargo a la recarga:

4.1.1 Procedimiento para ejecutar obras de recarga artificial

- Se tramita ante la DGA y exige su autorización expresa.
- No requiere declaración de área de restricción.
- Otorga preferencia para la constitución del respectivo derecho provisional.

4.1.1.1 Obtención del derecho de aprovechamiento:

En virtud del N° 2 del artículo 48 del Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas (Resolución N° 203 de 2013), corresponde mencionar que si bien el procedimiento para la ejecución de obras de recarga artificial exige contar con un derecho de aprovechamiento que faculte a extraer el agua que será recargada, no se exige ser dueño de él.

En consecuencia, quién interponga dicho procedimiento podrá haber adquirido el dominio del derecho de aprovechamiento en forma originaria (haberlo solicitado directamente a la DGA), o, derivada (haberlo comprado, rematado, o adquirido con posterioridad a su constitución).

Sin embargo, también, el solicitante podría no tener el dominio del derecho de aguas, pero sí tener algún título que lo faculte para su uso en el tiempo.

Dicho título deberá permitirle su uso, por a lo menos el tiempo estimado que puedan durar los procedimientos para ejecutar las obras de recarga y el posterior otorgamiento del derecho provisional con cargo a ella.

Dentro de estos títulos cabe mencionar un arriendo a largo plazo inscrito al margen de la inscripción de dominio del derecho de aprovechamiento (para que sea oponible a terceros); un usufructo constituido sobre él, u otro que le autorice su uso en el tiempo.

4.1.1.2 Definición de los tipos de derechos

La clasificación de los derechos de aguas y su definición legal se encuentra en los artículos 12 y siguientes del Código de Aguas.

Así, conforme al artículo 12, los derechos de aprovechamiento pueden ser consuntivos o no consuntivos; de ejercicio permanente o eventual; continuo, discontinuo o alternado entre varias personas.

Respecto de la consuntividad, el artículo 13 define el derecho consuntivo, como aquel que faculta a su titular para consumir totalmente las aguas en cualquier actividad.

El artículo 14, define al derecho no consuntivo, como aquel que permite emplear el agua sin consumirla y obliga a restituirla en la forma que lo determine el acto de adquisición o de constitución del derecho. Así, la extracción o restitución de las aguas se hará siempre en forma que no perjudique los derechos de terceros constituidos sobre las mismas aguas, en cuanto a su cantidad, calidad, substancia, oportunidad de uso y demás particularidades.

En cuanto a la permanencia del ejercicio, el artículo 16 establece que son derechos de ejercicio permanente los que se otorguen con dicha calidad en fuentes de abastecimiento no agotadas, en conformidad a las disposiciones del Código, así como los que tengan esta calidad con anterioridad a su promulgación. Los demás son de ejercicio eventual.

El artículo 17 agrega que los derechos de ejercicio permanente facultan para usar el agua en la dotación que corresponda, salvo que la fuente de abastecimiento no contenga la cantidad suficiente para satisfacerlos en su integridad, en cuyo caso el caudal se distribuirá en partes alícuotas.

El artículo 18 establece que los derechos de ejercicio eventual sólo facultan para usar el agua en las épocas en que el caudal matriz tenga un sobrante después de abastecidos los derechos de ejercicio permanente. El ejercicio de los derechos eventuales queda

subordinado al ejercicio preferente de los derechos de la misma naturaleza otorgados con anterioridad.

Por su parte, el artículo 19 señala que son derechos de ejercicio continuo los que permiten usar el agua en forma ininterrumpida durante las veinticuatro horas del día.

A continuación añade que los derechos de ejercicio discontinuo sólo permiten usar el agua durante determinados períodos.

Acto seguido, expresa que los derechos de ejercicio alternado son aquellos en que el uso del agua se distribuye entre dos o más personas que se turnan sucesivamente.

4.1.1.3 Requisitos de la solicitud

- Individualización del solicitante.
- Descripción del agua a recargar (su naturaleza física y su situación jurídica).
- Memoria técnica que debe incluir:
 - Descripción del proyecto de recarga (tipo de obras; plan de operación y mantenimiento; modelación de la recarga sobre la cantidad de aguas del sector hidrogeológico).
 - Descripción y características del sector de la recarga (geológicas e hidrogeológicas). Incluye zona no saturada; permeabilidad, almacenamiento, y geometría del sector; nivel del acuífero; y, calidad de aguas.
 - Características aguas que se infiltrarán (calidad).
 - Plan de monitoreo del sector, de su calidad de aguas, y, del caudal y volumen de recarga.
 - Plan de acción frente a eventual contaminación del sector.

4.1.1.4 Requisitos para la aprobación de obras de recarga artificial

- Cumplimiento normativa referida.
- Cumplimiento normas comunes de procedimiento.
- No provoque colmatación del acuífero.
- No provoque contaminación de las aguas.

4.1.2 Procedimiento de constitución del respectivo derecho provisional

Este derecho subsiste mientras persista la recarga.

No se transforma en definitivo.

4.1.2.1 Requisitos de la solicitud

- Cumplir requisitos del artículo 140 del Código de Aguas.
- Expresar que se constituye con cargo a la obra de recarga artificial ya aprobada en el sector hidrogeológico y adjuntar sus antecedentes.
- Por excepción, puede otorgarse en otro sector, siempre que esté claramente interrelacionado y su punto de captación esté en una zona directamente influenciada.

Lo anterior, no se refiere a extraer aguas desde otro punto de captación, sino al hecho que la preferencia que otorga la obra de recarga artificial aprobada, podrá considerarse en un sector hidrogeológico de aprovechamiento común distinto al sector que recibe la recarga artificial, siempre que esté claramente interrelacionado con el otro sector, y que él o los puntos de captación del derecho provisional se ubiquen en una zona directamente influenciada por la recarga artificial.

4.1.2.2 Requisitos para la constitución del derecho provisional

- Cumplimiento normativa referida.
- Cumplimiento normas comunes de procedimiento.
- Solicitante tenga obra de recarga aprobada y operando.
- Balance hídrico que permita definir el volumen adicional generado en el sector a causa de la infiltración.
- Que el ejercicio de este derecho no provoque perjuicios a otros derechos de aguas existentes.

4.2 Identificación de áreas donde la legislación permite la recarga artificial y áreas donde la prohíbe o restringe

4.2.1 Ámbito de aplicación

Conforme a la legislación aplicable, la recarga artificial procede en sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común.

De acuerdo a la letra g del artículo 54 del Reglamento sobre Aguas Subterráneas, un sector hidrogeológico de aprovechamiento común es un acuífero o parte de un acuífero cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión en forma independiente.

En otras palabras, respecto de la recarga, la Legislación atiende al funcionamiento independiente de un área o sector.

4.2.2 Características de las aguas a recargar

4.2.2.1 En cuanto a su naturaleza física

No existe aquí una restricción legal, por lo que en principio, en la recarga podría utilizarse cualquier clase de aguas, siempre que a lo menos permita mantener las características del respectivo sector hidrogeológico o en caso que las modifique, no afecte de un modo negativo dicho sector.

Esto significa que la recarga no disminuya la calidad, cantidad y/o nivel de aguas del sector; no perjudique o lesione su permeabilidad, almacenamiento, comportamiento, colmatación o contaminación; su zona no saturada; ni produzca riesgos de inundaciones o afecciones a terceros, entre otros.

De esta forma, cumpliendo dichas condiciones legales, y de acuerdo al artículo 22 del Códigode Aguas, podrían recargarse aguas existentes en fuentes naturales y en obras estatales de desarrollo del recurso, sobre las cuáles exista constituido un derecho de aprovechamiento.

Así, dentro de las fuentes naturales cabe mencionar las aguas superficiales, subterráneas, corrientes, detenidas, u otras que provengan directamente de la naturaleza.

Respecto de las obras estatales de desarrollo del recurso se encuentran los embalses del Estado.

4.2.2.2 En cuanto a su situación jurídica

Las normas que reglan la recarga sólo establecen que deben acompañarse los documentos necesarios para acreditar el dominio vigente del derecho de aprovechamiento, si así correspondiere.

Lo anterior permite interpretar que para recargar aguas, no es requisito ser propietario del respectivo derecho de aprovechamiento.

En consecuencia, cabe concluir que bastaría con que el solicitante tenga algún título sobre el derecho de aguas que asegure su uso en el tiempo, tales como un arriendo a largo plazo inscrito al margen de la inscripción del derecho; o un usufructo vitalicio.

4.2.2.3 En cuanto a la tipología de los derechos de aguas

Sobre este punto, si bien la ley no impone ninguna limitación, por lo que se hace necesario analizar cada tipo de derecho para poder establecer una conclusión.

4.2.2.3.1 Derechos consuntivos y no consuntivos

Atendida la esencia de ambos, se estima que en la recarga deben utilizarse derechos consuntivos (consumibles), porque el agua se extraerá de la fuente originaria y se inyectará a una fuente diferente (un determinado sector hidrogeológico de aprovechamiento común), mezclándose con las aguas de éste, lo que hace imposible la restitución o devolución de las mismas aguas a su fuente originaria.

De esta forma, cabe concluir que en la recarga no pueden usarse derechos no consuntivos (no consumibles).

4.2.2.3.2 Derechos permanentes y eventuales

Al respecto, si bien no existe una limitación legal, se considera que dados los estudios y análisis que implican los procedimientos para la ejecución de obras de recarga y la posterior constitución del derecho provisional, y las facultades que ellos otorgan a la DGA para imponer restricciones y/o suspenderla en cualquier momento en que faltare alguna de las condiciones exigidas, en los hechos se hace necesario que el derecho sea permanente.

A ello debe agregarse que un derecho eventual complicaría en demasía los estudios y análisis a realizar y la certeza de sus resultados.

A mayor abundamiento, cabe añadir que, en la práctica, generalmente los derechos eventuales tienen pocas posibilidades de ser usados.

4.2.2.3.3 Derechos continuos, discontinuos y alternados

Una situación similar a la anterior se aplicaría a esta clasificación de los derechos, pues si bien tampoco existe una limitación legal, se considera que dados los estudios y análisis que implican los procedimientos para la ejecución de obras de recarga y la posterior constitución del derecho provisional, y las facultades que ellos otorgan a la DGA para imponer restricciones y/o suspenderla en cualquier momento en que faltare alguna de las condiciones exigidas, en los hechos es necesario que el derecho sea continuo.

En este mismo sentido, debe agregarse que los estudios y análisis a realizar y la certeza de sus resultados, se complicarían mucho siempre y cuando se considere un derecho discontinuo, o un derecho alternado.

En caso de los derechos alternados o sujetos a turno, es del caso mencionar que en la práctica suelen sufrir bastantes cambios, lo que complicaría aún más el estudio y análisis de sus efectos en el sector hidrogeológico en que se recarguen.

4.3 Normativa ambiental

4.3.1 Ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

Al respecto, en principio se hace necesario establecer que una obra de recarga artificial no se encuentra incluida dentro de los proyectos o actividades mencionados en el artículo 10 de la Ley de Bases del Medio Ambiente.

En consecuencia, la sola ejecución de una obra de recarga artificial no exige ingresar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) contenido en dicha Ley.

Sin perjuicio de ello, es importante señalar que un proyecto de recarga artificial puede ingresar, además de la letra a) del artículo 10 de la Ley de Bases del Medio Ambiente, por la letra p) del mismo artículo 10, toda vez que la ejecución de obras, programas o actividades (entre las que se cuenta la recarga artificial de acuíferos) en áreas de protección oficial, deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Sobre este punto, recordemos que esta letra a) incluye los embalses de capacidad superior a 50.000 m³ o cuyo muro tenga más de 5 m de altura; los acueductos que conduzcan más de 2 m³/s; los acueductos que conduzcan más de 0,5 m³/s, que se proyecten próximos a zonas urbanas, y cuya distancia al extremo más cercano del límite urbano sea inferior a 1 km y la cota de fondo sea superior a 10 m sobre la cota de dicho límite; y los sifones que crucen cauces naturales.

Esta letra incluye también las presas, drenaje, desecación, dragado, defensa o alteración, significativos, de cuerpos o cursos naturales de aguas.

Asimismo, la ejecución de una obra de recarga artificial podría requerir ingresar al SEIA, en caso que forme parte de un proyecto o actividad de aquellos mencionados en el citado artículo 10 de la Ley.

Finalmente, considerando que el PAS 158 del Decreto N° 40 del SEIA establece que el permiso para ejecutar obras de recarga artificial de acuíferos, será el establecido en el artículo 66 del Código de Aguas, cuyo requisito para su otorgamiento consiste en conservar y proteger el acuífero, toda solicitud de obra de recarga artificial será evaluada por la DGA

4.3.2 Protección ambiental del respectivo sector hidrogeológico de aprovechamiento común

En cuanto a esta protección, y aun cuando una determinada obra de recarga artificial no deba ingresar al SEIA, atendidas las atribuciones que la actual legislación sobre recarga artificial otorga a la DGA, se estima que esta Dirección puede proteger en forma adecuada los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en que se pretenda ejecutar obras al respecto.

En este sentido, es muy importante realizar una línea de base de cada sector hidrogeológico o acuífero, para lo cual es esencial el monitoreo continuo. Los puntos a monitorear deben estar determinados en orden a controlar la cantidad y calidad del agua.

Este monitoreo puede realizarse con pozos existentes con el objetivo de facilitar la tarea. Éstos deben ser representativos de gran parte de los acuíferos y/o sectores hidrogeológicos y en especial, de los más relevantes en términos de vulnerabilidad.

5. Guía metodológica para presentar proyectos de recarga artificial

En este capítulo se presenta una propuesta de Guía metodológica para la presentación de proyectos de recarga artificial de acuíferos en Chile. La Guía establece los contenidos que debe tener cualquier tipo de solicitud de obra de recarga artificial o derecho provisional con cargo a la recarga que sea presentado ante la Dirección General de Aguas (DGA).

5.1 Proceso de solicitud de una obra de recarga y un derecho de aprovechamiento con cargo a la recarga

La Figura 5-1 muestra las principales etapas del proceso de solicitud de una obra de recarga artificial de acuíferos y el alcance de la guía dentro de dicho proceso. A continuación, en la Figura 5-2 se presenta el proceso de solicitud de un derecho de aprovechamiento de agua con cargo a la recarga artificial de acuíferos y el alcance de la Guía dentro de dicho proceso. Ambos procedimientos presentados en la Figura 5-1 y Figura 5-2 se explican en los apartados 5.3 a 5.7.

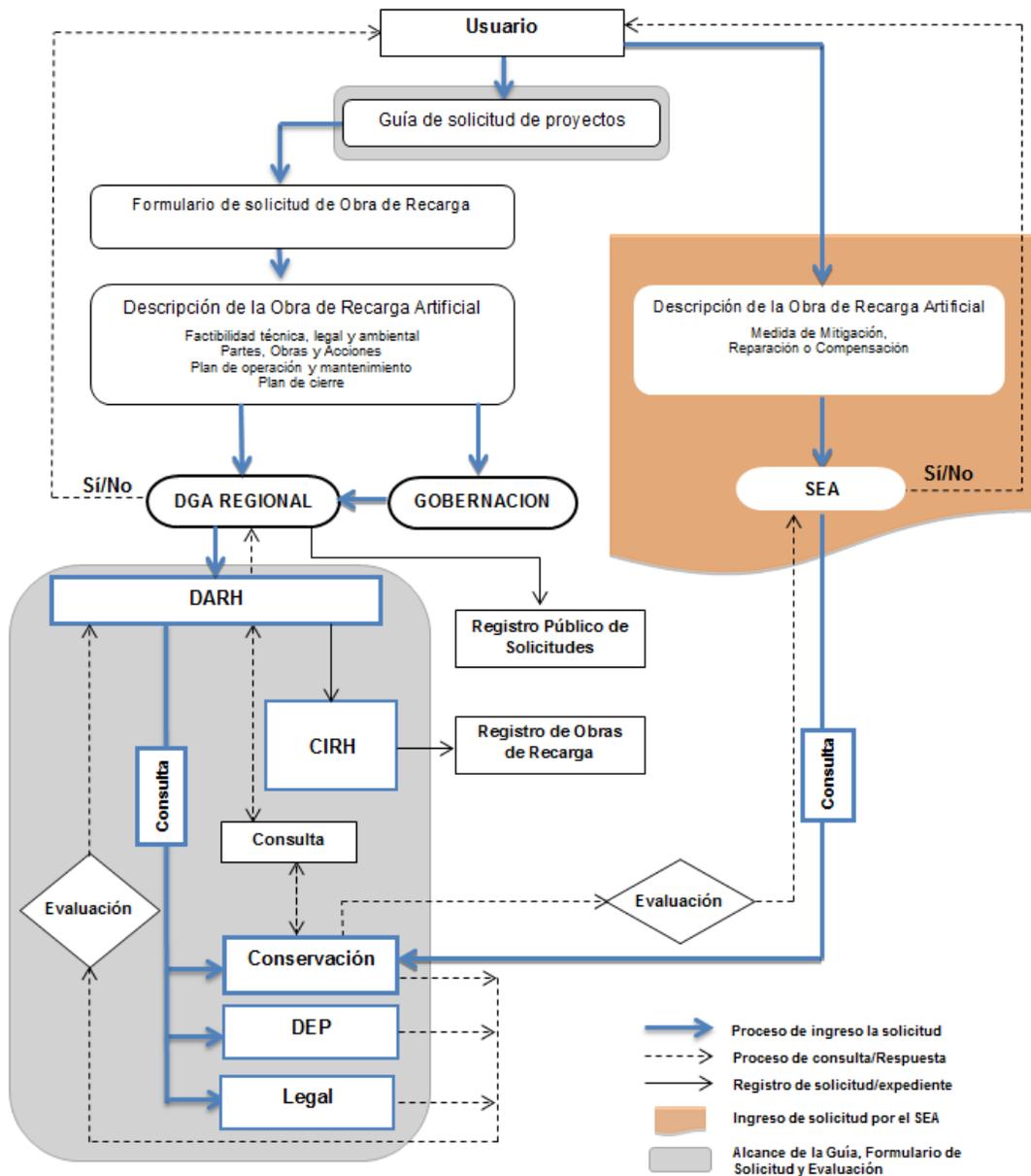


Figura 5-1 Alcance de las Guías Metodológicas en el proceso de solicitud de un proyecto de Recarga Artificial de Acuíferos (cuadro gris de la Figura).

A continuación se explica el mapa de proceso de **solicitud de un proyecto de recarga artificial de acuíferos** mostrado en la Figura 5-1:

1. **Solicitud de obra para la recarga artificial de acuíferos.** La pertinencia comienza con la posibilidad que tiene cualquier persona (en lo adelante “usuario”)

para ejecutar obras de recarga artificial de acuíferos en sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC) previa autorización por parte de la Dirección General de Aguas (DGA), en conformidad con lo dispuesto en el artículo 66 inciso 2° y artículos 67 inciso 1° parte final del Código de Aguas y lo establecido en el Reglamento N° 203 de 2013. El usuario confeccionará la solicitud de obra para la recarga artificial de acuíferos de acuerdo a la presente "Guía metodológica para presentar proyectos de recarga".

2. **Entrega de solicitud para obra de recarga artificial.** Una vez elaborado el proyecto u obra de recarga, el usuario tramitará la autorización de la solicitud para ejecutar la obra de recarga artificial de acuíferos ante la Dirección Regional. Sólo mencionar que el usuario podrá ingresar su solicitud bien sea por la oficina de partes de la DGA regional o por la Gobernación respectiva.
3. **Registro Público de solicitudes.** La Dirección Regional (DARH-DR) es la que lleva a cabo esta actividad una vez ingresada la solicitud. El registro de solicitudes está regido por el artículo 47 del Reglamento del Catastro Público de Aguas (CPA) con el objetivo de velar por el respeto de los derechos de preferencia de los solicitantes (DGA, 2008). La respectiva oficina de la Dirección del lugar en donde se presente la solicitud, deberá efectuar el registro de la misma, para los efectos antes señalados.
4. **Registro de Obras de Recarga.** Una vez recepcionada la solicitud en la Oficina de la DGA o en la Gobernación respectiva, deberá ser ingresada al subsistema de expedientes del Catastro Público de Aguas (CPA)³ por el operador regional o provincial, según corresponda. El subsistema CPA entrega en forma automática el código del expediente según la nomenclatura correspondiente. Este registro estará bajo la responsabilidad del DARH, quien velará por mantener actualizado el sistema y emitir reportes periódicos con la información más relevante acerca del movimiento de los expedientes en su unidad.

Es necesario que se ingrese la mayor cantidad de información posible de la solicitud en el CPA, en especial, identificación del solicitante; características generales de las obras de recarga a ejecutar (sector hidrogeológico, ubicación

³ El sistema CPA, es la base de datos desarrollada por la DGA y que tiene como principal orientación administrar la información relacionada con el seguimiento de solicitudes ingresadas a trámite del Servicio (DGA, 2008).

exacta, etc.); antecedentes del derecho de aprovechamiento cuyas aguas se recargarán (principalmente su naturaleza, caudal y punto de captación); antecedentes del derecho provisional a constituir con cargo a la recarga; y, los demás que se estimen pertinentes.

5. **Procesos posteriores.** Estos procesos corresponden a: **publicaciones y aviso radial, oposiciones, revisión formal, solicitud de antecedentes técnicos y legales, solicitud de fondos, inspección a terreno, elaboración de informe técnico, etapa resolutive, recursos de reconsideración y reclamación.**

En relación a la **solicitud del derecho de aprovechamiento con cargo a la recarga** mostrado en la Figura 5-2, el procedimiento es el mismo que el proceso de solicitud de una obra de recarga artificial, ya que la constitución del derecho de aprovechamiento con cargo a la recarga es una etapa posterior de la obra de recarga ya autorizada por la DGA. El Usuario no podrá realizar la solicitud del derecho sin antes disponer de una "experiencia o proyecto piloto"⁴, cuya resolución dependerá de los resultados de la misma.

⁴ El proyecto piloto es una instalación de carácter temporal (mínimo un año) y de volúmenes inferiores al de la operación a escala industrial.

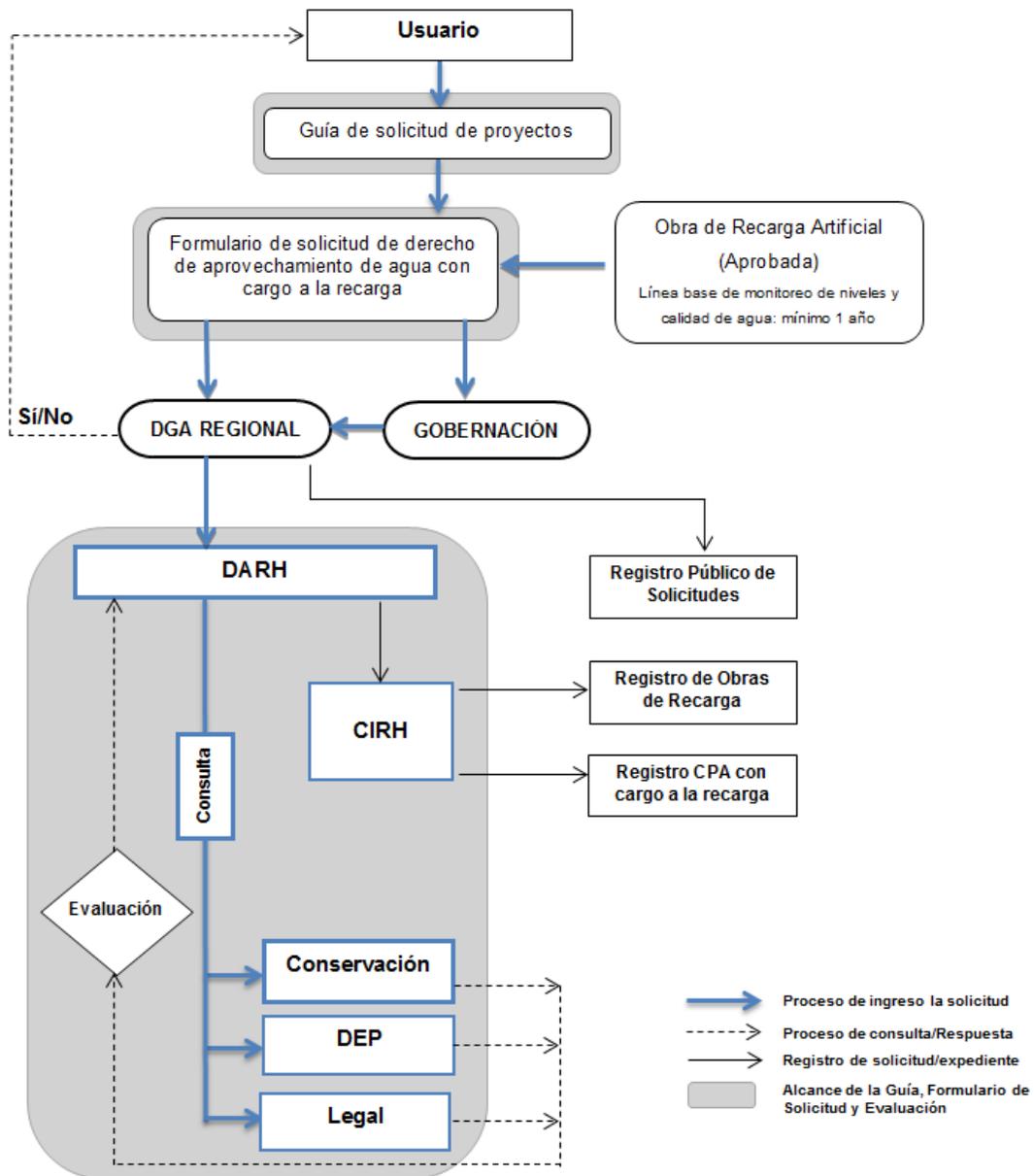


Figura 5-2 Alcance de las Guías Metodológicas y Formulario en el proceso de solicitud de un derecho de aprovechamiento de agua con cargo a la Recarga Artificial de Acuíferos (cuadro gris de la Figura).

5.2 Funcionamiento interno de DGA en el proyecto de recarga artificial

Se ha realizado una recopilación y análisis de información de carácter administrativo legal, con el objetivo de definir las funciones de cada una de las unidades de la DGA en el proceso de evaluación tanto de un proyecto de recarga artificial como de una solicitud de derechos de aprovechamientos de agua con cargo a la recarga⁵. Dichos documentos corresponden principalmente a Resoluciones y Decretos que delegan facultades, los cuales se presentan a continuación:

- Decreto MOP N° 12 del 29 de Enero de 1992, que establece la organización y funciones de la Dirección General de Aguas. En este decreto se abordan las siguientes unidades de la DGA: Subdirección; Hidrología; Estudios y Planificación; Conservación y Protección de recursos Hídricos; Administración y Secretaría General; Administración de Recursos Hídricos; Legal y Direcciones Regionales.
- Resolución DGA N° 980 del 12 de Mayo de 1995, que crea el Centro de Información de Recursos Hídricos. Este acto administrativo entrega y define los objetivos y funciones de la unidad que se crea.
- Resolución Exenta DGA N° 185 del 27 de Febrero de 2004, que crea la Unidad de Fiscalización de la Dirección General de Aguas y de la misma manera que otras resoluciones define sus objetivos y funciones.
- Resolución DGA N° 336 del 24 de Septiembre de 2007, que establece texto de resolución que dispone las atribuciones y facultades que son delegadas a los directores regionales.
- Resolución Exenta DGA N° 1043 del 30 de Abril de 2008, que crea la unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas. En este acto administrativo, también se entregan los objetivos de la unidad así como las funciones.
- Resolución Exenta DGA N° 3512 del 18 de Diciembre de 2008, que crea la Unidad de Auditoría Interna de la Dirección General de Aguas.

⁵ El funcionamiento interno de la DGA en el proyecto de recarga artificial está representado por el cuadro gris de las Figuras 5-1 y 5-2.

- Resolución DGA N° 1189 del 12 de Abril de 2011, que crea la unidad organizaciones de usuarios y Eficiencia Hídrica de la Dirección General de Aguas, asimismo se entregan los objetivos y funciones de dicha unidad.
- Resolución DGA N° 56 del 27 de Septiembre del 2013, que establece un nuevo texto de resolución que dispone las atribuciones y facultades que se delegan a los Directores Regionales del Servicio, dejando sin efecto una serie de resoluciones anteriores, entre ellas la Res. 336 del 24 de Septiembre de 2007.
- Resolución Exenta DGA N° 3453 del 18 de Diciembre de 2013, que rectifica la resolución DGA N° 56.
- Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, HIDROMAS CEF Ltda. Diagnóstico y sistematización de información de planes de alerta temprana vigentes con condicionamiento de derechos. SIT N°336. Abril 2014.

Además de los documentos indicados anteriormente, se han realizado dos talleres conjunto de trabajo con las divisiones o departamentos de la DGA vinculadas en el proyecto de recarga artificial (DARH, DEP, Conservación, Fiscalización y División Legal), con el objetivo de incorporar el máximo de lineamientos internos de la DGA y facilitar el proceso de evaluación que rige un proyecto de recarga artificial. Dichos talleres han sido fundamentales para el desarrollo del estudio, ya que en ellos se han podido recoger la opinión técnica de cada unidad desde sus competencias y labores que realizan dentro de la DGA.

5.2.1 Facultades, funciones y atribuciones de las unidades de la DGA vinculadas en el proyecto de recarga artificial

5.2.1.1 Departamento de Administración de Recursos Hídricos – DARH

- **Funciones generales**

Las facultades, funciones y atribuciones que se indican para el DARH, se encuentran en el **Decreto Supremo MOP N°12, de fecha 15 de enero de 1992, específicamente en el Artículo N° 1, número 6).**

Dirimir técnicamente las materias de administración de recursos hídricos que se someten a pronunciamiento de la DGA, especialmente relacionadas con otorgamiento de derechos

de aprovechamiento y uso efectivo del recurso, sea en forma individual o por medio de organizaciones.

- **Funciones en el proyecto de recarga artificial**

Analizar y dirimir los aspectos técnicos relacionados con los procedimientos para la ejecución de obras de recarga artificial de acuíferos y la posterior constitución del derecho provisional con cargo a ella, sometidos al pronunciamiento de la DGA. Esta unidad es la responsable de evaluar, registrar y coordinar todos los proyectos de recarga artificial y la constitución del derecho con cargo a la recarga y consultar al resto de las unidades (DEP, DCPRH, DL, Fiscalización, etc.) de acuerdo a sus competencias en el tema.

5.2.1.2 Centro de Información de Recursos Hídricos – CIRH

- **Funciones generales**

El Centro de Información de Recursos Hídricos (CIRH), con objetivos en la línea de la documentación e información técnico-legal generada en la DGA, **se crea en 1995, a través de la Resolución DGA N°980 de fecha 12 de mayo 1995**. En dicha Resolución se establecen las siguientes funciones:

- a) Organizar y mantener actualizado el Catastro Público de Aguas (CPA), considerando los medios apropiados para tales efectos (mapas, cartas, fotogramas, microfilmación, planos, etc.).
- b) Organizar y mantener la documentación técnica y legal relativa al tema de recursos hídricos, y sobre jurisprudencia administrativa y judicial respecto de la legislación de aguas, generada por la propia DGA o recibida de Instituciones externas.
- c) Desarrollar, mantener y operar un Sistema de Información Administrativo (SIA) que permita coordinar la entrega de información proveniente de los Sistemas BNA, CPA existentes en el Servicio u otros sistemas a desarrollarse.
- d) Desarrollar y operar el sistema CPA, el cual deberá entregar toda aquella Información relativa a las tramitaciones de solicitudes presentadas ante este Servicio.
- e) Coordinar y canalizar la atención de consultas que se efectúen a la DGA en materia de información hidrológica, estudios proyectos de obras, registros de

usuarios y en general, cualquier tipo de documentación técnica que se requiera en materia de recursos hídricos.

- f) Realizar difusión y extensión de la labor de la DGA, particularmente en lo relativo a los servicios que entrega esta Dirección, relacionados con informes, estudios, catastro, cartografía, etc.
- g) Establecer convenios de intercambio de información con otros centros de documentación y proporcionar acceso a redes de información relevantes.
- h) En general, todas aquellas funciones que directa o indirectamente puedan relacionarse con las indicadas precedentemente.

- **Funciones en el proyecto de recarga artificial**

Organizar y mantener actualizado el Catastro Público de Aguas (CPA), en lo que respecta a las obras de recarga artificial de acuíferos aprobadas y los derechos provisionales constituidos con cargo a ella, la documentación técnica y legal respectiva, y la jurisprudencia administrativa y judicial generada sobre ella. Además, debe entregar toda aquella información sobre dichas clases de procedimientos, en tramitación ante la DGA.

5.2.1.3 Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos – DCPRH

- **Funciones generales**

Las facultades, funciones y atribuciones que se indican para el Departamento de Conservación, tienen su fuente legal, de la misma manera que otros departamentos y 419 divisiones también en el **Decreto Supremo MOP N°12 de fecha 15 de enero de 1992 (Artículo N° 1, número 4)**. Para esta Departamento el Decreto establece las siguientes funciones: “Proponer y desarrollar la política sobre conservación y protección de los recursos hídricos y coordinar las funciones que correspondan en estas materias a los distintos organismos y servicios públicos”.

Según HIDROMAS (2014), estas funciones han sido recogidas por el DCPRH en el Manual de Normas y Procedimientos para la Conservación y Protección de los Recursos Hídricos, S.I.T N°132, DGA de junio 2007, donde se señala que algunas de sus funciones (numeral 1.2.1 pág.11), están las siguientes:

- “Estudiar e investigar la calidad el agua para evitar su degradación.

- Evaluar la variable ambiental de la constitución de derechos de aprovechamiento de aguas.
- Evaluar proyectos ingresados al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.
- Analizar informes de monitoreo competentes a la DGA de acuerdo a la Resolución de Calificación Ambiental de proyectos aprobados.
- Apoyar Técnicamente a las Direcciones Regionales.”

- **Funciones en el proyecto de recarga artificial**

Proponer y desarrollar la política sobre conservación y protección de los recursos hídricos en los procedimientos y actuaciones relativos a la ejecución de obras de recarga artificial y la posterior constitución del derecho provisional con cargo a ella, específicamente en lo que respecta a la calidad del agua a recargar, su impacto en el acuífero en que se recarga y en el medio ambiente.

Es importante señalar que un proyecto de recarga artificial puede ingresar, además de la letra a) del artículo 10 de la Ley de Bases del Medio Ambiente, por la letra p) del mismo artículo 10, toda vez que la ejecución de obras, programas o actividades (entre las que se cuenta la recarga artificial de acuíferos) en áreas de protección oficial, deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. En consecuencia, la sola ejecución de una obra de recarga artificial no exige ingresar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) contenido en dicha Ley.

Considerando que el PAS 158 del Decreto N° 40 del SEIA establece que el permiso para ejecutar obras de recarga artificial de acuíferos, será el establecido en el artículo 66 del Código de Aguas, cuyo requisito para su otorgamiento consiste en conservar y proteger el acuífero, toda solicitud de obra de recarga artificial será evaluada por la DGA. Así, el Departamento de Conservación es la unidad responsable de evaluar aquellas “obras de recarga artificial” como medida de mitigación, reparación o compensación, toda vez que éstas ingresen desde el SEIA.

Sin perjuicio de la revisión que realice el Departamento de Conservación o las Unidades de Fiscalización y medio Ambiente Regionales (según corresponda) en el marco del SEIA, se recomienda que una vez que se reciba la solicitud de una obra de recarga artificial, esto sea notificado al DARH para que sea esta la unidad que coordine, registre y consulte

al resto de las unidades DGA (DEP, Legal, Fiscalización, etc), de acuerdo a sus competencias.

5.2.1.4 Departamento de Estudios y Planificación – DEP

- **Funciones generales**

Las facultades, funciones y atribuciones que se indican para la División de Estudios y Planificación, también se encuentran en el **Decreto Supremo MOP N°12, de fecha 15 de enero de 1992 (Artículo N° 1, número 3)**. El Decreto establece que la función de esta unidad es: “Investigar los recursos hídricos en lo que compete a la Dirección General de Aguas y establecer los lineamientos de planificación de su aprovechamiento”.

- **Funciones en el proyecto de recarga artificial**

Investigar los recursos hídricos y establecer los lineamientos de planificación, en las materias relativas a la recarga artificial de acuíferos y la posterior constitución de los derechos provisionales con cargo a ella. Esta unidad apoyará al DARH en evaluar el “Informe Técnico o Memoria Técnica” presentado por el Usuario tanto en la solicitud de obra de recarga artificial como en la solicitud de derecho de aprovechamiento con cargo a la recarga.

5.2.1.5 División Legal – DL

- **Funciones generales**

Las facultades, funciones y atribuciones de la División Legal, también se encuentran en el **Decreto Supremo MOP N°12, de fecha 15 de enero de 1992 (Artículo N° 1, número 7)**. En dicho Decreto se establecen las siguientes funciones: “Revisar los actos administrativos y legales que realiza la Dirección, en lo referente a la aplicación del Código de Aguas y al registro de organizaciones de usuarios; como también en la gestión administrativa del Servicio”.⁶

⁶ Si bien lo indicado se extrae del Decreto MOP, en la actualidad se encuentra delegada en las Direcciones Regionales la función de dictar actos administrativos en lo referente a la aplicación del Código de Aguas, por lo que son las Direcciones Regionales las que los revisan (HIDROMAS, 2014).

- **Funciones en el proyecto de recarga artificial**

Revisar los actos administrativos y legales que realiza la Dirección, en lo referente a la ejecución de obras de recarga artificial de acuíferos y la posterior constitución de los derechos provisionales con cargo a ella, para verificar que se ajusten a las normativa.

5.2.1.6 Unidad de Fiscalización

- **Funciones generales**

Las facultades, funciones y atribuciones para la Unidad de Fiscalización, están recogidas en la **Resolución DGA Exenta N°185, de fecha 27 de febrero de 2004**, que crea dicha unidad con objetivos y funciones respectivas. Esta Resolución, a diferencia de la definición de Funciones y Roles de otras Unidades, es firmada por el Director General de Aguas.

De acuerdo a HIDROMAS (2014), las funciones de la Unidad de Fiscalización, son de orientar, dirigir, normar y apoyar tanto a las Direcciones Regionales de este Servicio, como a otros organismos del Estado y a usuarios de agua en general en las siguientes materias:

- a) Proponer al Director General de Aguas políticas normativas y de fiscalización, relacionadas con la atribución de la DGA en el ámbito de la policía y vigilancia de las aguas en los cauces naturales de uso público.
- b) Coordinar las políticas que, dentro del campo definido, deberán llevar a cabo las Direcciones Regionales y los Departamentos de la DGA.
- c) Coordinar las funciones de las Direcciones Regionales, para la adecuada gestión de las referidas políticas.
- d) Coordinar las acciones de las Direcciones Regionales en las materias relacionadas con las atribuciones que le confiere a la DGA, el artículo 299, letras c) y d) del Código de Aguas.
- e) Apoyar y asesorar a las Direcciones Regionales de Aguas en las materias indicadas.
- f) Coordinar a nivel nacional las labores de policía y vigilancia de los cauces naturales de uso público y de super vigilancia de las organizaciones de usuario/as.

- g) Promover y coordinar la participación de las organizaciones de usuario/as, para una gestión eficiente y sustentable de los recursos hídricos.
- h) En general, todas aquellas funciones que directa o indirectamente puedan relacionarse con las indicadas precedentemente.

- **Funciones en el proyecto de recarga artificial**

Verificar el cumplimiento de las resoluciones y normas relativas a la ejecución de obras de recarga artificial de acuíferos y la constitución de los derechos provisionales con cargo a ella y proponer nuevas políticas al respecto. Además, esta unidad apoyará al DARH en la inspección de terreno, seguimiento y fiscalización de la obra de recarga artificial y la constitución del derecho con cargo a la recarga.

5.3 Procedimiento general de tramitación de solicitudes

5.3.1 Etapas de este procedimiento general

En general, las principales etapas de tramitación son:

1. Presentación de la solicitud.
2. Ingreso del expediente al Catastro Público de Aguas (CPA).
3. Publicaciones y aviso radial.
4. Oposiciones.
5. Revisión formal de solicitud.
6. Solicitud de antecedentes técnicos y legales.
7. Solicitud de fondos.
8. Inspección a terreno.
9. Elaboración de Informe Técnico.
10. Etapa Resolutiva.
11. Recursos de Reconsideración y Reclamación.

A continuación se describen cada una de estas etapas:

5.3.2 Primera Etapa: Presentación

Incluye tres partes:

- La solicitud.
- La documentación a acompañar a la solicitud.
- La presentación de la solicitud.

5.3.2.1 La Solicitud

Documento elaborado y firmado por el interesado o por el representante legal, en su caso, y dirigido al Sr. Director Regional o General de Aguas, según corresponda, el cual debe contener, a lo menos, los requisitos específicos establecidos por la normativa.

5.3.2.2 La Documentación a acompañar a la Solicitud

La frase "documentos a acompañar a cada solicitud" se refiere a: 1) los documentos a acompañar a la solicitud de ejecución de obras de recarga artificial contenidos en el artículo 48 del Reglamento N° 203 de 2013⁷ y 2) los documentos a acompañar a la solicitud de constitución del derecho de aprovechamiento provisional de aguas subterráneas con cargo a la recarga, que el artículo 50 del Reglamento 203, en su inciso 1º, parte final, reenvía o remite a los artículo 19 de dicho Reglamento, y en definitiva, al artículo 140 del Código de Aguas, que contiene los requisitos de la solicitud de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas.

Con respecto a cada solicitud, deben acompañarse los documentos exigidos por la normativa específica que regula dicho procedimiento.

Sin perjuicio de ello, existen algunos documentos de aplicación general, como los siguientes:

- En caso de actuar a través de un representante, debe acompañarse el poder para representar al peticionario, otorgado por escritura pública o instrumento privado

⁷ Para más información consulte el Decreto Supremo N° 203, de 2013, del Ministerio de Obras Públicas, aprueba reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas (publicado en Diario Oficial 07/03/14).

suscrito ante notario, cuya antigüedad no debe ser superior a 6 meses, contados desde la fecha de ingreso de la solicitud hacia atrás.

- En caso que el peticionario sea una persona jurídica, deben acompañarse sus antecedentes legales, además del certificado de vigencia, cuya antigüedad no debe ser superior a 6 meses, contados desde la fecha de ingreso de la solicitud hacia atrás.

5.3.2.3 La Presentación de la Solicitud

Conforme a las normas comunes de los procedimientos administrativos ante esta Dirección, la solicitud debe presentarse en la Oficina de Partes de la DGA del lugar **donde se localiza la obra de recarga o el punto de captación del derecho provisional con cargo a la recarga**. Si no existe la citada oficina en el lugar, deberá presentarse ante la Gobernación Provincial respectiva, dentro del horario de atención al público establecido por dichas reparticiones.

La presentación deberá estar debidamente firmada por el solicitante y el representante legal en su caso.

También puede presentarse a través del Sistema Electrónico de Solicitudes (SES), y consultar el estado de tramitación a través de su portal web (www.dga.cl). La página web contiene una guía para la presentación de solicitudes electrónicas, y un documento con los términos y condiciones de registro y operación de solicitudes electrónicas.

En el caso de las solicitudes presentadas en las Gobernaciones Provinciales, corresponderá a la Gobernación Provincial respectiva la recepción de las publicaciones de los diarios, el aviso radial, emitir el certificado que señala si se presentaron o no oposiciones y dar traslado a las oposiciones, si corresponde. Posteriormente, la Gobernación enviará la solicitud y los documentos adjuntos a la Oficina Regional de la DGA que corresponda, para su tramitación y resolución final.

El trámite ante la Dirección General de Aguas es gratuito, salvo que de conformidad a lo señalado en el artículo 135 del Código de Aguas, la Dirección estimare realizar inspección ocular, en cuyo caso determinará la suma que el interesado debe consignar para cubrir los gastos de esta diligencia.

5.3.3 Segunda Etapa: Ingreso del expediente al catastro público de aguas (CPA)

Una vez recepcionada la solicitud (ya sea de la obra de recarga o del derecho de aprovechamiento con cargo a la recarga) en la Oficina de la DGA o en la Gobernación respectiva, deberá ser ingresada al subsistema de expedientes del Catastro Público de Aguas (CPA) por el operador regional o provincial, según corresponda.

El subsistema CPA entrega en forma automática el código del expediente según la nomenclatura correspondiente.

Es necesario que se ingrese la mayor cantidad de información posible de la solicitud en el CPA, en especial: identificación del solicitante, características generales de las obras de recarga a ejecutar (sector hidrogeológico, ubicación exacta, etc.), antecedentes del derecho de aprovechamiento cuyas aguas se recargarán (principalmente su naturaleza, caudal y punto de captación), antecedentes del derecho provisional a constituir con cargo a la recarga y otros datos que se estimen pertinentes.

5.3.4 Tercera Etapa: Publicaciones y aviso radial⁸

La solicitud o un extracto de la misma, que contenga los datos necesarios para una acertada inteligencia de la solicitud, deberá publicarse dentro de los 30 días siguientes a la fecha de su presentación, por una sola vez en el Diario Oficial el día 1 o 15 de cada mes, o el primer día hábil si aquellos fueren feriados, y además, en forma destacada en un diario de Santiago.

Las presentaciones que no correspondan a la Región Metropolitana, se publicarán además, en un diario o periódico de la provincia respectiva, y si no lo hubiere, en uno de la capital de la región correspondiente.

En relación a la rectificación de publicaciones, estas deberán realizarse dentro del plazo de 30 días contados desde la fecha de la presentación de la solicitud primitiva y siguiendo las reglas de los artículos 130 y siguientes del Código de Aguas.

Sólo se aceptan las rectificaciones fuera del plazo antes mencionado, en el entendido que los errores en la publicación original no sean imputables al solicitante y que "no alteren la

⁸ Análisis realizado a partir de los artículos 130-134 del Código de Aguas

solicitud del peticionario ni pretendan salvar una omisión de la misma, sino que por el contrario resguarden que entre ella y la información proporcionada a los terceros haya correspondencia y armonía” y que, para ello, en la rectificación “se identifique la publicación original con el número de la edición, fecha y nombre del peticionario y datos relativos al cuerpo, página y columna”.

Adicionalmente, la solicitud o un extracto de la misma, que contenga los datos necesarios para su acertada inteligencia, deberá difundirse dentro de los 30 días siguientes a la fecha de su presentación, por medio de tres mensajes radiales, los cuales se deberán realizar los días 1 o 15 de cada mes, en cualquier horario entre las 8:00 y las 20:00 horas.

La difusión de los mensajes radiales deberá efectuarse en alguna de las radioemisoras que figuren en el documento denominado “Listado de Radioemisoras”, que tenga cobertura en la provincia a que se refiere la respectiva presentación, o en su defecto, en una radioemisora con cobertura en la capital de la región correspondiente. El documento “Listado de Radioemisoras” elaborado y actualizado por la Dirección General de Aguas, se encuentra disponible en las oficinas de la DGA y en la página web del Servicio (www.dga.cl).

La acreditación de la difusión de los mensajes radiales, se realizará mediante un Certificado de Difusión Radial en que conste; que el aviso fue emitido por a lo menos tres veces, con indicación de hora, día, mes y año de cada emisión, el texto efectivamente difundido y el nombre, frecuencia y domicilio del medio radial, suscrito por el representante de la emisora o por la persona facultada para ello.

Los gastos que demanden las respectivas publicaciones y avisos radiales de las presentaciones son de exclusiva responsabilidad del peticionario, así como el tenor y contenido de las mismas.

El solicitante deberá hacer llegar a la oficina en que se realizó la presentación de la solicitud en un plazo de 15 días calendarios, contados desde la fecha de la última publicación, las hojas enteras originales de los periódicos en que se realizaron las publicaciones. En su defecto, también se aceptarán fotocopias de la página completa del diario en que se realizó la publicación (debe aparecer claramente la fecha y el nombre del

periódico), autenticada ante notario. La entrega del Certificado de Difusión Radial, deberá presentarse en el mismo plazo y condiciones.

5.3.5 Cuarta Etapa: Oposiciones

Los terceros que se sientan afectados en sus derechos, de acuerdo a lo establecido en el Artículo 132 del Código de Aguas, podrán oponerse a la presentación dentro del plazo de 30 días corridos contados desde la fecha de la última publicación.

Dentro del 5º día de recibida la oposición, la autoridad (DGA o Gobernación Provincial) dará traslado de ella al solicitante, para que éste responda dentro del plazo de 15 días. En caso de no recibir respuesta al traslado, se resolverá la oposición con los antecedentes en poder del Servicio.

La oposición deberá resolverse mediante una resolución regional exenta que debe ser notificada o comunicada, según corresponda, al solicitante y al opositor.

Vencido el plazo de 30 días corridos contados desde la fecha de notificación o comunicación de la resolución, se deberá emitir, si corresponde, un Recurso de Reconsideración.

Por el contrario, si vencido el plazo de 30 días calendarios contados desde la fecha de la última publicación o difusión radial no se hubieran presentado oposiciones, se emitirá el Certificado de No Oposición correspondiente. Es responsabilidad de la oficina en que se ingresa la solicitud, emitir el certificado de no oposición correspondiente.

5.3.6 Quinta Etapa: Revisión formal

En la revisión formal, que debe realizarse en forma oportuna, corresponderá el chequeo de:

1. Los contenidos mínimos de la solicitud de acuerdo a la normativa específica.
2. La verificación de la documentación que se debe acompañar a la solicitud.
3. La correspondencia entre lo señalado en la solicitud y lo publicado.

Por regla general, si existe discrepancia entre lo indicado en la solicitud y lo publicado, aquella deberá ser denegada, por no permitir la acertada inteligencia de terceros.

Sin embargo, esta regla presenta las siguientes excepciones:

- La solicitud y las publicaciones indican un caudal diferente, en cuyo caso se continuará la tramitación de la solicitud, considerando el menor caudal señalado entre las publicaciones o solicitud.
- Si las omisiones en las publicaciones corresponden a aspectos que puedan ser inferidos razonablemente de otros datos consignados en ellas.

4. El cumplimiento de los plazos de publicación y aviso radial.

Si no se cumplen los plazos de publicación o aviso radial, la solicitud deberá ser denegada por infringir lo establecido en el artículo 131 del Código de Aguas.

5. El replanteo de las coordenadas de captación en Carta IGM.

El criterio general de la Dirección es que en aguas superficiales y en aguas subterráneas, el error máximo permitido para definir los puntos de captación y/o restitución será de 100 metros.

Si el error determinado al replantear en la carta IGM o al verificar en terreno, es mayor a lo indicado, la solicitud deberá ser denegada por quedar indeterminado el punto de captación y/o restitución, si corresponde.

Respecto a los errores asociados a la distancia y desnivel en las solicitudes de derechos no consuntivos, el criterio general será considerar como error máximo admisible en el desnivel 50 metros y en la distancia 200 metros.

Si el error determinado al replantear en la carta IGM o al verificar en terreno, es mayor a lo indicado, la solicitud deberá ser denegada por quedar indeterminado el desnivel y la distancia entre el punto de captación y restitución.

6. La revisión de los antecedentes técnicos a cumplir en cada caso.

7. La revisión de los antecedentes legales a cumplir en cada caso.

Dentro de ellos, se encuentran los documentos relativos al poder del representante, si corresponde; los antecedentes de la persona jurídica, si el solicitante es una persona jurídica; la acreditación del dominio del predio y la autorización del dueño, según el caso.

En el caso de solicitudes de aguas subterráneas, si no se adjunta al momento de la presentación, la inscripción de dominio vigente del predio, y, si corresponde, la autorización del dueño del predio, la solicitud deberá ser denegada de plano por infringir lo establecido en el artículo 24 del Reglamento N° 203, de 2013.

8. La autorización de la Dirección de Fronteras y Límites del Estado (DIFROL), si la solicitud recae en algunas de las áreas definidas como fronterizas. Dicha autorización, deberá acompañarse a la respectiva solicitud.

5.3.7 Sexta Etapa: Solicitud de antecedentes técnicos y legales

La solicitud de antecedentes técnicos y legales por parte de la DGA corresponde a una de las etapas necesarias de todos los procedimientos. En la guía desarrollada, respecto del procedimiento para la ejecución de obras de recarga artificial, la etapa de solicitud de antecedentes técnicos y legales se encuentra en el acápite 5.4. Por su parte, respecto del procedimiento de constitución del derecho de aprovechamiento provisional de aguas subterráneas con cargo a la recarga, la etapa de solicitud de antecedentes técnicos y legales se encuentra en el acápite 5.7 de este documento.

Con el objeto de resolver adecuadamente una solicitud, resulta fundamental solicitar al peticionario todos aquellos antecedentes, estudios y/o mediciones que se estimen necesarios para ello.

Esta petición de antecedentes se efectuará, dando al peticionario un plazo prudencial para su entrega (plazo general: 30 días hábiles administrativos). Si este no los hiciera llegar en la oportunidad indicada, se reiterará la petición (plazo general: 15 días hábiles administrativos), dejando constancia en esta segunda petición, que el incumplimiento de lo solicitado se entenderá como falta de interés en continuar con la tramitación de la solicitud, y esta será denegada.

5.3.8 Séptima Etapa: Solicitud de fondos

Se podrán solicitar fondos para verificar el lugar donde se emplazan las obras de recarga, para realizar una inspección en la etapa de construcción, y, en la etapa de recepción de la obra, y/o, para verificar el lugar donde se constituirá el respectivo derecho provisional con cargo a la recarga artificial.

Además, cuando la Dirección estimare necesario realizar inspección ocular a terreno, de acuerdo a lo establecido en el artículo 135 del Código de Aguas, determinará y solicitará la suma que el interesado debe consignar para cubrir los gastos de esta diligencia.

Lo anterior se solicitará mediante oficio ordinario informando al peticionario el monto en dinero que debe ser enviado a la Dirección Regional de Aguas, mediante vale vista o cheque nominativo a nombre del Ministerio de Obras Públicas. No se recepcionarán fondos en dinero efectivo.

Esta solicitud de fondos se efectuará, dando al peticionario un plazo prudencial para su entrega (plazo general 30 días hábiles administrativos). Si este no los hiciera llegar en la oportunidad indicada, se reiterará la petición (plazo general 15 días hábiles administrativos), dejando constancia en esta segunda petición, que el incumplimiento de lo solicitado se entenderá como falta de interés en continuar con la tramitación de la solicitud, y esta será denegada.

El monto de los fondos a solicitar al peticionario, los gastos que se pueden realizar con estos fondos, el control interno de los mismos y la rendición de estos a los solicitantes, está regulado por un instructivo interno del Servicio aprobado mediante la Resolución N° 1.622 del año 2005⁹. Dicho instructivo se encuentra en el Anexo XV del Manual de Normas y Procedimientos de Administración de Recursos Hídricos (DGA, 2008).

En relación a la aplicación de este instructivo, es necesario hacer notar que los montos indicados en éste corresponden a valores máximos a requerir por solicitud y para cada visita, pudiendo por razones de eficiencia en las rutas de aforos solicitar montos menores a los establecidos. Del mismo modo, para maximizar el uso de los recursos del Servicio y proporcionar a los técnicos facilidades para acceder a lugares de mayor complejidad, se podrán realizar salidas a terreno de técnicos con un peticionario quien se encargará de su transporte, solicitando solo los fondos necesarios para cubrir los costos del viático de los técnicos.

⁹ Resolución DGA N° 1622 del 08 de Noviembre del 2005, aprueba instructivo para la aplicación del artículo 135 de Código de Aguas, relativo al cobro por visitas a terreno en la tramitación de Solicitudes de Derecho de Aprovechamiento de Aguas y Solicitudes de Regularizaciones por el Artículo 2 Transitorio. Modificada por la Resolución DGA N° 4137 del 21 de Diciembre del 2011.

5.3.9 Octava Etapa: Inspección a terreno

La inspección a terreno deberá contemplar al menos lo siguiente¹⁰:

- a. La verificación de determinados aspectos de la solicitud, tales como el lugar donde se emplazará la obra de recarga, y/o el punto de captación y/o restitución del derecho provisional con cargo a ella.
- b. Inspección en la Etapa de Construcción de la Obra, con el objetivo de verificar los antecedentes técnicos presentados. En esta etapa pueden realizarse más de una inspección ocular, dependiendo de la magnitud de la obra.
- c. Recepción definitiva de la Obra.

En el caso que se hicieran modificaciones al proyecto original se requerirán nuevas inspecciones oculares por parte del personal de la Dirección General de Aguas.

Se deberá exigir a la Empresa Constructora que cuente con un Libro de Obras para que al momento de la inspección ocular el profesional enviado por la DGA deje un registro de la fecha de la visita y las observaciones que se hicieron con respecto a la etapa de construcción de la obra.

5.3.10 Novena Etapa: Elaboración del informe técnico

Lo sustancial de este informe es entregar en un documento el sustento técnico a la autoridad para la toma de decisiones respecto a la forma en que se resolverá la solicitud en tramitación.

Es esencial tener a nivel nacional un informe técnico uniforme, según el tipo de solicitud de que se trate, el cual contenga explícitamente aquellos aspectos necesarios para resolver adecuadamente. En los anexos del Manual de Normas y Procedimientos de Administración de Recursos Hídricos-DARH (DGA, 2008), se encuentran diferentes “modelos o tipos” de solicitudes, y/o documentos que forman parte de los procedimientos

¹⁰ El Código de Aguas en su Artículo 135, inciso 2º, faculta a la DGA para requerir a los solicitantes, fondos necesarios para cubrir los gastos que demandan las inspecciones a terreno que se estimen necesarias a fin de emitir informes técnicos para su resolución (DGA, 2008).

ante la DGA. Así, en el Anexo VIII de dicho Manual, se encuentra un “Informe Técnico Tipo”¹¹ que se aplica a las solicitudes más comunes ante esta Dirección.

Para el caso de la **obra de recarga artificial** el contenido mínimo que debe tener el “Informe Técnico o Memoria Técnica” se presenta en la Tabla 5-1, apartado 5.4.4.1.1 de este documento.

Respecto, al **derecho de aprovechamiento de agua con cargo a la recarga**, el informe técnico debe contener como mínimo lo siguiente¹²:

- a. Código del expediente.
- b. Nombre del peticionario.
- c. Resumen de la solicitud, indicando aspectos más importantes, tales como el caudal, la fuente o el sector hidrogeológico; el o los puntos de captación y/o restitución, sus coordenadas según Sistema y Datum WGS84 usado por el Servicio, la comuna y/o provincia, etc.
- d. Fecha ingreso de la solicitud.
- e. Fechas de publicaciones y emisiones radiales.
- f. Oposiciones.
- g. Aspectos legales.
- h. Memoria Explicativa y cálculo del caudal solicitado en relación a la Tabla de Equivalencia, si corresponde.
- i. Requisitos medioambientales. La eventual ubicación en áreas protegidas.
- j. Visita a terreno, describiendo los aspectos pertinentes, tales como la validación de las coordenadas de la captación y/o restitución, y, la distancia y desnivel, si corresponden.
- k. Disponibilidad: Determinación de la oferta y demanda del recurso agua, en la zona de estudio, si corresponde.
- l. Caudal ecológico, si corresponde.
- m. Autorización de DIFROL, si corresponde.

¹¹ En el apéndice B del presente informe se presenta un “Modelo genérico de informe técnico” y en el apéndice C se ha realizado un ejemplo de aplicación con dicho modelo.

¹² Esta propuesta de contenido mínimo del informe técnico realizada en base a lo sugerido en el acápite 4.2.9 por el Manual de Procedimientos del DARH (DGA, 2008).

- n. Acreditar la propiedad del terreno donde se ubica la captación y/o la obra, y la autorización del dueño, en su caso.
- o. Existencia de perjuicio de terceros.
- p. Usos, derechos y peticiones involucradas en la resolución del expediente.
- q. Conclusión y proposición clara y explícita.
- r. Es recomendable incluir fotografías del lugar y/u obras pertinentes, y, de otras situaciones que sean consideradas de interés para el análisis. Pueden también incluirse la parte de las cartas IGM de la zona de interés y/o imágenes de Google Earth o cualquier otro elemento que se considere relevante.

El Informe Técnico debe ser firmado por el profesional que lo elaboró y por el Agente de Expediente, responsable final de la tramitación del expediente.

5.3.11 Décima Etapa: Etapa resolutive

Conforme al acápite 4.2.10 del Manual de Procedimientos del DARH (DGA, 2008), se considera que el criterio general para resolver favorablemente una solicitud, ya sea de obra de recarga o derecho de aprovechamiento con cargo a la recarga es:¹³

- Que la solicitud presentada sea legalmente procedente.
- Que no se perjudique ni menoscabe derechos de terceros.
- Que se cumplan con los antecedentes técnicos específicos de cada procedimiento.

La etapa de resolución de una solicitud puede considerar las siguientes alternativas, según sea el tipo de solicitud:

- Resolución de constitución con Toma de Razón.
- Resolución denegatoria Exenta de Toma de Razón.
- Resolución de aprobación o rechazo Exenta de Toma de Razón.
- Resolución que acoge desistimiento Exenta de Toma de Razón.
- Oficio con proposición al Juez de Letras correspondiente.

¹³ En el acápite 3.4.10 de dicho manual se presenta en detalle la etapa resolutive para la obra de recarga y en el acápite 4.4.10 para el caso de la constitución del derecho provisional con cargo a la recarga.

De acuerdo a lo establecido en el artículo 139 del Código de Aguas, corresponderá la comunicación o notificación de las respectivas resoluciones.

En el caso de los derechos constituidos, la Resolución se reducirá a escritura pública en una Notaría que suscribirán el interesado y el Director Regional de Aguas correspondiente. Este trámite lo realizará el titular del derecho de aprovechamiento. El titular, en posesión de la escritura pública, deberá inscribir el derecho de aprovechamiento en el Registro de Propiedad de Aguas del Conservador de Bienes Raíces competente.

El interesado deberá remitir posteriormente a la Dirección General de Aguas copia autorizada de dicha inscripción, para los efectos de incorporarla al Catastro Público de Aguas. Una vez incorporada al Catastro Publico de Aguas, el Archivero de la DGA, emitirá el Certificado de Inscripción pertinente.

5.3.12 Décima Primera Etapa: Recursos de reconsideración y reclamación

De acuerdo a lo indicado en el Artículo 136 del Código de Aguas, las resoluciones que dicten el Director General o las diferentes Direcciones Regionales están afectas, en primera instancia, a Recursos de Reconsideración ante el Sr. Director General de Aguas, que deberán ser presentados dentro del plazo de 30 días corridos contados desde la fecha de notificación de la resolución respectiva o de 30 días calendarios a contar de la fecha de dictación de la resolución, si esta es comunicada.

El Recurso de Reconsideración podrá ser presentado en las Oficinas Regionales o en el Nivel Central.

En mérito a lo anterior, cuando se presente un recurso de reconsideración en las Oficinas Regionales, éste deberá ser remitido al Nivel Central para su Resolución. Para lo anterior, la Dirección Regional enviará el expediente en cuestión mediante un oficio dirigido al Director General de Aguas en el cual conste la opinión regional sobre la pertinencia del recurso.

En aquellos casos en los cuales, en opinión de la región, sería factible acoger el recurso de reconsideración, el expediente en cuestión será enviado al Sr. Director General de Aguas con un Informe Técnico que dirima la solicitud. Si se presenta un desistimiento del

petionario al Recurso de Reconsideración ya ingresado al Servicio, el expediente deberá ser enviado al Sr. Director General de Aguas para su resolución. Una vez resuelta y notificada la resolución que resuelve la Reconsideración, la DGA procederá con la tramitación correspondiente, del expediente de que se trate.

Por otro lado, las resoluciones de la DGA podrán reclamarse ante la Corte de Apelaciones del lugar en que se dictó la resolución que se impugna, dentro del plazo de 30 días corridos contados desde la fecha de notificación de la resolución o de su dictación, si fuese comunicada. Será aplicable a la tramitación del recurso de reclamación, las normas contenidas en el Título XVIII del Libro I del Código de Procedimiento Civil¹⁴, relativas a la tramitación del recurso de apelación en segunda instancia, debiendo, en todo caso, notificarse a la Dirección General de Aguas, la cual deberá informar al tenor del recurso.

Finalmente, es necesario señalar que los recursos de reconsideración y reclamación no suspenderán el cumplimiento de la resolución, salvo orden expresa del tribunal que disponga la suspensión.

5.4 Autorización para la ejecución de obras de recarga artificial

Procedimiento mediante el cual la Dirección General de Aguas (DGA) aprueba obras para la recarga artificial de sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común, una vez cumplidos los requisitos establecidos en las normas pertinentes. Esta autorización otorga preferencia para la constitución del respectivo derecho provisional.

5.4.1 Fuente legal

Artículos 66 inciso 2º del Código de Aguas, y 47 a 49, ambos inclusive, del Reglamento N° 203, de 2013.

¹⁴ Ley 1552 del 30 de agosto de 1902, modificada el 09 de enero de 2014 por la Ley 20720, sobre el Código de Procedimiento Civil del Ministerio de Justicia.

5.4.2 Ámbito de aplicación

Conforme a la normativa específica, la recarga artificial procede en sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común.

De acuerdo a la letra g) del artículo 54 del Reglamento N° 203, un sector hidrogeológico de aprovechamiento común es un acuífero o parte de un acuífero cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión en forma independiente.

Así, respecto de la recarga, la normativa atiende al funcionamiento independiente de un área o sector.

Por lo anterior, en estricto rigor, en nuestro país la correcta denominación de este procedimiento sería "recarga artificial de sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común".

5.4.3 Quienes pueden solicitarlo

Cualquier persona, lo que incluye:

- a. Persona natural capaz de actuar en derecho por sí o por su representante legal.
- b. Persona jurídica por medio de su(s) representante(s) legal(es).

5.4.4 Procedimiento de tramitación. Etapas

5.4.4.1 Primera Etapa: Presentación

Incluye tres partes:

- La solicitud.
- La documentación a acompañar a la solicitud.
- La presentación de la solicitud.

5.4.4.1.1 La Solicitud

Documento elaborado y firmado por el interesado o por el representante legal, en su caso, y dirigido al Sr. Director General de Aguas, el cual debe contener, a lo menos:

i. La individualización completa del solicitante y de su representante legal, si corresponde

Ello incluye nombre completo, RUT, dirección postal, y, en lo posible, dirección de correo electrónico, teléfono, o cualquier otro antecedente que facilite su contacto por la DGA, y que permita al interesado dar respuesta a los requerimientos de antecedentes solicitados por el Servicio.

Es importante que el solicitante designe domicilio dentro del radio urbano del lugar en que se realiza la presentación, para que los plazos comiencen a correr desde la fecha de su respectiva notificación. Si no lo hace, las resoluciones que dicte el Servicio se entenderán notificadas desde la fecha de la dictación de las mismas.

La designación de domicilio, se entenderá válida mientras el interesado no señale formalmente otra dirección, aun cuando de hecho se haya cambiado.

ii. Descripción del agua a utilizar en la recarga

Incluye su naturaleza física, su situación jurídica, y, en caso de ser el solicitante propietario del derecho de aprovechamiento, debe acompañar los documentos que acrediten su dominio vigente.

A. En cuanto a su naturaleza física

Al respecto, deberá mencionarse la naturaleza del agua a recargar, esto es, si son superficiales o subterráneas; el nombre de la fuente, en caso que se conozca; su caudal (expresado en medidas métricas y de tiempo); el o los puntos de su captación (expresado en coordenadas UTM, indicando el Dátum WGS84 y Huso correspondiente); y, el modo de extraerlas.

En caso de aguas superficiales, deberá agregarse la provincia en que se ubica su captación. Por su parte, en caso de aguas subterráneas, deberá agregarse la comuna en que se ubica la captación, el caudal máximo instantáneo, y el volumen total anual (expresados en medidas métricas y de tiempo).

Precisado lo anterior, corresponde señalar que las aguas a utilizar en la recarga, deben a lo menos, mantener las características del respectivo sector hidrogeológico, o, en caso que las modifiquen, no pueden afectar de un modo negativo dicho sector.

Esto significa que las aguas a recargar no pueden disminuir la calidad, la cantidad y/o el nivel de aguas del sector correspondiente; ni perjudicar o lesionar su permeabilidad, almacenamiento, comportamiento, colmatación o contaminación; tampoco pueden perjudicar su zona no saturada; ni producir riesgos de inundaciones o afecciones a terceros.

B. En cuanto a su situación jurídica

El N° 2 del Artículo 48 del Reglamento N° 203, establece que deben acompañarse los documentos necesarios para acreditar el dominio vigente del derecho de aprovechamiento, si así correspondiere.

En consecuencia, si bien este procedimiento exige contar con un derecho de aprovechamiento que faculte a extraer el agua que será recargada, no es requisito ser propietario de él, siempre que el solicitante tenga algún título sobre dicho derecho que lo faculte para su uso en el tiempo.

Dicho título deberá permitirle su uso, por a lo menos un par de años, que se estima pueden durar este procedimiento y el posterior otorgamiento del derecho provisional con cargo a la recarga, más un posterior período de uso.

Dentro de estos títulos cabe mencionar un arriendo o un usufructo del derecho de aguas, a largo plazo, anotados al margen de la inscripción de dominio del derecho de aprovechamiento (para que sea oponible a terceros) u otro que le autorice su uso en el tiempo.

Sin perjuicio de lo anterior, deberá singularizarse la resolución que constituyó originariamente el derecho de aprovechamiento a usar en la recarga, y su actual inscripción de dominio en el Registro de Propiedad de Aguas del Conservador de Bienes Raíces competente. Además, en caso de no ser el propietario del derecho de aprovechamiento, debe señalarse el título que permite su uso, su correspondiente inscripción y/o anotación marginal.

C. En cuanto a la tipología de los derechos de aguas

Si bien las normas aplicables no imponen ninguna limitación expresa, ellas surgen de las características propias de los distintos derechos de aprovechamiento, o, de la imposibilidad de determinar con la actual tecnología, sus efectos en el respectivo sector hidrogeológico.

C.1.) Derechos consuntivos y no consuntivos:

Atendida la esencia de ambos, en la recarga deben utilizarse derechos consuntivos (consumibles), porque el agua se extraerá de la fuente originaria y se inyectará a una fuente diferente (un determinado sector hidrogeológico de aprovechamiento común), mezclándose con las aguas de éste, lo que hace imposible la restitución o devolución de las mismas aguas a su fuente originaria.

De esta forma, en la recarga no pueden usarse derechos no consuntivos (no consumibles).

C.2) Derechos permanentes y eventuales:

Con la tecnología existente actualmente, resulta casi imposible determinar oportunamente los efectos que un derecho eventual a recargar, podría causar en un respectivo sector hidrogeológico, lo que implicaría no poder cumplir con los estudios y análisis exigidos en este procedimiento y la certeza de sus resultados.

A mayor abundamiento, cabe añadir que, en la práctica, generalmente los derechos eventuales tienen pocas posibilidades de ser usados.

En consecuencia, dados los estudios y análisis que exige este procedimiento, y la obligación de la DGA de imponer restricciones y/o suspender la recarga en cualquier momento en que faltare alguna de las condiciones exigidas; en los hechos se hace necesario que el derecho sea permanente, esto es, que pueda captarse durante todo el año.

C.3) Derechos continuos, discontinuos y alternados:

Una situación similar a la anterior se aplica a esta clasificación de los derechos, pues con la actual tecnología, resulta casi imposible determinar oportunamente los efectos que un derecho discontinuo o un derecho alternado, podrían causar en un determinado sector hidrogeológico, lo que implicaría no poder cumplir con los estudios y análisis a realizar y la certeza de sus resultados.

Además, respecto de los derechos alternados o sujetos a turno, es del caso mencionar que en la práctica suelen sufrir bastantes cambios, lo que complicaría aún más el estudio y análisis de sus efectos en el sector hidrogeológico en que se recarguen.

De esta forma, atendidos los estudios y análisis que implica este procedimiento, y la referida obligación de supervigilancia de la DGA, en los hechos es necesario que el derecho sea continuo, esto es, que pueda captarse las 24 horas del día.

iii. Propiedad del suelo donde se realizará la obra de recarga

Al respecto, el procedimiento para ejecutar obras de recarga artificial, requiere el uso del suelo en que dichas obras se constituirán.

Para ello, **el solicitante puede ser dueño del inmueble en que se ubicarán dichas obras**, lo que se acreditará con copia autorizada de la correspondiente inscripción de dominio, con una antigüedad de no más de 60 días, contados desde la fecha de presentación de la solicitud.

En caso que **el solicitante no sea dueño del inmueble**, para la ejecución de dichas obras, deberá contar con la autorización escrita del dueño, cuya firma haya sido autorizada por un notario público.

Si la obra se encuentra ubicada en un bien nacional de uso público, se requerirá la autorización del organismo encargado de su administración, a través de la emisión del respectivo acto autorizatorio.

Y, para el caso que la obra se encuentra ubicada en un bien fiscal, se debe acompañar la autorización del Ministerio de Bienes Nacionales.

iv. Memoria técnica

Conforme a la experiencia y lo dispuesto en los artículos 48 y 49 del DS N° 203, de 2013 y lo sugerido en las bases técnicas del proyecto se propone la elaboración de una “**Memoria Técnica**” que contenga como contenido mínimo lo presentado en la Tabla 5-1. El detalle de cada una de estas fases se presenta en el apéndice A.

Tabla 5-1 Índice de contenidos mínimos para la Memoria Técnica de solicitud de un proyecto de recarga artificial.

FASE	CONTENIDOS
Fase previa o de preselección	<p>Justificación de la necesidad del proyecto</p> <ul style="list-style-type: none"> - Motivación del proyecto. - Cálculo de la demanda de agua. - Cálculo de recursos disponibles. - Balance oferta-demanda. <p>Evaluación de la factibilidad ambiental</p> <ul style="list-style-type: none"> - Existencia de restricciones ambientales. - Evaluación de potenciales impactos. - Identificación y caracterización de ecosistemas asociados. <p>Evaluación inicial de la factibilidad técnica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Características del emplazamiento. - Usos del suelo. - Pendiente. - Capacidad de Infiltración. - Distancia a problemas de contaminación de aguas subterráneas. - Tiempo de residencia o de tránsito. - Eficiencia de recuperación. - Gradiente hidráulico. - Tipo y características del acuífero (poroso/fracturado, libre/confinado, etc.). - Profundidad de la zona no saturada. - Volumen de acuífero disponible. - Potencia acuífero. - Transmisividad. - Potencia de los niveles impermeables debajo de la superficie. - Evaluación de los volúmenes de inyección respecto el total del acuífero.
Fase de viabilidad	<p>Caracterización del medio y del SHAC</p> <ul style="list-style-type: none"> - Establecimiento de la línea base de la zona y SHAC (calidad y nivel piezométrico). - Topografía. - Geología, hidrogeología y modelo conceptual de la zona. - Estudios y ensayos de caracterización del subsuelo y el acuífero para dar valores a los parámetros hidráulicos (en función de la información disponible): piezómetros, geofísica, ensayos de bombeo, tensiómetros, tests de infiltración, caudalímetros, pluviómetros, ensayos de trazadores). - Selección y justificación del tipo de dispositivo de recarga.

FASE	CONTENIDOS
	<p>Evaluación ambiental del proyecto</p> <ul style="list-style-type: none"> - Identificación de los impactos. - Evaluar viabilidad calidad del agua de recarga. - Identificar los usos a los que se destinará el agua de recarga.
Fase de evaluación y diseño	<ul style="list-style-type: none"> - Elaboración del modelo conceptual. - Elaboración de los modelos numéricos de flujo y transporte según "Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA (SEA, 2012). - Dimensionamiento de la instalación según parámetros de campo. - Evaluación económica (Análisis del ciclo de vida). - Cálculo de los costes de construcción, operación, mantenimiento y cierre. - Plan de gestión de una eventual contaminación. - Diseño de la instalación.
Fase planta piloto	<ul style="list-style-type: none"> - Descripción y características del dispositivo de esta fase. - Caudales. - Ubicación de las obras y especificaciones técnicas. - Ajuste de los modelos conceptual y numérico. - Plan de monitoreo. - Plan de operación y mantenimiento. - Plan de alerta temprana. - Estudio ambiental. - Plan de cierre o adaptación a la fase de proyecto industrial.
Fase de implementación	<ul style="list-style-type: none"> - Definir el plan de mantenimiento. - Definir el plan de monitoreo. - Procedimiento de evaluación de la efectividad de la recarga. - Evaluación de la dilución en los puntos de muestreo. - Técnicas de gestión de la colmatación. - Plan de cierre.

v. La Documentación a acompañar a la Solicitud

1. En caso de actuar a través de un representante, debe acompañarse el poder para representar al peticionario, otorgado por escritura pública o instrumento privado suscrito ante notario, cuya antigüedad no debe ser superior a 6 meses, contados desde la fecha de ingreso de la solicitud hacia atrás.
2. En caso que el peticionario sea una persona jurídica, deben acompañarse sus antecedentes legales, además del certificado de vigencia, cuya antigüedad no debe ser superior a 6 meses, contados desde la fecha de ingreso de la solicitud hacia atrás.
3. En caso de ser propietario del derecho de aprovechamiento, deben acompañarse copia autorizada y vigente de la inscripción de dominio y certificado de dominio

- vigente, emitidos por el Conservador competente, cuya antigüedad no debe ser superior a 6 meses, contados desde la fecha de ingreso de la solicitud hacia atrás.
4. En caso de no ser propietario del derecho de aprovechamiento, deben acompañarse copia del título sobre dicho derecho que lo faculta para su uso en el tiempo; copia autorizada y vigente de su inscripción y de su anotación al margen de la inscripción del respectivo derecho de aprovechamiento, y el certificado de vigencia, emitidos por el Conservador competente, cuya antigüedad no debe ser superior a 6 meses, contados desde la fecha de ingreso de la solicitud hacia atrás.
 5. En caso de ser propietario del inmueble en que se ejecutará la obra de recarga artificial, deben acompañarse copia autorizada y vigente de la inscripción de dominio y certificado de dominio vigente, emitidos por el Conservador competente, cuya antigüedad no debe ser superior a 60 días, contados desde la fecha de ingreso de la solicitud hacia atrás.
 6. En caso de no ser propietario del inmueble en que se ejecutará la obra de recarga artificial, debe acompañarse la autorización escrita del dueño del predio, cuya firma debe ser autorizada ante notario público. Además, debe incluirse copia autorizada y vigente de la inscripción de dominio y certificado de dominio vigente, emitidos por el Conservador competente, cuya antigüedad no debe ser superior a 60 días contados desde la fecha de ingreso de la solicitud hacia atrás.

Si la obra está ubicada en un bien nacional de uso público, se requerirá la autorización del organismo bajo cuya administración éste se encuentre, mediante el acto administrativo totalmente tramitado que corresponda.

Tratándose de bienes fiscales, se deberá acompañar la autorización del Ministerio de Bienes Nacionales.

7. La Solicitud de autorización de la Dirección de Fronteras y Límites del Estado (DIFROL), si la solicitud recae en alguna de las áreas definidas como fronterizas.
8. Certificado de inscripción en el Catastro Público de Aguas emitido por la Dirección General de Aguas, respecto del derecho de aprovechamiento cuyas aguas serán recargadas, y en su caso, del título que autoriza el uso del solicitante.

Los documentos mencionados en los n^o 3, 4, 5, 6, 7 y 8, deberán acompañarse a la solicitud, pues de lo contrario deberá ser denegada de plano.

vi. La Presentación de la Solicitud

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.2.3).

5.4.4.2 Segunda Etapa: Ingreso del Expediente al Catastro Público de Aguas (CPA)

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.3).

5.4.4.3 Tercera Etapa: Publicaciones y Aviso Radial

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.4).

5.4.4.4 Cuarta Etapa: Oposiciones

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.5).

5.4.4.5 Quinta Etapa: Revisión Formal

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.6).

Además de las normas contenidas en el procedimiento general de tramitación, en la revisión formal en esta clase de procedimientos, que debe realizarse en forma oportuna, corresponderá al chequeo de:

1. Los contenidos mínimos de la solicitud de acuerdo a lo prescrito en el artículo 48 del Reglamento N° 203, es decir:

- La individualización completa del solicitante, y, de su representante legal, si corresponde.
- La descripción del agua a utilizar en la recarga.
- La memoria técnica, que contenga: la descripción del proyecto de recarga; la descripción y características geológicas e hidrogeológicas del sector de la recarga; las características de la calidad de las aguas que se infiltrarán; el plan de monitoreo; y, el plan de acción frente a la eventual contaminación del sector influenciado directamente por la recarga.

2. La verificación de la documentación a acompañar a la solicitud:

- Poder del representante, si corresponde.
- Antecedentes de la persona jurídica, si el peticionario es una persona jurídica.

- Acreditar la propiedad del derecho de aprovechamiento, y, en su caso, el título sobre dicho derecho que lo faculta para su uso en el tiempo.
 - Acreditar la propiedad del inmueble en que se ejecutará la obra de recarga artificial, y, en su caso, la autorización del dueño del predio, o, del organismo bajo cuya administración se encuentre.
 - Acreditar la autorización de DIFROL, si corresponde.
 - Certificado de inscripción en el Catastro Público de Aguas emitido por la Dirección General de Aguas, respecto del derecho de aprovechamiento cuyas aguas serán recargadas, y en su caso, del título que autoriza el uso del solicitante.
3. La correspondencia entre lo señalado en la solicitud y lo publicado.
 4. El cumplimiento de los plazos de publicación y aviso radial.
 5. El replanteo de las coordenadas de captación en Carta IGM.
 6. La revisión de los antecedentes técnicos a cumplir.
 7. La revisión de los antecedentes legales a cumplir.

5.4.4.6 Sexta Etapa: Solicitud de Antecedentes Técnicos y Legales

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.7).

5.4.4.7 Séptima Etapa: Solicitud de Fondos

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.8).

5.4.4.8 Octava Etapa: Inspección a Terreno

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.9).

5.4.4.9 Novena Etapa: Elaboración del Informe Técnico

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.10).

5.4.4.10 Décima Etapa: Etapa Resolutiva

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.11).

Además de las normas del procedimiento general aplicables, existen normas propias contenidas en el artículo 49 del Reglamento N° 203, de 2013, la que **exige que la DGA apruebe las obras de infiltración cuando se cumplan los siguientes requisitos:**

1. Cumplimiento de la normativa específica aplicable.
2. Cumplimiento de las normas comunes de procedimiento, contenidas en el procedimiento general.
3. Que la obra no provoque la colmatación del acuífero.¹⁵
4. Que la obra no provoque la contaminación de las aguas.¹⁶

En este tipo de solicitudes, corresponde al Director General de Aguas la aprobación de la ejecución de la obra de recarga artificial, **mediante resolución exenta**. Posteriormente, mediante otra resolución exenta se recepcionará la obra construida y se autorizará su operación.

5.4.4.11 Décima Primera Etapa: Recursos de Reconsideración y Reclamación

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.12).

¹⁵ En el apartado 3.5.4.1 *Proceso de colmatación* se ofrecen indicaciones técnicas que pueden orientar al evaluador para establecer que la obra de recarga no provoque la colmatación del acuífero.

¹⁶ En el apartado 3.5.3 *Consideraciones ambientales: posibles contaminaciones eventuales y detección de impactos* se presentan indicaciones específicas a tener en cuenta al momento de evaluar la contaminación o impactos de la recarga. Además, en el apartado 6.7 *Plan de gestión de una eventual contaminación* se presentan los procedimientos mínimos que debe incluir un plan de gestión de la contaminación.

5.5 Fase piloto previa a la obra de recarga y a la solicitud de derecho con cargo a la recarga

Una vez se dispone del permiso correspondiente, se comienza a construir la obra de recarga artificial y una parte de ella deberá comenzar a operarse como experiencia piloto. Esto es una instalación de volúmenes inferiores a la operación de escala industrial y se recomienda que opere como mínimo un año. Una vez recibida la aprobación por parte de la DGA, el titular deberá comenzar con la construcción de la obra de recarga artificial, por eso se sugiere que sea parte de ella la que opere como piloto, ya que si resulta favorable, se seguirán construyendo obras de forma anexas a las que ya existen. Los detalles de la fase piloto deben estar considerados en la "memoria técnica" a presentar con la autorización.

La solicitud del derecho no podrá realizarse hasta después de esta experiencia piloto y su resolución dependerá de los resultados de la misma. En la memoria de la solicitud se incluirá la descripción de esta fase tanto en aspectos técnicos como operaciones.

El objetivo general de esta fase es validar el funcionamiento y asegurar que no se producen impactos. Más concretamente, esta fase de marcha blanca deberá servir para:

- Evaluar la factibilidad de la recarga artificial.
- Recopilar más datos de funcionamiento.
- Constatar que no se producen impactos sobre la cantidad ni calidad del recurso.
- Verificar que no hay impactos a terceros ni a potenciales ecosistemas asociados.
- Evaluar el modelo conceptual y numérico elaborado y ajustarlo pertinentemente, si es el caso.

Durante esta etapa deberán llevarse a cabo los mismos protocolos de operación indicados para una instalación de recarga industrial. Como consecuencia, deberá implantarse una red de monitoreo para controlar el funcionamiento del sistema así como el proceso de recarga y extracción. Se realizarán las analíticas indicadas y se tomarán los datos y medidas correspondientes según lo indicado previamente.

Los contenidos mínimos que deben detallarse en la Memoria Técnica respecto este proyecto piloto son:

1. Descripción y objetivo del proyecto. Magnitud de la instalación.
2. Definición de caudales disponible para la recarga artificial.
3. Ubicación de las obras de recarga.
4. Especificaciones técnicas de la obra de recarga.
5. Estudios del medio y parámetros hidrogeológicos.
6. Modelo conceptual y numérico que se validará.
7. Plan de monitoreo.
8. Plan de operación y mantenimiento.
9. Plan de alerta temprana.
10. Estudio ambiental.
11. Plan de cierre o plan de adaptación a la instalación industrial.

5.6 Cumplimiento de requisitos medioambientales

Esta etapa solamente será necesaria en caso de que sea procedente, como se indica a continuación.

5.6.1 Ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

En principio, una obra de recarga artificial no se encuentra incluida dentro de los proyectos o actividades mencionados en el artículo 10 de la Ley de Bases del Medio Ambiente, por lo que su sola ejecución no exige ingresar al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) contenido en esta Ley.

Sin embargo, dicha obra deberá ingresar al SEIA y contar con la correspondiente Resolución Calificatoria Ambiental favorable, en forma previa a la resolución final por parte de la DGA, en los siguientes casos:

- A. Si la obra de recarga artificial a ejecutar cumple con la norma contenida en la letra a) del artículo 10 de la referida ley.

Sobre este punto, recordemos que esta letra a) incluye los embalses de capacidad superior a 50.000 m³ o cuyo muro tenga más de 5 m de altura; los acueductos que conduzcan más de 2 m³/s; los acueductos que conduzcan más de 0,5 m³/s, que se proyecten próximos a zonas urbanas, y cuya distancia al extremo más cercano del límite

urbano sea inferior a 1 km y la cota de fondo sea superior a 10 m sobre la cota de dicho límite; y los sifones que crucen cauces naturales.

Esta letra incluye también las presas, drenaje, desecación, dragado, defensa o alteración, significativos, de cuerpos o cursos naturales de aguas.

- B. Si la obra de recarga artificial a ejecutar recae en cualquier área bajo protección oficial, según lo dispuesto en el artículo 10 letra p) de la citada Ley sobre Bases del Medio Ambiente.

Los lugares comprendidos por esta letra son las áreas bajo protección oficial, tales como parques nacionales, reservas nacionales, monumentos naturales, reservas de zonas vírgenes, santuarios de la naturaleza, parques marinos o reservas marinas.

En ambos casos, previo a la aprobación de las obras de recarga artificial, el solicitante deberá ingresar esta obra al SEIA y obtener Resolución Calificatoria Ambiental favorable, como requisito previo para la aprobación de la obra por parte de la DGA.

Si al proyecto en evaluación en el SEIA se le otorga una Resolución Calificatoria Ambiental de Rechazo, la solicitud de aprobación de la obra será denegada de plano.

En los casos que corresponda, las Direcciones Regionales deberán pedir por escrito el ingreso al SEIA.

Por su parte, existe otra forma en que una obra de recarga artificial debe ingresar al SEIA, y se produce cuando ésta forma parte de cualquier proyecto o actividad de aquellos mencionados en el citado artículo 10 de la Ley 19.300.

En este caso, la obra ingresará directamente al SEIA, en conjunto con el proyecto del que forma parte, y recibirá la aprobación o rechazo de la DGA según corresponda, dentro de dicho procedimiento de evaluación.

5.6.2 Protección ambiental del respectivo sector hidrogeológico de aprovechamiento común

Aun cuando una determinada obra de recarga artificial no deba ingresar al SEIA, atendidas las atribuciones que la actual normativa sobre recarga artificial otorga a la

DGA, se estima que esta Dirección puede proteger en forma adecuada los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (PAS 158).

En este sentido, es muy importante realizar una línea base de cada sector hidrogeológico o acuífero, para lo cual es esencial el monitoreo continuo. Los puntos a monitorear deben estar determinados en orden a controlar la cantidad y calidad del agua.

Este monitoreo puede realizarse con pozos existentes con el objetivo de facilitar la tarea. Éstos deben ser representativos de gran parte de los acuíferos y/o sectores hidrogeológicos y en especial, de los más relevantes en términos de vulnerabilidad.

5.7 Constitución del derecho de aprovechamiento provisional de aguas subterráneas con cargo a la recarga

Procedimiento por el cual la Dirección General de Aguas constituye un derecho de aprovechamiento provisional de aguas subterráneas, en favor del titular de una obra de recarga artificial autorizada, y con cargo a dicha recarga. Este derecho no puede transformarse en definitivo, pues durará mientras dure la recarga.

En el apéndice D se encuentra el Formulario tipo para la solicitud de derechos de aprovechamientos de agua con cargo a la recarga.

5.7.1 Fuente legal

Artículos 66 inciso 2º del Código de Aguas y 50 del Reglamento N° 203, de 2013.

5.7.2 Ámbito de aplicación

Conforme a la normativa específica, la constitución del derecho provisional con cargo a la recarga se aplica sobre el sector hidrogeológico de aprovechamiento común influenciado directamente por la recarga. Por excepción, se puede aplicar sobre otro sector diferente, según se verá.

5.7.3 Quienes pueden solicitarlo

Toda persona natural o jurídica que haya sido autorizada por la DGA para ejecutar obras para la recarga artificial de un sector hidrogeológico de aprovechamiento común.

- a. Si es una persona natural, además debe ser capaz de actuar en derecho por sí o por su representante legal.
- b. Si es una persona jurídica, por medio de su (s) representante (s) legal (es).

5.7.4 Procedimiento de tramitación. Etapas

5.7.4.1 Primera Etapa: Presentación

Incluye tres partes:

- La solicitud.
- La documentación a acompañar a la solicitud.
- La presentación de la solicitud.

5.7.4.1.1 La Solicitud

Documento elaborado y firmado por el interesado o por el representante legal, en su caso, y dirigido al Sr. Director General de Aguas, el cual debe contener, a lo menos, todas las menciones que al respecto establece el artículo 50 del Reglamento Nº 203, su artículo 19, y, en definitiva, el artículo 140 del Código de Aguas, respecto de la solicitud para constituir derechos de aprovechamiento sobre aguas subterráneas. Así, los requisitos de esta solicitud son:

i. La individualización completa del solicitante, y, de su representante legal, si corresponde

Ello incluye nombre completo, RUT, dirección postal, y en lo posible, dirección de correo electrónico, teléfono, o cualquier otro antecedente que facilite su contacto por la DGA, y que permita al interesado dar respuesta a los requerimientos de antecedentes solicitados por el Servicio.

Es importante que el solicitante designe domicilio dentro del radio urbano del lugar en que se realiza la presentación, para que los plazos comiencen a correr desde la fecha de su respectiva notificación. Si no lo hace, las resoluciones que dicte el Servicio se entenderán notificadas desde la fecha de la dictación de las mismas.

La designación de domicilio, se entenderá válida mientras el interesado no señale formalmente otra dirección, aun cuando de hecho se haya cambiado.

ii. Expresar que se constituye con cargo a la obra de recarga artificial ya aprobada en el sector hidrogeológico correspondiente, identificando la resolución respectiva

Por excepción, puede otorgarse en un sector hidrogeológico de aprovechamiento común distinto al que recibe la recarga, siempre que el interesado verifique el cumplimiento de los siguientes requisitos, a satisfacción de la DGA: que ambos sectores estén claramente interrelacionados, y, que el o los puntos de captación del derecho provisional se ubiquen en una zona directamente influenciada por la recarga artificial.

iii. Respetto de las aguas a utilizar

Debe señalarse:

- a) Su naturaleza, esto es, aguas subterráneas.
- b) La comuna en que está ubicada la obra de captación.

iv. Respetto del derecho provisional a constituir

Debe señalarse:

- a) El caudal máximo instantáneo a extraer, con cargo a la recarga, expresado en medidas métricas y de tiempo (l/s, m³/s, etc.).
- b) El volumen total anual a extraer, con cargo a la recarga, expresado en metros cúbicos.
- c) El o los puntos de captación del agua, expresados en coordenadas UTM, indicando Dátum WGS84 utilizado en relación a cartografía IGM.

En el caso de derechos no consuntivos, se indicará también el punto de restitución de las aguas, y la distancia y desnivel entre la captación y la restitución.

- d) El modo de extracción de las aguas.
- e) Las características del derecho, en cuanto consuntivo o no consuntivo; de ejercicio permanente o eventual; y, continuo, discontinuo o alternado con otras personas.
- f) El área de protección requerida.

v. Otros antecedentes

Los demás antecedentes que exija la naturaleza del derecho que se solicita, siempre que ellos estén relacionados con los requisitos anteriores.

5.7.4.1.2 La Documentación a acompañar a la Solicitud

1.- En caso de actuar a través de un representante, debe acompañarse el poder para representar al peticionario, otorgado por escritura pública, o, instrumento privado suscrito ante notario, cuya antigüedad no debe ser superior a 6 meses, contados desde la fecha de ingreso de la solicitud hacia atrás.

2.- En caso que el peticionario sea una persona jurídica, deben acompañarse sus antecedentes legales, además del certificado de vigencia, cuya antigüedad no debe ser superior a 6 meses, contados desde la fecha de ingreso de la solicitud hacia atrás.

3.- En caso de ser propietario del derecho de aprovechamiento, deben acompañarse copia autorizada y vigente de la inscripción de dominio y certificado de dominio vigente, emitidos por el Conservador competente, cuya antigüedad no debe ser superior a 6 meses, contados desde la fecha de ingreso de la solicitud hacia atrás.

4.- En caso de no ser propietario del derecho de aprovechamiento, deben acompañarse copia del título sobre dicho derecho que lo faculta para su uso en el tiempo; copia autorizada y vigente de su inscripción y de su anotación al margen de la inscripción del respectivo derecho de aprovechamiento, y el certificado de vigencia, emitidos por el Conservador competente, cuya antigüedad no debe ser superior a 6 meses, contados desde la fecha de ingreso de la solicitud hacia atrás.

5.- Certificado de inscripción de la obra de recarga artificial pertinente en el Catastro Público de Aguas, emitido por la Dirección General de Aguas.

7.- Adjuntar los antecedentes de la Resolución de la Obra de Recarga aprobada y anexar un informe técnico correspondiente a la marcha blanca del proyecto Piloto. Se recomienda que el informe incluya los datos operacionales, regla de operación, plan de monitoreo de efectividad de la recarga, calidad de agua y plan de extracción con cargo a la recarga.

5.7.4.1.3 La Presentación de la Solicitud

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.2.3).

5.7.4.2 Segunda Etapa: Ingreso del Expediente al Catastro Público de Aguas (CPA)

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.3).

5.7.4.3 Tercera Etapa: Publicaciones y Aviso Radial

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.4).

5.7.4.4 Cuarta Etapa: Oposiciones

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.5).

5.7.4.5 Quinta Etapa: Revisión Formal

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.6).

Además de las normas contenidas en el procedimiento general de tramitación, en la revisión formal en esta clase de procedimientos, que debe realizarse en forma oportuna, corresponderá el chequeo de:

1.- Los contenidos mínimos de la solicitud de acuerdo a lo prescrito en el artículo 50 del Reglamento N° 203, en su artículo 19, y, en definitiva, en el artículo 140 del Código de Aguas, es decir:

- La individualización completa del solicitante, y, de su representante legal, si corresponde.
- Expresar que se constituye con cargo a la obra de recarga artificial ya aprobada, identificando la resolución respectiva.
- Los requisitos respecto de las aguas a utilizar.
- Los requisitos respecto del derecho provisional a constituir.
- Los demás antecedentes que exija la naturaleza del derecho que se solicita, siempre que ellos estén relacionados con los requisitos anteriores.

2.- La verificación de la documentación a acompañar a la solicitud:

- Poder del representante, si corresponde.
- Antecedentes de la persona jurídica, si el peticionario es una persona jurídica.
- Acreditar la propiedad del derecho de aprovechamiento, y, en su caso, el título sobre dicho derecho que lo faculta para su uso en el tiempo.
- Certificado de inscripción de la obra de recarga artificial pertinente en el Catastro Público de Aguas, emitido por la Dirección General de Aguas.
- Antecedentes resolución aprobatoria de la obra de recarga artificial pertinente.
- Antecedentes técnicos pertinentes.

3.- La correspondencia entre lo señalado en la solicitud y lo publicado.

4.- El cumplimiento de los plazos de publicación y aviso radial.

5.- El replanteo de las coordenadas de captación en Carta IGM.

6.- La revisión de los antecedentes técnicos a cumplir.

7.- La revisión de los antecedentes legales a cumplir.

5.7.4.6 Sexta Etapa: Solicitud de Antecedentes Técnicos y Legales

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.7).

5.7.4.7 Séptima Etapa: Solicitud de Fondos

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.8).

5.7.4.8 Octava Etapa: Inspección a Terreno

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.9).

Además, se recomienda **que el usuario facilite los puntos a monitorear** (caudalímetros, piezómetros, etc.) para que sea más fácil la fiscalización en terreno.

La inspección a terreno deberá contemplar al menos lo siguiente:

- A. Verificar la ubicación de la captación, restitución, y la existencia del recurso hídrico.
- B. Determinar las coordenadas UTM de la obra de captación y restitución, en base al Dátum WGS84 utilizado por el Servicio.
- C. Determinar las características de la obra (profundidad y diámetro) y el nivel estático o dinámico según corresponda.
- D. Verificar si la obra de captación cuenta con los equipos de extracción de agua.
- E. Verificar la existencia de otras captaciones de aguas subterráneas localizadas a menos de 200 metros de la captación motivo de la solicitud, para posteriormente, determinar si éstas poseen derechos legalmente constituidos o en trámite de regularización, caso en el cual se requerirá la autorización expresa del titular de dicho derecho.
- F. Verificar si dentro de esa misma distancia se ubican afloramientos o vertientes de manera de analizar si la constitución del derecho subterráneo provocará perjuicio o menoscabo a derechos de terceros o afectará la relación entre aguas superficiales y subterráneas.
- G. Verificar la existencia de cauces superficiales próximos a la captación subterránea, para determinar posible interferencia cauce – acuífero.

5.7.4.9 Novena Etapa: Elaboración del Informe Técnico

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.10).

Además de los aspectos contenidos en el procedimiento general de tramitación, se deberán incluir los aspectos específicos que correspondan, tales como el análisis de interferencia, el análisis de la prueba de bombeo, la individualización de la ubicación hidrogeológica, en caso que exista definición de los acuíferos, pronunciarse sobre el radio

de protección y la existencia de captaciones al interior de este; el análisis de disponibilidad de aguas subterráneas a nivel de fuente.

Además, debe incluir el análisis de la fase piloto en cuanto a la efectividad de la recarga. Es decir, el usuario debe considerar los resultados del piloto en la evaluación de la solicitud del derecho, principalmente si hay cambios en los parámetros del modelo, el cual debe auditar con los resultados del piloto.

5.7.4.10 Décima Etapa: Etapa Resolutiva

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.11).

Además de las normas del procedimiento general aplicables, existen normas propias contenidas en el artículo 50 del Reglamento N° 203, de 2013, que **exige que la DGA constituya el derecho provisional con cargo a la recarga, cuando se cumplan los siguientes requisitos:**

1. Cumplimiento de la normativa específica.
2. Cumplimiento de las normas comunes de procedimiento.
3. El solicitante tenga una obra de recarga aprobada y operando. Se recomienda que exista un proyecto piloto con una línea base mínimo de un año de datos de niveles y caracterización de la calidad de agua (recarga y acuífero).
4. Balance hídrico que permita definir el volumen adicional generado en el sector a causa de la infiltración.
5. Que el ejercicio de este derecho no provoque perjuicios a otros derechos de aguas existentes.

En este tipo de solicitudes, corresponde al Director Regional de Aguas la constitución del derecho provisional.

5.7.4.11 Décima Primera Etapa: Recursos de Reconsideración y Reclamación

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación (apartado 5.3.12).

6. Guía metodológica para analizar proyectos de recarga

La solicitud de autorización para ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos se tramitará conforme al procedimiento de la "Guía Metodológica para presentar proyectos de recarga".

Adicionalmente, **se ha elaborado una herramienta en hojas de cálculo de Microsoft Excel semiautomatizada** para facilitar el proceso de evaluación de proyectos por parte de la Dirección General de Aguas (ver Anexo Digital "Herramienta Excel para evaluación de proyectos RA-DGA").

Se deberán evaluar los siguientes antecedentes:

6.1 Requisitos de la solicitud

- Nombre completo, RUT y demás antecedentes del solicitante y de su representante legal, si corresponde. Así como la dirección postal, correo electrónico, teléfono, etc.
- Operador: Responsable de la instalación. Nombre completo, RUT, dirección postal, correo electrónico, teléfono, etc. (opcional).
- Ubicación: Localización de la instalación mediante el número y nombre de la región, ciudad y comuna.
- Coordenadas: la ubicación espacial de la instalación expresada en coordenadas UTM, indicando el Datum y huso al que está referida.
- Tipo de proyecto según objetivos: Aumento de cantidad y/o calidad, proyecto piloto, medida de mitigación, etc.
- Objetivos, descripción y justificación del proyecto (opcional).
- Cantidad de agua a inyectar y a extraer (l/s, m³/s, etc.)
- Fuente de financiamiento y costo aproximado de la obra (opcional).
- Vida útil aproximada del proyecto.
- Inicio previsto de la construcción: fecha en que se pretende iniciar la construcción del dispositivo.

- Inicio previsto del funcionamiento: fecha prevista para la inicio de la operación de la recarga.
- Número de Resolución, código de expediente o título que justifique y/o asegure el uso por a lo menos varios años de derecho de aprovechamiento de agua.
- Condición de propiedad del predio (propietario, arrendatario, etc.).
- Tiempo previsto de funcionamiento: duración mínima prevista de la instalación, si es el caso.
- Usos del suelo.

6.2 Evaluación legal

6.2.1 Derecho de aprovechamiento

Verificar si el solicitante cuenta con los derechos de agua correspondiente a la disponibilidad de agua. Revisar la presentación de los documentos necesarios que acrediten el dominio vigente del derecho de aprovechamiento de agua (Nº 2 del artículo 48 del Reglamento Nº 203), que describa la naturaleza física y situación jurídica del agua a utilizar en la recarga artificial. En consecuencia, si bien este procedimiento exige contar con un derecho de aprovechamiento que faculte a extraer el agua que será recargada, no es requisito ser propietario de él, siempre que el solicitante tenga algún título sobre dicho derecho que lo faculte para su uso en el tiempo. Dicho título deberá permitirle su uso, por a lo menos un par de años, que se estima pueden durar este procedimiento y el posterior otorgamiento del derecho provisional con cargo a la recarga, más un posterior período de uso. Dentro de estos títulos cabe mencionar un arriendo, o, un usufructo del derecho de aguas, a largo plazo, anotados al margen de la inscripción de dominio del derecho de aprovechamiento (para que sea oponible a terceros), u otro que le autorice su uso en el tiempo.

En el caso de recarga con agua de lluvia o aguas de avenidas o de aluviones no será necesario acreditar derechos de aprovechamiento. Se podrá utilizar esa agua siempre y cuando no afecte la recarga natural del acuífero o no provoque un daño en los derechos a terceros.

En caso de no tener los derechos se deberá detener la evaluación del proyecto e informarle al solicitante que vuelta a presentar la solicitud cuando cuente con dichos

derechos. Al respecto, se aclara que esta indicación sólo es aplicable a proyectos que ingresen mediante DGA REGIONAL, dado que, en el contexto del SEIA, no es requisito contar en forma previa con derechos de agua constituidos para ingresar la evaluación ambiental. Siendo procedente en esos casos considerar la obligación sectorial del titular de tramitar el derecho de aprovechamiento en forma paralela o posterior al proceso de evaluación ambiental.

Por otro lado, verificar la disponibilidad de agua cercana que garantice la viabilidad del proyecto de recarga artificial, así como la procedencia del tipo de agua para la recarga: ríos, presas, acuíferos, agua potabilizada, excedentes de riego, efluentes tratados y regenerados, esorrentía urbana, agua de crecidas, entre otros. En todo caso se debe asegurar que el agua infiltrada sea de la misma calidad o superior a la del acuífero, es decir, se deberá evaluar el agua que se utiliza para la recarga no puede superar el 10% de los valores máximos establecidos en la línea base o condición natural del acuífero, lo cual se estudiará caso a caso. Además, se deberá evaluar el balance oferta y demanda de agua presentado para el proyecto de recarga.

6.2.2 Propiedad del suelo

Al respecto, el procedimiento para ejecutar obras de recarga artificial, requiere el uso del suelo en que dichas obras se constituirán.

Para ello, **el solicitante puede ser dueño del inmueble en que se ubicarán dichas obras**, lo que se acreditará con copia autorizada de la correspondiente inscripción de dominio, con una antigüedad de no más de 60 días, contados desde la fecha de presentación de la solicitud. En caso que el solicitante no sea dueño del inmueble, para la ejecución de dichas obras, deberá contar con la autorización escrita del dueño, cuya firma haya sido autorizada por un notario público.

Si la obra se encuentra ubicada en un bien nacional de uso público, se requerirá la autorización del organismo encargado de su administración, a través de la emisión del respectivo acto autorizador.

Y, para el caso que la obra se encuentra ubicada en un bien fiscal, se debe acompañar la autorización del Ministerio de Bienes Nacionales.

6.2.3 Afecciones a terceros

En el Código de Aguas, la afectación de terceros constituye la causal genérica de oposición a cualquiera de sus procedimientos, conforme a lo dispuesto por el artículo 132 (“Los terceros que se sientan afectados en sus derechos”). Sin embargo, dicha causal exige que la afectación sea en sus derechos de aprovechamiento de aguas, y no en otros derechos, pues en este último caso la DGA no es competente para resolver.

La oposición se realizará dentro del plazo de 30 días contados desde la fecha de la última publicación, o, de la notificación en su caso. Así, dentro del quinto día de recibida la oposición, la autoridad dará traslado de ella al solicitante, quién tendrá un plazo de 15 días para responderla.

Las oposiciones serán resueltas por la DGA conforme a las normas comunes a esta clase de procedimientos.

Cabe recordar que para aprobar obras de infiltración la DGA debe verificar que no se provoque la colmatación del acuífero, ni la contaminación de las aguas.

6.2.4 Normativa aplicable

Verificar artículos 66 inciso 2º del Código de Aguas, y 47 a 49, ambos inclusive, del Reglamento N° 203, de 2013.

6.3 Evaluación ambiental

Es indispensable evaluar la compactibilidad del proyecto de recarga con determinadas restricciones ambientales existentes, que a priori no se generarían impactos evidentes sobre la calidad del agua existente y que no se compromete el estado de potenciales ecosistemas cercanos.

6.3.1 Existencia de restricciones ambientales

Conforme a la normativa específica, la recarga artificial procede en sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común.

De acuerdo a la letra g) del artículo 54 del Reglamento N° 203, un sector hidrogeológico de aprovechamiento común es un acuífero o parte de un acuífero cuyas características

hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión en forma independiente.

Así, respecto de la recarga, la normativa atiende al funcionamiento independiente de un área o sector.

Sin embargo, hay que considerar que los trabajos de recarga artificial en Chile han sido focalizados en aquellas cuencas que han sido declaradas áreas de restricción por la DGA. En este contexto, se puede mencionar el desarrollo de proyectos pilotos en: acuíferos de la Ligua y Petorca, Cuencas del río Choapa y Quilimarí, Valle del Aconcagua y la cuenca del Río San José.

En resumen, **el proyecto de recarga debe ser compatible** con posibles restricciones ambientales de protección medioambiental o de los acuíferos.

6.3.2 Impactos sobre calidad del agua

Durante la fase de diseño del proyecto se evaluarán los posibles impactos ambientales en función de las características del medio y del agua.

Para evaluar los potenciales impactos se compararán los datos del resultado de las redes de monitoreo con los datos de la línea base del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC). La línea base se habrá definido previamente a partir de los valores máximos recogidos para cada uno de los parámetros. Se tendrán en cuenta las variaciones temporales de los parámetros y, por lo tanto, se considera indispensable disponer de datos de como mínimo 1 año de monitoreo y así poder establecer un rango de valores base. Por lo tanto, se recomienda evaluar que el agua utilizada para la recarga no pueda superar el 10% de los valores máximos establecidos en la línea base o condición natural del acuífero, lo cual se estudiará caso a caso.

Los tratamientos más habituales para mejorar la calidad del agua para la recarga son los siguientes:

- Pretratamiento del agua de inyección (ninguno, primario, secundario, terciario o cuaternario). El tratamiento primario consiste en el asentamiento de sólidos; el secundario en el tratamiento biológico de la materia orgánica disuelta

transformándola en sólidos suspendidos que se eliminan fácilmente; el tratamiento terciario incluye pasos adicionales como lagunas, microfiltración o desinfección y finalmente el cuaternario es la potabilización final.

- Postratamiento del agua (ninguno, primario, secundario, terciario o cuaternario).

6.3.3 Identificación de potenciales ecosistemas asociados

Algunos ecosistemas requieren directamente de acuíferos para existir, entre ellos se encuentran los: humedales, vegas, bofedales, cauces naturales, etc. Se debe considerar la existencia de éstos y la distancia a la que se sitúan para identificar potenciales impactos sobre los mismos. En estos casos, será indispensable situar un punto de control en los mismos.

Es importante señalar que un punto de control debe cumplir con un estándar mínimo, lo que en el caso de proyectos que se presenten en el marco del SEIA, será resuelto considerando el contexto y la envergadura del proyecto, los antecedentes de la línea base que se dispongan del área de estudio y el análisis de impactos ambientales.

6.4 Evaluación técnica

6.4.1 Descripción del proyecto de recarga artificial

6.4.1.1 Tipo de dispositivo y disposición de obras

- Evaluar la factibilidad técnica del tipo de obra de infiltración propuesto.
- Verificar el análisis de las ventajas e inconvenientes del dispositivo usado frente las características del medio estudiado.

6.4.1.2 Características del emplazamiento

Existen una serie de parámetros hidrogeológicos en el emplazamiento que desde el inicio del proyecto ya condicionan el tipo de dispositivo, tal como se mostró en el apartado 3.3.5 de este informe.

Por lo tanto, se recomienda la evaluación de diferentes aspectos como:

- Modificaciones en cauces. Se trata básicamente de presas de diferentes tipos que se construyen en los cauces para favorecer la recarga por infiltración al acuífero subyacente. Evaluar si aplica el “Principio de Modificación de Cauce”, para esto ver “Guía trámite del PAS para efectuar modificaciones de cauce (SEA, 2014)”.
- Considerar como referencia la guía “Permiso para la construcción de ciertas obras hidráulicas (SEA, 2014), en el caso que ello resulte procedente de acuerdo a las características técnicas de las obras.
- Profundidad de la zona no saturada. Debe ser suficiente para permitir la atenuación de potenciales contaminantes. Este caso es aplicable a dispositivo de infiltración y se requieren como mínimo 5 m de zona no saturada para recarga con procesos de tratamiento agua-suelo. Este valor recomendado de 5 m podría verse reducido si:
 1. El modelo numérico realizado demuestra que el aumento de niveles con los volúmenes de recarga propuestos no supondrá impactos en la zona y los niveles alcanzarán valores máximos que estarán siempre como mínimo 2 metros por debajo de la superficie del terreno.
 2. El agua de recarga no contiene contaminantes que requieran atenuación a través de la zona no saturada.
 3. En el caso que el agua de recarga contenga contaminantes el solicitante puede realizar estudios adicionales para solicitar una reducción de estos 5 metros. Estos estudios adicionales deberán incluir una recopilación de experiencias de otros emplazamientos con el mismo tipo de contaminantes y distancias inferiores a 5 m donde demuestren que se produce la atenuación. Adicionalmente podrían realizar estudios de laboratorio con columnas experimentales donde demuestren la atenuación. El proyecto europeo DEMAU ([www. http://demeau-fp7.eu/](http://demeau-fp7.eu/)) ha elaborado una guía de cómo realizar ensayos de columna para proyectos de recarga artificial.

6.4.1.3 Modelación hidrogeológica para estimar el efecto de la recarga

Junto con la memoria de la solicitud de construcción de la obra de recarga, el solicitante habrá entregado a la DGA el modelo numérico desarrollado.

En la fase de evaluación de la instalación es indispensable el desarrollo de un modelo numérico que permita simular el flujo de agua subterránea y el transporte de contaminantes. Se construirá un modelo numérico que reproduzca el modelo conceptual y posteriormente se utilizará para predecir los efectos de la recarga ante diferentes escenarios. Este modelo se revisará y actualizará con los datos de la fase piloto una vez se haya puesto en marcha. Básicamente, permitirá modelar el efecto de la recarga sobre la cantidad de las aguas del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común. En este apartado se deberá:

- Verificar si el modelo conceptual y numérico cumple con los requisitos mínimos establecidos en la "Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA, 2012"). Con el objetivo de orientar la evaluación, se recomienda solicitar al Usuario, estudios de laboratorios con columnas de suelo con diferentes horizontes que permitan: una descripción de la litología, caracterización hidráulica de cada horizonte (conductividad hidráulica saturada, capacidad de absorción, curva de succión, etc.), caracterización geoquímica (capacidad de intercambio catiónico), modelación acoplada al flujo de transporte y geoquímica, entre otros.
- Evaluar si los escenarios simulados recogen el campo de variaciones probables en los diferentes aspectos considerados.
- Verificar la respuesta prevista del acuífero al volumen de agua inyectado, comprobando si la disponibilidad de agua el acuífero es suficiente para recibir agua sin producir impactos en la superficie. Evaluar la capacidad de almacenamiento versus volumen inyectado. Esta evaluación permitirá identificar si en caso de tratarse de importantes volúmenes de agua podrían darse impactos en la superficie o infraestructuras asociadas y la tipología de los mismos.
- Evaluar el **análisis de sensibilidad y calibración** del modelo presentado.
- Comprobar que el modelo se ha revisado y actualizado (si es el caso) con los datos de la fase piloto y verificar la respuesta del acuífero siguiendo las mismas recomendaciones anteriores.

Además, es recomendable verificar si el modelo numérico da respuesta a una serie de incertidumbres respecto del funcionamiento de la instalación:

- Reproduce el modelo conceptual y aporta información sobre dirección y velocidad de flujo.

- Acotar el valor de la recarga al acuífero y por lo tanto, el volumen de agua en que se incrementarán los recursos del acuífero.
- Identificar y estimar potenciales impactos tanto sobre el estado cuantitativo como cualitativo del sistema.
- Evaluar la viabilidad a largo plazo.
- Considerar el funcionamiento de la instalación ante diferentes escenarios de sequía o inundaciones.
- Exactitud de los datos.
- Establecer la regla de operación.
- Evaluar la ubicación de los puntos/zonas de recarga y de extracción.
- Diseñar las dimensiones de la instalación.
- Evaluar la viabilidad de la misma.
- Evaluar la efectividad de las acciones correctivas incluidas en el PAT.
- Simular la operación del proyecto durante toda su vida útil
- Evaluar un escenario que incluya la fase de cierre de la obra de recarga.

En el caso que el dispositivo de recarga utilice la capacidad de atenuación de contaminantes de la zona no saturada (ZNS) se requerirá que el estudio hidrogeológico y el modelo numérico hayan tenido en cuenta:

- Como mínimo 5 tests de infiltración en la zona de la recarga y que los modelos numéricos incorporen los valores obtenidos en este trabajo de campo.
- Que los parámetros hidráulicos del modelo hidrogeológico estén basados en un ensayo de bombeo de larga duración llevado a cabo en la zona de recarga.
- Que las características del acuífero se basen en los resultados de un ensayo de trazadores de la zona de recarga o afín.

6.4.1.4 Índice de contenido mínimo de la Memoria Técnica

A continuación (Tabla 6-1) se indica el índice de contenidos mínimos que debería contener la memoria a adjuntar con la solicitud del proyecto de recarga artificial.

Tabla 6-1 Índice de contenidos mínimos para la memoria técnica de solicitud de un proyecto de recarga artificial.

FASE	CONTENIDOS
Fase previa o de preselección	<p>Justificación de la necesidad del proyecto</p> <ul style="list-style-type: none"> - Motivación del proyecto. - Cálculo de la demanda de agua. - Cálculo de recursos disponibles. - Balance oferta-demanda. <p>Evaluación de la factibilidad ambiental</p> <ul style="list-style-type: none"> - Existencia de restricciones ambientales. - Evaluación de potenciales impactos. - Identificación y caracterización de ecosistemas asociados. <p>Evaluación inicial de la factibilidad técnica</p> <ul style="list-style-type: none"> - Características del emplazamiento. - Usos del suelo. - Pendiente. - Capacidad de Infiltración. - Distancia a problemas de contaminación de aguas subterráneas. - Tiempo de residencia o de tránsito. - Eficiencia de recuperación. - Gradiente hidráulico. - Tipo y características del acuífero (poroso/fracturado, libre/confinado, etc.). - Profundidad de la zona no saturada. - Volumen de acuífero disponible. - Potencia acuífero. - Transmisividad. - Potencia de los niveles impermeables debajo la superficie. - Evaluación de los volúmenes de inyección respecto el total del acuífero.
Fase de viabilidad	<p>Caracterización del medio y del SHAC</p> <ul style="list-style-type: none"> - Establecimiento de la línea base de la zona y SHAC (calidad y nivel piezométrico). - Topografía. - Geología, hidrogeología y modelo conceptual de la zona. - Estudios y ensayos de caracterización del subsuelo y el acuífero para dar valores a los parámetros hidráulicos (en función de la información disponible): piezómetros, geofísica, ensayos de bombeo, tensiómetros, tests de infiltración, caudalímetros, pluviómetros, ensayos de trazadores). - Selección y justificación del tipo de dispositivo de recarga. <p>Evaluación ambiental del proyecto</p> <ul style="list-style-type: none"> - Identificación de los impactos. - Evaluar viabilidad calidad del agua de recarga. - Identificar los usos a los que se destinará el agua de recarga.

FASE	CONTENIDOS
Fase de evaluación y diseño	<ul style="list-style-type: none"> - Elaboración del modelo conceptual. - Elaboración de los modelos numéricos de flujo y transporte según "Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA (SEA, 2012). - Dimensionamiento de la instalación según parámetros de campo - Evaluación económica (Análisis del ciclo de vida). - Cálculo de los costes de construcción, operación, mantenimiento y cierre. - Plan de gestión de una eventual contaminación. - Diseño de la instalación.
Fase planta piloto	<ul style="list-style-type: none"> - Descripción y características del dispositivo de esta fase. - Caudales. - Ubicación de las obras y especificaciones técnicas. - Ajuste de los modelos conceptual y numérico. - Plan de monitoreo. - Plan de operación y mantenimiento. - Plan de alerta temprana. - Estudio ambiental. - Plan de cierre o adaptación a la fase de proyecto industrial.
Fase de implementación	<ul style="list-style-type: none"> - Definir el plan de mantenimiento. - Definir el plan de monitoreo. - Procedimiento de evaluación de la efectividad de la recarga. - Evaluación de la dilución en los puntos de muestreo. - Técnicas de gestión de la colmatación. - Plan de cierre.

6.4.2 Descripción y características geológicas e hidrogeológicas del sector de la recarga

Verificar si se han realizado los siguientes estudios:

- **Línea base**

Cómo mínimo se sugiere una línea base de datos de nivel y calidad de agua: La línea base se define con los valores máximos registrados durante el periodo de muestreo (siempre y cuando no sean valores anómalos u "outliers"). Se define para:

- Variación de los niveles piezométricos de la zona. Como mínimo debe disponerse de datos de un año antes de la puesta en marcha de la instalación.
- Variación de la calidad del agua subterránea. Como mínimo se recomienda muestrear cuatro puntos mensuales, de los cuales como mínimo uno se debería incluir en la red de monitoreo posterior una vez funcione la instalación.

Los puntos donde se analicen los parámetros de la línea base deberán ser representativos del acuífero. De esta manera, deberán estar ranurados únicamente en el acuífero. En el caso que la recarga se produzca sobre alguna formación objetivo, la línea base se definirá con puntos ranurados únicamente en esa formación. Si el acuífero a recargar está hidráulicamente conectado con otros acuíferos, se establecerá la línea base de estos acuíferos incluyendo un punto de control ranurado únicamente en el acuífero conectado.

- **Estudio topográfico**

Como mínimo el estudio topográfico debe permitir evaluar la posición de la balsa de recarga respecto el nivel piezométrico y el resto de puntos, al mismo tiempo que estimar el volumen disponible para la recarga. También, en caso de pretender construir una infraestructura en el río, el estudio topográfico proporcionará la información para elegir la zona más idónea.

- **Estudio geofísico**

- Como mínimo deben permitir caracterizar la estructura y geometría del acuífero. Los límites del acuífero son básicos para evaluar la capacidad de almacenamiento y por consiguiente, la viabilidad del proceso de recarga. Adicionalmente, se utilizan para caracterizar la heterogeneidad espacial del acuífero y para identificar la presencia de niveles impermeables en profundidad que podrían limitar la infiltración desde la superficie.
- En caso de tratarse de un acuífero con intrusión salina, estos métodos de estudio también ofrecen soluciones para identificar la posición de la cuña salina y sus variaciones anuales.

- **Estudio geológico e hidrogeológico**

- Cómo mínimo el estudio debe permitir caracterizar lo siguiente:
 - Piezometría, gradiente hidráulico y principales direcciones de flujo.
 - Cálculo de la recarga.
 - Conductividad hidráulica.
 - Capacidad o volumen de almacenamiento.
 - Eficiencia de recuperación del agua inyectada.
 - Tasa de infiltración.
 - Tasas y volúmenes de inyección.

Adicionalmente, se deben evaluar otros antecedentes como:

- Construcción de piezómetros sugeridos en caso que no se dispongan de estadísticas de niveles de la zona de estudio.
- Ensayo de campo: bombeo, tests de infiltración, ensayos de trazadores, instalación de tensiómetros y sondas de disipación de calor, caudalímetros, pluviómetros, entre otros.

6.4.2.1 Información de registros conocidos sobre el nivel del acuífero del sector

Se evaluará la presentación de una línea base de aguas subterráneas mediante el registro de niveles piezométricos de la zona de estudio como mínimo de 1 año. En caso de tratarse de un año climatológicamente anómalo se recomienda recoger más datos de nivel. Evaluar que uno de los puntos de monitoreo facilitado por el solicitante para la fiscalización, esté instrumentalizado con un *datalogger* o sonda de nivel automática que permitirá hacer lecturas automáticas con una periodicidad mucho más elevada (se recomienda diaria). Este punto de control se mantendrá equipado durante el funcionamiento posterior del sistema en la medida posible.

6.4.2.2 Caracterización de la calidad de las aguas a infiltrar y de la calidad de las aguas del acuífero receptor

Durante la fase de diseño del proyecto se evaluarán los posibles impactos ambientales en función de las características del medio y del agua.

Se tendrán en cuenta las variaciones temporales de los parámetros y, por lo tanto, se considera indispensable disponer de datos de como mínimo 1 año de monitoreo con periodicidad trimestral y así poder establecer un rango de valores base. Para evaluar los potenciales impactos se compararán los datos del resultado de las redes de monitoreo con los datos de la línea base del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC). Por lo tanto, se recomienda que el agua que se utiliza para la recarga no supere el 10% de los valores máximos establecidos en la línea base o condición natural del acuífero; en caso contrario deberá justificarse debidamente (ver sección 6.4.2.3).

Algunos tipos de tratamientos para mejorar la calidad del agua para la recarga, son:

- Pretratamiento del agua de inyección (ninguno, primario, secundario, terciario o cuaternario). El tratamiento primario consiste en el asentamiento de sólidos; el secundario en el tratamiento biológico de la materia orgánica disuelta transformándola en sólidos suspendidos que se eliminan fácilmente; el tratamiento terciario incluye pasos adicionales como lagunas, microfiltración o desinfección y finalmente el cuaternario es la potabilización final.
- Postratamiento del agua (ninguno, primario, secundario, terciario o cuaternario).

6.4.2.3 Evaluación de impactos ambientales

Se evaluará como mínimo los siguientes aspectos:

- Análisis de los impactos
 - Por variación del nivel piezométrico.
 - Por cambios en la calidad del agua.
- Tratamientos previos en el agua de recarga
 - Usos del agua recargada.

i. Análisis de los impactos

La recarga artificial de acuíferos puede tener tanto impactos positivos como negativos para el medio ambiente y el entorno si no se tienen en cuenta todos los factores. Los estudios de viabilidad deben incluir un análisis de los impactos sobre las zonas adyacentes. Hay que considerar, que un proyecto de recarga artificial puede ingresar, además de la letra a) del artículo 10 de la Ley de Bases del Medio Ambiente, por la letra

p) del mismo artículo 10, toda vez que la ejecución de obras, programas o actividades (entre las que se cuenta la recarga artificial de acuíferos) en áreas de protección oficial, deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Los mayores impactos ambientales están asociados con el aumento y disminución de los niveles piezométricos y con los potenciales cambios de la calidad del agua del acuífero (DWA, 2009) y pueden afectar tanto a recursos medioambientales como a usuarios cercanos. Como consecuencia, los proyectos deben diseñarse minimizando todos los impactos posibles. La Figura 6-1 resume todos los impactos ambientales a tener en cuenta en este estudio y en la sección 3.5.3 de este documento se describen. En esta fase del proyecto deben realizarse los estudios necesarios, según cada instalación, para evaluar la probabilidad de ocurrencia de estos impactos. El plan de monitoreo se enfocará para poder cuantificar y minimizar los posibles impactos.



Figura 6-1 Identificación de impactos ambientales.

ii. Calidad del agua de recarga: tratamientos previos

Existen diferentes tipos de agua de recarga con diferentes características cualitativas. Las características físicas y químicas de este agua tendrán influencia tanto en el diseño del dispositivo de recarga para minimizar los potenciales impactos ambientales como en las consideraciones legales. En términos generales, no se podrá recargar agua de peor calidad que la calidad del acuífero. Por lo tanto, se recomienda que no se superen los valores máximos fijados en la línea base del acuífero. Si alguno de los valores se supera en un 10% deberá justificarse que no hay impacto sobre la calidad del acuífero.

En función del tipo de agua será necesario aplicar algunos pre-tratamientos previos a la recarga artificial. En algunos casos será suficiente un filtrado (agua de río, lluvia, tormenta) mientras que en otros casos puede ser recomendable un tratamiento terciario (agua regenerada), tal como se mostró en la Tabla 3-5.

iii. Usos del agua recargada

La calidad del agua de recarga determinará los pretratamientos mientras que su uso final condicionará los post-tratamientos. En principio, sólo se requiere desinfección cuando se destina a abastecimiento de consumo humano (Tabla 3-5).

6.4.2.4 Dimensionamiento y diseño de la instalación

El dimensionamiento de una instalación dependerá de los volúmenes de agua a gestionar y de las características del medio.

En el caso de balsas de infiltración se verificará el cálculo de la tasa de infiltración para ver los volúmenes de agua que pueden recargarse cada cierto tiempo y las dimensiones de las balsas almacenarán el volumen de agua de recarga estimado y que la recarga dure un periodo de tiempo razonable.

En el caso de pozos, se verifican los diseños según profundidad de la zona saturada y caudales de extracción.

Adicionalmente, se podrán evaluar las dimensiones, materiales, planos y gestión del proyecto constructivo. Se recomienda que los proyectos que incluyen planos y mapas los archivos sean presentados en formato SIG o CAD. Además, puede tomarse como

referencia las “Especificaciones técnicas generales y específicas de un proyecto piloto de recarga artificial” de la DGA y AC Ingenieros Consultores (2012).

6.5 Plan de operación, mantenimiento y comunicación

6.5.1 Plan de operación: inyección

Debe elaborarse un plan de operación que describa todos los aspectos de funcionamiento de la propia instalación. Estos aspectos son importantes porque determinan los recursos necesarios para poder llevar a cabo el proyecto de recarga. Este plan de operación incluirá como mínimo lo siguiente:

1.- Una descripción técnica detallada de la instalación. Debe hacerse mención a:

- Recursos materiales: infraestructura y materias primas necesarias para la obra.
- Recursos humanos: cantidad de personal y formación requerida para la operación de la instalación.
- Descripción del funcionamiento: tipo y características de recarga y extracción, pérdidas de agua, periodo de almacenamiento, periodo de recuperación, volumen de recuperación, duración del ciclo de infiltración/inyección, etc.).
- Descripción del plan de mantenimiento: gestión de la colmatación.
- Descripción del plan de monitoreo.
- Descripción del plan de Alerta temprana y del plan de gestión de una eventual contaminación.

2.- Abastecimiento. Datos de interés respecto a los requerimientos de agua, de servicios y de necesidades energéticas para operar el sistema. En caso de requerir proveedores, especificar las características.

3.- Estimación aproximada de costes de construcción y costes operativos. Análisis de costes del proyecto de recarga artificial.

4.- Uso del agua. Definir el uso que se dará al agua y detallar si se va a comercializar de alguna manera.

6.5.2 Plan de mantenimiento

En una instalación de recarga suelen combinarse dos tipos de mantenimiento: el mantenimiento preventivo y mantenimiento de la operación.

El mantenimiento preventivo implica la realización de una acción periódica. Pueden ser los ciclos de secado o la escarificación en balsas de recarga, el bombeo periódico de pozos de inyección, la aplicación regular de lubricantes o de sustancias protectoras (como aceites, grasas o pinturas) o el reemplazo de pequeñas partes sujetas a deterioro. El mantenimiento preventivo también incluye la observación regular y el registro del comportamiento de los elementos estáticos y dinámicos para poder detectar a tiempo la necesidad de mantenimiento no previsto. Estos parámetros de control pueden ser la variación de las tasas de recarga, la temperatura de los elementos mecánicos, el volumen y número de filtraciones, la intensidad de la vibración, entre otros.

El mantenimiento preventivo se debe programar de manera más o menos regular o preestablecida.

Existen dos tipos generales de mantenimiento preventivo en las operaciones de recarga por infiltración, los cuales se sugieren a continuación:

- Ciclo húmedo-seco: consiste en rellenar la balsa de recarga y parar el flujo de entrada una vez llena. Una vez infiltrado el volumen de agua se espera a que se seque y se forme fracturas de desecación. Este funcionamiento permite que además de secarse y romperse el fondo de la balsa se alcance un estado aeróbico. Este ciclo se puede mantener hasta que la tasa de infiltración disminuya considerablemente y entonces será necesario eliminar la capa decantada al fondo de la balsa. Este material deberá ser tratado y depositado en el emplazamiento pertinente según las características del mismo. Una variación de este método es remover el fondo de la balsa cuando está seco para facilitar la infiltración.
- Funcionamiento a nivel constante: la balsa se mantiene con un nivel de agua previamente establecido. De esta manera, la tasa de infiltración es igual al flujo de entrada a la balsa. Cuando la tasa de infiltración disminuye hasta niveles inaceptables se vacía la balsa y se remueve o elimina el material del fondo de la balsa.

El mantenimiento operacional se refiere a la observación del estado de la instalación prácticamente diaria para identificar posibles impactos (relacionados por ejemplo, con la colmatación) y tomar decisiones al respecto.

Hay que considerar que el agua de recarga puede movilizar algunos metales, compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en los materiales del acuífero, tal y como se ha indicado en el apartado de calidad del agua. El grado de movilización viene influenciado por una multitud de factores como el pH, la alcalinidad, el estado redox, el total de sólidos disueltos, la temperatura, los iones y aniones en disolución, entre otros. Como consecuencia, durante la operación de la planta se recomienda analizar muestras de suelo de los sondeos o de afloramientos cercanos, si es posible, para caracterizar los minerales y los elementos que se pueden movilizar. Además, el monitoreo del agua subterránea debe permitir identificar la presencia de estos elementos.

- **Actuación sobre el agua de recarga**

Para mantener las propiedades hidráulicas del acuífero es recomendable realizar una serie de tratamientos previos al agua de recarga, en función del tipo de dispositivo de recarga y de las características del agua.

En las balsas de infiltración es necesario eliminar las partículas inorgánicas en suspensión, mediante filtración o precipitación, las cuales pueden reducir las tasas de infiltración como se indica en la Tabla 3-5.

En el caso de pozos de inyección si el agua de recarga también contiene partículas en suspensión es recomendable eliminarlas por ejemplo mediante filtración. Si hay materia orgánica que puede producir *biofouling* (colmatación por microorganismos) será deseable eliminarla o añadir desinfectantes.

6.5.3 Plan de comunicación con la DGA

El solicitante y posterior operador de la instalación deberá comunicar a la Dirección General de Aguas (DGA) los avances del proyecto.

El primer nivel de comunicación se establecerá a partir de la solicitud de la obra e ingreso de todos los documentos para la solicitud del derecho según se detalla en la Guía.

- **FASE PILOTO**

- Informes cada 6 meses a la DGA de los resultados de las redes de control.
- Una vez finalizado el periodo de fase piloto (como mínimo 1 año) deberá entregar la información respecto al proyecto, que se haya podido ver modificada durante esta fase, el modelo ajustado con los datos de esta fase y la evaluación de los datos de las redes de control. Esta información tendrá como finalidad corroborar la viabilidad del proyecto y ajustar aquellos aspectos que se ha observado en la fase piloto que requerían mejoría.

- **FASE DE OPERACIÓN INDUSTRIAL**

- Informes cada 6 meses a la DGA de los resultados de la red de control.
- Informes anuales de los impactos asociados a la instalación y la efectividad de la recarga.

Finalmente, la DGA podrá solicitar visitas e inspecciones de la obra cuando lo requiera.

6.5.4 Plan de monitoreo y control de recarga

Para asegurar el correcto funcionamiento del sistema hay que diseñar un plan de monitoreo adecuado y considerar los aspectos de mantenimiento.

De esta manera y desde el inicio, en todos los proyectos de recarga artificial hay que contemplar un plan de muestreo y control que cumpla con los objetivos de:

- Proporcionar información detallada de la calidad del agua recargada.
- Demostrar la eficiencia de posibles tratamientos previos.
- Aportar información sobre la calidad del agua intrínseca del acuífero.
- Demostrar que no hay deterioro en la calidad del agua del acuífero y visualizar posibles mejoras.
- Monitorear la calidad del agua recuperada teniendo en cuenta el destino al que se quieran dedicar.
- Determinar la efectividad del esquema de recarga.

El monitoreo es indispensable para evaluar el funcionamiento del proceso, empieza con la caracterización de la línea base antes de la implantación del sistema de recarga. Debe cubrir tanto las variaciones temporales como espaciales y basarse en datos medios de

calidad en un punto, más que en un *peak* de concentración, ya que estos últimos pueden no ser representativos del agua de recarga. Los parámetros a analizar en los puntos de la línea base son los mismos que para evaluar los potenciales impactos.

Los resultados del monitoreo del agua, una vez implementado el sistema, permiten evaluar los procesos de atenuación natural de los contaminantes y, esto es especialmente relevante, si estos procesos de atenuación natural son parte del tratamiento a través de la zona no saturada.

La cantidad y ubicación de los puntos de control dependerá tanto de las dimensiones del dispositivo de recarga como de su tipología.

Para la definición de la red de monitoreo hay diferentes pasos a realizar:

- Identificar posibles usos del agua en las inmediaciones de las instalaciones. De existir, deberían colocarse puntos de control en estas zonas.
- Evaluar la existencia de posibles ecosistemas relacionados. En tal caso, también deberían tenerse en cuenta en el plan de monitoreo.
- Elaborar el modelo conceptual de flujo subterráneo y posible modelo numérico.
- Construcción o selección de los puntos de control. Se plantea la instalación de 4 puntos: uno aguas arriba de las instalaciones, otro a escasos metros de las balsas de recarga y preferiblemente con la opción de muestrear a diferentes profundidades y dos puntos de control aguas abajo a diferentes tiempos de tránsito (30 y 90 días). La cantidad de los puntos de control dependerá del acuífero. Así, en un acuífero cárstico se recomienda la instalación de más puntos de control. Los puntos de control estarán ranurados únicamente en la zona del acuífero. Para el punto más cercano al que se recomiendan diferentes profundidades de muestreo, hay diferentes posibilidades constructivas: construir un piezómetro multitubo (que esté ranurado en dos tramos diferentes de la zona acuífera), construir dos piezómetros ranurados en diferentes tramos del acuífero o construir un piezómetro ranurado en todo el acuífero, pero muestrearlo con *packers* para asegurar el área de muestreo.

Los puntos de control situados aguas debajo de la instalación de recarga artificial tienen que tener en cuenta diferentes aspectos relacionados al tiempo de tránsito y la periodicidad del muestreo:

- **El tiempo de tránsito.** Este se calcula según la velocidad del flujo y la permeabilidad y permite estimar el tiempo que tardará el agua de recarga en llegar a este punto. Mientras más tiempo, más diluida estará el agua de recarga, pero más degradados estarán los posibles contaminantes.
 - Se propone la colocación de un punto de muestreo a escasos metros del dispositivo de recarga. Su objetivo será el de evaluar el correcto funcionamiento de la recarga. Permitirá evaluar la efectividad y realizar ensayos de trazadores si es necesario.
 - El siguiente punto de muestreo se puede situar a un tiempo de tránsito de 30 días aproximadamente. Se considera que la completa eliminación de todos los compuestos se produce a los 6 meses de tiempo de tránsito (Asano y Cotruvo, 2004), de manera que a esta distancia aún pueden existir ciertos compuestos que deben ser monitorizados. El grado de dilución aumenta con la distancia al punto de recarga y si bien depende de diferentes factores, a esta distancia no es aún significativa y los compuestos, de no ser degradados, se detectan en la red de monitoreo.
 - Finalmente, un punto situado a 90 días de tiempo de tránsito debería contener concentraciones de los contaminantes degradables.
- **La periodicidad de muestreo** dependerá de cada emplazamiento, aunque se recomienda que el titular inicie el muestreo con una periodicidad mensual que puede luego espaciarse a cada seis meses en la fase industrial, si se hace coincidir con los dos periodos de aguas altas (épocas de lluvias que resultan en los niveles piezométricos más elevados) y aguas bajas (época de menor precipitación y más evapotranspiración/extracción que dan lugar a los niveles piezométricos más bajos). En el caso de acuíferos con vulnerabilidad elevada, o de recarga con efluentes líquidos se mantendrá la periodicidad de muestreo trimestral previamente establecida por el titular. En la fase de planta piloto los muestreos serán trimestrales.
- Respecto a los **parámetros de muestreo**, al inicio de la línea base debe realizarse una analítica completa, la Norma chilena de calidad de agua para

consumo humano (NCh 409). A partir de esta analítica completa se definen los parámetros a analizar en las campañas siguientes. Estos serán los mismos independientemente del tipo de dispositivo de recarga. Únicamente variará la frecuencia en el caso de recarga con aguas regeneradas o de peor calidad a la del acuífero o en zonas de elevada vulnerabilidad.

- ANÁLISIS DURANTE LA LÍNEA BASE
 - Al inicio del muestreo de la línea base debe realizarse una analítica completa según el decreto de calidad de las aguas de consumo humano. Si no existen contaminantes orgánicos no es necesario volverlos a analizar hasta la puesta en marcha de la instalación (piloto e industrial) en que deberán volver a analizarse.
 - Todos los compuestos minoritarios no detectados no se volverán a analizar hasta la puesta en marcha de la instalación (piloto e industrial).
 - En todas las campañas se analizará: compuestos mayoritarios, metales susceptibles de cambios por las condiciones redox (Fe, Mn, As, Al y Cu), contenido TOC, nitratos y parámetros in-situ. También se analizarán esos compuestos minoritarios que estaban por encima del valor guía recomendado en la primera analítica.
- ANÁLISIS DURANTE LA PUESTA EN MARCHA DE LA INSTALACIÓN (FASE PILOTO+FASE OPERATIVA)
 - Al inicio de la operación debe realizarse una analítica completa según la norma de calidad de aguas de consumo humano (Nch 409). Este tipo de control se realizará anualmente.
 - En el resto de campañas se analizarán los compuestos mayoritarios, los metales susceptibles de cambios por las condiciones redox (Fe, Mn, As, Al y Cu), contenido TOC, nitratos y parámetros in-situ (pH, potencial redox, temperatura, conductividad eléctrica). También se analizarán esos compuestos minoritarios que estaban por encima del valor guía recomendado en la primera analítica.
 - Los controles periódicos incluirán los índices microbiológicos contenidos en la norma de calidad de agua para consumo humano (Nch 409), tales como: Coliformes totales y Escherichia Coli. Los análisis microbiológicos deberán hacerse en cualquier caso, pues muchas veces los escurrimientos

superficiales reciben descargas de fuentes contaminantes, así también como los canales.

El solicitante deberá estimar la línea base de calidad y de cantidad del acuífero. Esta línea de base debe estimarse con los valores recogidos. El objetivo no es definir los valores intrínsecos del acuífero sino identificar posibles cambios debido a la recarga.

- Se deben utilizar datos de como mínimo 1 año de monitoreo. Si se dispone de datos previos, procedentes de otros estudios o controles, también se utilizarán para evaluar la línea base.
- La línea base se establece utilizando los valores máximos recopilados en las diferentes analíticas para cada uno de los parámetros. Estos valores máximos servirán de guía tanto para la calidad del agua de recarga como para evaluar potenciales impactos derivados de la propia operación de recarga. Cuando el coeficiente de variación de un determinado parámetro (Desviación estándar/ media aritmética) sea superior a 0,5 entonces el valor a utilizar de ese parámetros será el correspondiente al percentil 75 (por debajo de ese valor se encuentran el 75% de las muestras).
- Para el establecimiento de los niveles piezométricos de base se trabajará con series de tiempo y se darán cuatro valores promedio para cada uno de los trimestres hidrológicos.

6.5.5 Pautas para la evaluación de la efectividad de la recarga

El solicitante deberá verificar la efectividad de la recarga tanto en la fase piloto como en la fase industrial.

Para eso, los datos que se utilizarán serán:

- Niveles de agua en los puntos de observación.
- Niveles de agua en pozos de inyección o niveles de agua en balsas o presas.
- Rendimiento de pozos.

En los dispositivos de inyección se contará con dos tipos de evaluaciones de la efectividad de la recarga:

- Aumento de los niveles piezométricos en los puntos de observación indicará que efectivamente se produce una recarga del acuífero. En función de la distancia y de los parámetros hidráulicos del acuífero el aumento de los niveles puede ser centimétrico con lo cual se recomienda el uso de dataloggers automáticos. La introducción de estos datos en el modelo numérico dará información sobre la zona de afección positiva de la recarga. El modelo numérico ajustado debería predecir los aumentos piezométricos para los volúmenes inyectados y estimar la recarga que se está produciendo. Como mínimo, los puntos más cercanos al pozo de inyección deberían registrar aumentos de nivel.
- Disminución del nivel piezométrico en los pozos de inyección/niveles en balsas será indicativo de que disminuye la efectividad en la recarga. En este caso, deberá procederse a realizar un lavado del pozo según el tipo de mantenimiento elegido (backwashing, aire, aditivo químico, entre otros).

Para los dispositivos de infiltración las principales herramientas serán:

- Aumento de los niveles piezométricos en los puntos de observación será indicativo del correcto funcionamiento de la recarga. En este caso aún será más necesario la instalación de dataloggers automáticos ya que tratándose de una recarga por infiltración el aumento de los niveles puede ser de magnitudes inferiores. El modelo numérico deberá predecir y reproducir los aumentos de nivel para los volúmenes de recarga aplicados. Los puntos de control deben estar situados de manera que sea posible registrar este aumento de los niveles.
- Disminución de las tasas de infiltración indicarán que probablemente se están dando procesos de colmatación y que por lo tanto se requieren actividades de limpieza para aumentar la efectividad de la recarga.

En ambos tipos de dispositivos se podrán utilizar criterios cualitativos para evaluar la factibilidad de la recarga:

- Cuando los fines son ambientales, si hay mejoras en los aspectos deteriorados (ecosistemas, salinidad, caudales, etc.) indicará que la recarga está funcionando según lo previsto.
- Cuando se trate de zonas sobrexplotados, la recarga artificial debería significar un aumento de los niveles piezométricos o de caudales en las masas de aguas

asociadas (cursos de agua superficial, embalses, lagos, manantiales, vertientes, etc.).

- Si el agua de recarga contiene algún trazador (elemento químico que no se degrada, que no existe en el acuífero y que no supone ningún impacto negativo) puede utilizarse para evaluar el efecto y extensión de la recarga.

La respuesta del sistema hidrogeológico a la recarga no es inmediata y en algunos casos puede necesitarse un año para identificarse impactos positivos. De esta manera, se irán recogiendo datos de las redes de control y evaluando el funcionamiento del sistema. Esto permitirá ir ajustando la regla de operación del dispositivo. Al finalizar la etapa de fase piloto debería haberse identificado algún impacto positivo en el acuífero. La magnitud de estos impactos positivos dependerán de la magnitud de los dispositivos de recarga según los detallado en el apartado de justificación de la instalación. El modelo numérico en base a los datos introducidos, debería permitir estimar la efectividad de la recarga utilizando los datos de niveles registrados durante el periodo de operación.

6.6 Plan de alerta temprana (PAT) para el derecho provisional con cargo a la recarga: Extracción

El solicitante deberá diseñar un sistema de alerta ante eventuales incidentes siguiendo las indicaciones de la "Guía Metodológica de Elaboración y Gestión de Planes de Alerta Temprana (PAT) (HIDROMAS, 2014). Es importante señalar que, el derecho provisional con cargo a la recarga artificial lleva implícito la necesidad de desarrollar y cumplir un PAT.

Se considera que un PAT es una herramienta de gestión que permite tomar medidas de manera preventiva con el objeto de evitar que se produzcan efectos no deseados sobre el entorno. Dicho PAT tendrá en cuenta:

- Afectaciones a derechos de terceros.
- Afectaciones al acuífero por extracciones con cargo a la recarga.
- Eventuales contaminaciones.

El PAT del ejercicio del derecho de aprovechamiento de agua con cargo a la recarga debe ser especificado en la memoria técnica que presente el usuario.

6.7 Plan de gestión de una eventual contaminación

El solicitante elaborará un plan de acción para hacer frentes a eventuales contaminaciones. Este plan debe incluir:

- Procedimientos de protección a llevar a cabo en caso que se detecten contaminaciones en las inmediaciones.
- Procedimientos de protección a llevar a cabo en caso que se detecten contaminaciones en propiedades privadas.
- Campañas de comunicación para informar sobre los sucesos.
- Actividades de remediación viables en caso de problemas de contaminación.

En caso de detectarse cambios en la calidad del agua según los niveles de acción y umbrales se actuará siguiendo las acciones indicadas en el PAT.

En caso que estas contaminaciones puedan suponer riesgo sobre la salud humana:

- Se parará totalmente la instalación y se solicitará al usuario ajustar el modelo numérico e hidrogeoquímico para identificar las reacciones que están teniendo lugar.
- Los tiempos y plazos deberán estimarse de acuerdo a cada caso y deberán ser establecidos en este plan de contingencia. Siendo lo principal la información inmediata que se debe entregar a los servicios correspondientes (servicio de salud, DGA, Municipio, etc.), el cese inmediato de la recarga y acciones inmediatas para remediar el problema.
 - o Si hay riesgo a la salud humana se deberán tomar acciones de forma inmediata.
 - o Si mejora la calidad del agua y retorna a la línea base, se revisará la regla de operación según modelo numérico.
- Se diseñará un plan de comunicación claro y conciso que aporte toda la información a la población. Se trabajará especialmente en la mejora de la comunicación a nivel local.

6.8 Plan de cierre

El plan de cierre debe contener todos los procedimientos necesarios para la clausura de la instalación detallando la gestión de todo el material acumulado si es el caso.

- El plan de cierre determinará en primer caso, los volúmenes a partir de los cuales la instalación deja de ser viable.
- Detallará todos los procesos a llevar a cabo para que en la zona no exista impacto sobre el ambiente ni actividades humanas existentes (agricultura, turismo, etc.).
- Procedimientos para el sellado de los pozos (como referencia, ver ASTM D5299).
- Preparación para la cancelación temporal de los pozos (no hace falta darlos de baja definitivamente).
- Desarrollar un Plan de Alerta Temprana (PAT) y un plan de acciones asociadas al PAT. Para elaborar el PAT se recomienda seguir la "Guía Metodológica de elaboración y gestión de Planes de Alerta Temprana (PAT), apéndice A" (HIDROMAS, 2014).

En caso que el proyecto sea denegado se deberá asegurar en todo caso que exista un plan de cierre del proyecto.

6.9 Fase piloto

El objetivo general de esta fase es validar el funcionamiento y asegurar que no se producen impactos (sección 5.5 de este informe). Más concretamente, esta fase de marcha blanca deberá servir para:

- Evaluar la factibilidad de la recarga artificial.
- Recopilar más datos de funcionamiento.
- Constatar que no se producen impactos sobre la cantidad ni calidad del recurso.
- Verificar que no hay impactos a terceras ni a potenciales ecosistemas asociados.
- Evaluar el modelo conceptual y numérico elaborado y ajustarlo pertinentemente, si es el caso.

6.10 Evaluación económica

Esta consiste en evaluar el coste de la instalación en función de las infraestructuras requeridas y el coste de mantenimiento presentado por el solicitante. De esta manera, si bien la construcción de pozos de inyección es más simple y económica que la construcción de balsas de infiltración debido a que, entre otros, requieren menor espacio, los primeros necesitan mayores y más constantes medidas de mantenimiento. La mayoría de problemas se relacionarán, a priori, con los efectos de la colmatación.

Se sugiere evaluar los antecedentes mínimos proporcionados por el solicitante:

- Análisis del ciclo de vida.
- Cálculo de los costes de construcción, operación, mantenimiento y cierre.
- Plan de financiamiento

6.11 Aprobación del proyecto u obra de recarga

Ver normas contenidas en el procedimiento general de tramitación de este mismo informe (*apartado 5.3.11 Décima Etapa: Etapa Resolutiva*).

Además de las normas del procedimiento general aplicables, existen normas propias contenidas en el artículo 49 del Reglamento Nº 203, de 2013, la que **exige que la DGA apruebe las obras de infiltración cuando se cumplan los siguientes requisitos:**

- Cumplimiento de la normativa específica aplicable.
- Cumplimiento de las normas comunes de procedimiento, contenidas en el procedimiento general.
- Que la obra no provoque la colmatación del acuífero.¹⁷
- Que la obra no provoque la contaminación de las aguas.¹⁸

¹⁷ En el apartado 3.5.4.1 *Proceso de colmatación* se ofrecen indicaciones técnicas que pueden orientar al evaluador para establecer que la obra de recarga no provoque la colmatación del acuífero.

¹⁸ En el apartado 3.5.3 *Consideraciones ambientales: posibles contaminaciones eventuales y detección de impactos* se presentan indicaciones específicas a tener en cuenta al momento de evaluar la contaminación o impactos de la recarga. Además, en el apartado 6.7 *Plan de gestión de una eventual contaminación* se presentan los procedimientos mínimos que debe incluir un plan de gestión de la contaminación.

En este tipo de solicitudes, corresponde al Director General de Aguas la aprobación de la ejecución de la obra de recarga artificial, **mediante resolución exenta**¹⁹. Posteriormente, mediante otra resolución exenta se recepcionará la obra construida y se autorizará su operación.

Se recomienda que el proyecto se pueda aprobar por fase dependiendo del tipo y tamaño del proyecto.

No obstante, la etapa de resolución de una solicitud puede considerar las siguientes alternativas, según sea el tipo de solicitud (*ver normas de tramitación general en el apartado 5.3.11 Décima Etapa: Etapa Resolutiva*):

- Resolución de constitución con Toma de Razón.
- Resolución denegatoria Exenta de Toma de Razón.
- Resolución de aprobación o rechazo Exenta de Toma de Razón.
- Resolución que acoge desistimiento Exenta de Toma de Razón.
- Oficio con proposición al Juez de Letras correspondiente.

6.12 Aprobación del derecho de aprovechamiento de carácter provisional con carga a la recarga

Ver normas de tramitación general en el *apartado 5.3.11 Décima Etapa: Etapa Resolutiva* de este mismo informe:

Además de las normas del procedimiento general aplicables, existen normas propias contenidas en el artículo 50 del Reglamento N° 203, de 2013, que **exige que la DGA constituya el derecho provisional con carga a la recarga, cuando se cumplan los siguientes requisitos:**

- Cumplimiento de la normativa específica.
- Cumplimiento de las normas comunes de procedimiento.
- El solicitante tenga una obra de recarga aprobada y operando. Se recomienda que exista un proyecto piloto con una línea base mínimo de un año de datos de niveles y caracterización de la calidad de agua (recarga y acuífero).

¹⁹ En el Apéndice E se presenta una propuesta de "Modelos tipos procedimientos administrativos para la obra de recarga artificial".

- Balance hídrico que permita definir el volumen adicional generado en el sector a causa de la infiltración.
- Que el ejercicio de este derecho no provoque perjuicios a otros derechos de aguas existentes.

En este tipo de solicitudes, corresponde al Director Regional de Aguas la constitución del derecho provisional.

6.13 Plan de seguimiento y fiscalización de los proyectos por parte de la DGA

Adicionalmente, se abordan los aspectos de seguimiento y fiscalización de los proyectos por parte de la DGA, asociados principalmente a monitoreo de calidad, cantidad y comportamiento de las aguas recargadas en el acuífero.

El usuario deberá disponer de la cantidad y ubicación de los puntos de control que permitan facilitar la fiscalización del proyecto. Esta cantidad de puntos dependerá tanto de las dimensiones del dispositivo de recarga como de su tipología.

Se recomienda realizar una inspección del proyecto cada 3 meses.

Además, se recomienda que el fiscalizador en cada inspección elabore una Minuta Técnica de Cumplimiento²⁰ de seguimiento y fiscalización donde deberá evaluar que el agua que el Titular utiliza para la recarga no supere el 10% de los valores máximos establecidos en la línea base o condición natural del acuífero, lo cual se estudiará caso a caso.

Por otro lado, el Informe Técnico de seguimiento del PAT se deberá evaluar conforme al cumplimiento de los contenidos mínimos mostrados en la Tabla 6-2.

Finalmente, los posibles tipos de análisis que se pueden realizar en el sistema de recarga se especifican en la Tabla 6-3.

²⁰ Para obtener un mayor detalle de cómo elaborar una Minuta Técnica de Cumplimiento consulte el apartado 2.2 Fase II: Seguimiento y Fiscalización del PAT del Apéndice A de la Guía Metodológica de elaboración y gestión de Planes de Alerta Temprana, PAT (HIDROMAS, 2014).

Tabla 6-2 Índice de contenidos mínimos del informe de seguimiento del PAT.

APARTADO	CONTENIDO	DETALLES
RESUMEN	Indicar las principales conclusiones respecto el funcionamiento previsto del sistema	Indicar la fecha del informe y el periodo en el que se dispone de datos
	Resumen de las variables seleccionadas para el PAT	Señalar todas las anomalías que puedan apreciarse.
	Resumen de las extracciones (si es el caso)	Indicar el volumen acumulado
	Dar cuenta de todas las observaciones, incidencias o situaciones presentadas durante el periodo de monitoreo.	Incluir todos los puntos que se hayan cancelado y/ añadido, si hay imposibilidad de mediciones, si presentan valores "anómalos", etc.
ANTECEDENTES GENERALES	Justificar los objetivos del informe (solicitud, fase de prebombeo, fase piloto, fase industrial de bombeo, etc.)	Indicar fecha prevista de fin de fase
	Indicar los datos de la RCA si es el caso (número, año y nombre de proyecto)	Ídem en caso que la RCA se adquiriera durante la fase del monitoreo.
	Descripción del área de estudio	Cartografías de los límites de la zona y de la ubicación de la red.
	El alcance del informe	Incluir la estructura del mismo.
SITUACIÓN DE COMPROMISOS	Situación de los compromisos del PAT por variable	Señalar el monitoreo efectivo que se realiza e indicar qué no se ha podido realizar y el motivo.
	Señalar el periodo de información	Siempre debe ser acumulado
	Componentes monitoreadas y frecuencia de muestreo	Resumen adicional de las variables de estado.
	Datos de las variables y de los puntos de muestreo	Presentarlo en formato de tablas.
	Indicar los valores intermedio y umbrales para cada punto	Calcular a partir de los valores de la línea base
ANÁLISIS POR VARIABLE	Para cada variable se debe introducir una tabla con los puntos monitoreados	Indicar coordenadas UTM WGS84 de cada punto y el periodo de información (acumulativo)
	Digitalización de los datos y tratamiento de los mismos. La Tabla 6-3 indica posibles tipos de análisis a aplicar a estos datos. El alcance dependerá del PAT en cuestión.	Usar tablas o documentos Excel (entregar este último a la DGA)
ANÁLISIS INTEGRADO DEL SISTEMA	Análisis integrado del sistema para cada variable, sector y en conjunto.	Para cada variable del PAT y según detalles del Análisis por variable (Tabla 6-3)

APARTADO	CONTENIDO	DETALLES
	Incorporar en este análisis las exigencias del PAT.	Comparar la evolución temporal de las variables considerando los niveles intermedio y umbrales como referencia (presentados en el capítulo de Situación de Compromisos).
ANÁLISIS DE LA BONDAD DE AJUSTE DE LAS SIMULACIONES	Superponer las predicciones del modelo sobre el Análisis Integrado del Sistema.	Evaluar la diferencia entre los resultados de los modelos y lo registrado. Identificar causas de potenciales diferencias.
	Evaluar la necesidad de realizar una actualización avanzada del PAT.	Identificar los % de diferencia entre medido y previsto por punto y sector.
	La bondad de ajuste se evaluará con la diferencia entre los niveles simulados y medidos expresados como porcentaje del nivel observado en esa fecha. Si es < 5% se considera buen ajuste.	Aplicar el mismo cálculo de % para puntos y para grupo de puntos o sectores del acuífero.
CONCLUSIONES	Indicar la respuesta del sistema a la operación de recarga evaluando la efectividad de la misma.	
	Emitir conclusiones respecto la bondad de las simulaciones, la representatividad del modelo numérico y potenciales diferencias en ajustes por sectores.	
	Evaluar la necesidad de realizar una actualización avanzada del PAT	
ANEXOS	Incluir en Anexos toda la información complementaria que se considere necesaria.	
	Toda la información numérica debe estar en formato Excel y en tablas en anexos.	
	En caso de realizarse estudios específicos, incorporarse en anexos.	
	Todos los mapas y figuras gráficas de mayor extensión.	
	Fotografías de los puntos, estaciones, vegas, ojos de agua, etc.	

Tabla 6-3 Posibles tipos de análisis del sistema (por punto y sector en función de si se han definido sectores).

TIPO DE ANÁLISIS	PARA CADA POZO / PUNTO DE MONITOREO / ESTACIÓN DE MEDICIÓN	PARA CADA SECTOR (grupo de pozos o grupo de estaciones de medición)	
En relación a niveles y/o descensos	Análisis de los niveles (o descensos) registrados en cada punto en contraste con los simulados (todos puntos en la red de monitoreo). Gráficos por pozo manteniendo en todos la misma escala. Indicar también inicio/fin.	Análisis de los niveles (o descensos) registrados en contraste con los simulados. Realizar gráficos ilustrativos (todos con la misma escala de representación).	
	Analizar el rendimiento de los pozos y posibles variaciones temporales.		
	Gráficos y representación de los datos:		
	Si se opta por realizar gráficos de descensos, realizar análisis a lo largo de la dirección principal de flujo indicando el nivel de referencia. Deben permitir identificar la evolución de conos de depresión y de recarga y por lo tanto se realizarán para diferentes fechas.		
	Todos los gráficos deben ser del tipo "dispersión"		
	Los gráficos deben permitir facilitar el análisis integral del sistema de manera que se realizarán por los diferentes sectores e incluirán potenciales irregularidades, las zonas más vulnerables y diferentes acuíferos si es el caso.		
	Evaluar con los datos de niveles, la efectividad de la operación de recarga en términos cualitativos		
Se incluirán las condiciones establecidas en el documento PAT respecto niveles intermedios y umbrales, si es el caso.			
En relación a calidad de las aguas	Análisis de todos los parámetros físico-químicos de cada punto según variables de estado del PAT y plan de monitoreo definido.	Análisis de todos los parámetros físico-químicos de cada sector o grupos de puntos según variables de estado del PAT y plan de monitoreo definido.	
	Realizar un gráfico para cada punto con los datos físico-químicos (stiff, piper, relaciones iónicas, schoeller, etc.). Representar juntos los diferentes valores individuales manteniendo la misma escala vertical y temporal en todos. Realizar gráficos por campaña (todos los puntos) y por punto (todos los datos de diferentes fechas).	Realizar un gráfico para cada sector y campaña con los datos físico-químicos (stiff, piper, relaciones iónicas, schoeller, etc.) manteniendo la misma escala vertical y temporal en todos. En caso de gráficos sobre mapas (stiff) incluir variables con simbología que muestren la magnitud para cada fecha.	
	Análisis por grupos de elementos físico-químicos relacionados: <ul style="list-style-type: none"> - Indicadores redox - Indicadores intrusión salina - Indicadores interacción con la roca - Contaminantes antrópicos 	Realizar diagramas de Stiff y realizar el análisis espaciales para los puntos de un mismo sector para cada campaña de monitoreo.	

	- Entre otros.	
	Diagrama de Stiff para cada fecha con información. Situar los diagramas individuales sobre un mapa.	Elaborar diagramas de Piper para los puntos de cada sector. Elaborar un diagrama de Piper incluyendo todos los puntos de una campaña y con simbología especial para identificar los diferentes sectores.
	Realizar gráficos de evolución temporal de un mismo punto.	
	Determinación del índice de Langelier, el que se presenta en forma tabulada, indicando fecha y punto.	
En relación al control de extracción	Realizar un análisis gráfico por pozo y/o por grupo de pozos de extracción (en caso sea pertinente) para comparar con derechos de extracción.	
En relación a caudales (aguas superficiales y transferencias entre masas de agua según balance hídrico)	Realizar un análisis por cada estación mediante gráficos.	Analizar el comportamiento espacial por grupo de estaciones (de manera longitudinal a lo largo de caudales superficiales en sentido aguas abajo).
	Analizar la evolución temporal en cada estación.	Analizar evoluciones temporales por grupo de estaciones
	Comparar los caudales registrados con los previstos según el modelo	
	Los gráficos deben tener todos la misma discretización y la misma escala temporal (coincidir inicio-fin)	
En relación a vegas, espejos de agua y balsas.	Realizar análisis de las alturas del nivel de agua, por punto y por campaña de medición.	Evaluar por sectores las alturas de los niveles de agua teniendo en cuenta variaciones temporales.
	Realizar fotografías de las distintas zonas mostrando evoluciones temporales.	

La DGA podrá solicitar visitas e inspecciones de la obra cuando lo requiera.

Todos los informes que se entregarán a la DGA, previamente a la puesta en marcha de la instalación, serán autónomos y no dependerán de informes anteriores.

La entrega se realizará mediante varios ejemplares impresos y sus versiones magnéticas. Se enviará copia a las unidades de la DGA (oficina de partes) que participan en la revisión de antecedentes, a la Plataforma de Superintendencia del Medio Ambiente y a la Dirección Regional. La administración registrará todos los informes recibidos en el expediente PAT.

7. Aplicación y validación de las guías metodológicas

Se ha validado la metodología confeccionada en proyectos de recarga artificial reales, desarrollados en Chile. En particular, los proyectos que se han analizado han sido los de la Cuenca del Río Choapa, los de la Cuenca del Río Quilimarí y los Acuíferos del Valle del Río Aconcagua.

7.1 Resumen de la aplicación de la guía

La validación de la metodología a tres cuencas distintas (Choapa, Quilimarí y Aconcagua) ha puesto de manifiesto que en los tres se observan las mismas carencias²¹.

En ninguno de los casos estudiados se realiza un análisis de la necesidad del proyecto que incluya el cálculo de la demanda de agua, la estimación de los recursos disponibles y el balance entre ambos aspectos. Probablemente, es por el hecho que se trata de estudios piloto en zonas ya previamente definidas.

Los aspectos legales también han sido muy pobremente tratados y no se analiza la viabilidad legal del dispositivo.

El análisis de la factibilidad ambiental prácticamente no se analiza, en los tres casos, los potenciales impactos sobre el medio subterráneo, aguas superficiales y ecosistemas.

El desarrollo del modelo conceptual es incompleto también en los tres emplazamientos. No se realiza un análisis del balance hídrico (el cual permitiría identificar también los recursos disponibles que se solicitan en la primera fase) ni se estiman los tiempos de tránsito en el acuífero. Este parámetro es relevante para el establecimiento de las redes de control y para evaluar la atenuación de contaminantes.

La fase de evaluación y diseño no incluye la evaluación económica del sistema ni el análisis del ciclo de vida que sería recomendable realizar. Así mismo, en esta fase

²¹ En el anexo C se presenta el ejercicio en extenso de la aplicación de las guías metodológicas en las cuencas de Choapa, Quilimarí y Valle del Aconcagua.

tampoco se desarrollan planes de contingencia asociados tanto a eventuales contaminaciones o a planes de alerta temprana.

Las memorias analizadas no contemplan los planes de operación ni la evaluación de la efectividad de la recarga a realizar en la fase piloto. Hay que señalar, que se trata de experiencias piloto y esto puede conllevar que no se tengan en cuenta este tipo de aspectos más operacionales. En este mismo sentido, los modelos numéricos realizados no se han sometido a evaluación, validación y modificación con los datos de campo de la fase piloto. Estas tareas formarían parte del PAT el cual no se ha elaborado.

En conclusión, los tres estudios tienen en cuenta los aspectos hidrogeológicos clásicos y el desarrollo de modelos numéricos. Sin embargo, no consideran los aspectos de justificación de la necesidad, aspectos de carácter ambiental, evaluación de impactos y aspectos operacionales. Se trata de informes que no han sido adaptados con los resultados de la red de control.

7.2 Aplicación en la cuenca del río Choapa

En este estudio no se han encontrado los siguientes aspectos:

7.2.1 Fase previa o de preselección

7.2.1.1 Evaluación de la necesidad

- Estimación de la demanda.
- Cálculo de los recursos hídricos cercanos disponibles y su tipología y estacionalidad.
- Estimación de la vulnerabilidad del suelo según tipo de agua a recargar.
- Evaluación de la garantía de suministro.
- Estimación del balance oferta-demanda.

7.2.1.2 Evaluación legal del proyecto

- Estimación del balance oferta-demanda
- Propiedad del suelo
- Afecciones a terceros

- Vías de procedimientos administrativos.

7.2.1.3 Evaluación legal de la factibilidad ambiental

- Existencia de restricciones ambientales.
- Impactos sobre la calidad.
- Identificación de potenciales ecosistemas asociados.

7.2.1.4 Evaluación técnica inicial

Impacto cuantitativo.

7.2.2 Fase de viabilidad

7.2.2.1 Identificación de las características del medio

- Identificación de los parámetros restrictivos del acuífero.
- Estudio topográfico.
- Estimación de las tasas de inyección.
- Construcción de piezómetros.
- Tiempos de tránsito.
- Balance hídrico.
- Elaboración de modelo conceptual.
- Evaluación de la magnitud de la recarga artificial al acuífero.

7.2.2.2 Evaluación de impactos ambientales

Análisis de los impactos.

7.2.3 Fase de evaluación y diseño

7.2.3.1 Evaluación económica

Análisis del ciclo de vida.

7.2.3.2 Planes de contingencia

- Plan de gestión de una eventual contaminación.

- Análisis de la gobernanza.

7.2.3.3 Validación de los modelos, del funcionamiento y de los impactos

Falta en su totalidad:

- Validación modelo conceptual.
- Comprobación modelo numérico y ajustar con los nuevos datos.
- Puesta en marcha del plan de monitoreo y validación.
- Análisis de los impactos ambientales y a terceros.
- Evaluación de la efectividad de la recarga.
- Validación de la regla de operación.

7.2.4 Fase implementación (escala industrial)

No presentado.

7.2.4.1 Plan de operación y mantenimiento

- Regla de operación.
- Gestión del clogging según tipo de dispositivo.
- Mantenimiento preventivo.
- Diseño y seguimiento del Plan de monitoreo.
- Verificación de la efectividad de la recarga.
- Plan de Alerta Temprana (PAT).

7.2.4.2 Plan de comunicación

- Diseño de la estrategia de comunicación.
- Involucración de los agentes sociales en el diseño y planificación.

7.2.4.3 Plan de cierre

- No presentado.
- Aspectos legales.
- Definición de procedimientos.
- Costes económicos.
- Monitoreo posterior

7.3 Aplicación en la cuenca del río Quilimarí

En este caso se ha procedido como en el anterior. A continuación se indican los aspectos faltantes del proyecto.

7.3.1 Fase previa o de preselección

- Estimación de la demanda.
- Cálculo de los recursos hídricos cercanos disponibles y su tipología y estacionalidad.
- Estimación de la vulnerabilidad del suelo según tipo de agua a recargar.
- Evaluación de la garantía de suministro.
- Estimación del balance oferta-demanda.

7.3.1.1 Evaluación legal del proyecto

- Estimación del balance oferta-demanda.
- Propiedad del suelo.
- Afecciones a terceros.
- Vías de procedimientos administrativos.

7.3.1.2 Evaluación legal de la factibilidad ambiental

- Existencia de restricciones ambientales.
- Impactos sobre la calidad.
- Identificación de potenciales ecosistemas asociados.

7.3.1.3 Evaluación técnica inicial

Impacto cuantitativo.

7.3.2 Fase de viabilidad

7.3.2.1 Identificación de las características del medio

- Identificación de los parámetros restrictivos del acuífero.
- Estudio topográfico.

- Caracterización hidrológica.
- Estimación de las tasas de inyección.
- Construcción de piezómetros.
- Tiempos de tránsito.
- Balance hídrico.
- Evaluación de la magnitud de la recarga artificial al acuífero.

7.3.2.2 Evaluación de impactos ambientales

Análisis de los impactos.

7.3.3 Fase de evaluación y diseño

4.2.4 Dimensionamiento de la instalación según parámetros de campo

7.3.3.1 Evaluación económica

- Análisis del ciclo de vida.
- Cálculo de los costes de construcción, operación, mantenimiento y cierre.

7.3.3.2 Planes de contingencia

- Plan de gestión de una eventual contaminación.
- Análisis de la gobernanza.

7.3.4 Proyecto Piloto

No presentado en su totalidad.

7.3.5 Fase implementación (escala industrial)

No presentado en su totalidad.

7.4 Aplicación en el valle del río Aconcagua

Este es uno de los caso más completos, por lo cual se presenta un *check list* de aquellos aspectos que contiene el proyecto piloto del Aconcagua en función de lo establecido en la Guía metodológica.

7.4.1 Requisitos de la solicitud

La solicitud presenta todos los datos referentes a:

- Nombre y datos del solicitante y del operador.
- Ubicación, mapas y coordenadas.
- Objetivos del proyecto.
- Se dan todos los datos de volúmenes de inyección y dimensiones de la planta a escala piloto, pero no se informa de los volúmenes e infraestructuras de una operación a escala industrial.
- Se calcula que la disponibilidad de recursos es suficiente para la escala piloto. Sin embargo, no se dan datos de la viabilidad según recursos disponibles de una potencial futura escala industrial de operación.
- No se estima la vida útil del proyecto. Sólo se indica que la fase piloto funcionará 6 meses. Se indican fechas de inicio.
- No se dan detalles económicos ni sobre el coste de la obra ni sobre las fuentes de financiamiento.
- Se indican las fechas de la construcción de las infraestructuras.
- No se da información sobre el número de Resolución, código de expediente o título que justifique y/o asegure el uso por a lo menos varios años de derecho de aprovechamiento de agua.
- Se trata de una zona fluvial por lo que, al no indicarse la condición de propiedad del predio se supone zona pública hidráulica.

7.4.2 Evaluación Legal

7.4.2.1 Derecho de aprovechamiento

El proyecto cuenta con derechos de aprovechamiento permanentes no utilizados en los meses de invierno y derechos de aprovechamiento eventuales disponibles en años

húmedos. Además, se cuenta con el uso de derechos de aprovechamiento superficial de los regantes que no utilizan durante el invierno (excedentes de derechos agrícolas). La DOH está tramitando en la DGA el otorgamiento de derechos de aprovechamiento subterráneo en pozos.

7.4.2.2 Propiedad del suelo

La obra se ubica en zona fluvial. Se desconoce si se dispone de la autorización del organismo encargado de su administración, a través de la emisión del respectivo acto autorizatorio.

7.4.2.3 Afecciones a terceros

Se desconoce la existencia de posibles afecciones a terceros.

7.4.3 Evaluación ambiental

7.4.3.1 Existencia de restricciones ambientales

La zona del proyecto se desarrolla en una de las cuencas que han sido declaradas áreas de restricción por la DGA.

No se conocen restricciones ambientales de protección medioambiental o de los acuíferos que pudieran generar incompatibilidad con el proyecto de recarga artificial.

7.4.3.2 Impactos sobre calidad del agua

Para la evaluación de los impactos es necesario disponer de una línea de base ambiental.

En este caso no se dispone de una buena caracterización de la calidad del agua previa a la puesta en marcha del dispositivo de recarga por diferentes motivos:

- Las analíticas corresponden a contenidos totales y no disueltos de los diferentes elementos y compuestos.
- Para el agua superficial de la zona se dispone de datos de la DGA de más de un año, pero no se presentan las variaciones anuales de los mismos.
- Respecto el agua subterránea, se dispone de datos mensuales de tan sólo 4 meses (de febrero a mayo del 2012).

La línea base de niveles se ha estudiado a partir de distintas informaciones:

- Estudio del DICTUC (2009) con datos del 1990-1991 para algunas zonas y del 1965-2009 para otras.
- Para la implementación del proyecto, los niveles se midieron de manera continua de setiembre a diciembre del 2013. El mes de junio se volvieron a recoger datos, pero no de todos los puntos ya que los P1 y P4 estaban obstruidos.

En conclusión, la información disponible no es suficiente para el establecimiento de la línea base por diferentes motivos:

- Las analíticas no son las adecuadas. Hay que tener en cuenta que, por ejemplo, los metales totales podrían incluir metales procedentes de la entubación de los pozos.
- No se dispone de variaciones anuales en la calidad del agua. Sólo se han recogido datos 4 meses antes de la operación de recarga.
- Los datos de niveles no son actualizados y tampoco se dispone de la variación a lo largo de un año.
- No se ha evaluado si los datos de nivel del último periodo podrían corresponder una época climatológicamente anómala y por lo tanto se desconoce su representividad.
- Durante la fase de diseño del proyecto se evaluarán los posibles impactos ambientales en función de las características del medio y del agua.

El potencial impacto no ha sido evaluado, si bien se observan contenidos destacables de elementos susceptibles de aumento ante cambios en las condiciones redox como el As. Sólo se dispone de analíticas de una campaña desde la puesta en marcha de la instalación, la cual es insuficiente para emitir conclusiones respecto al impacto.

Los datos de nivel en los puntos de observación muestran un aumento de los niveles si bien ligeramente inferiores a los esperados según el modelo.

No se considera necesario aplicar ningún tipo de tratamiento al agua, a priori, puesto que se trata del mismo tipo de aguas que se recargan de manera natural al mismo acuífero.

7.4.3.3 Identificación de potenciales ecosistemas asociados

No se han identificado potenciales ecosistemas que podrían verse afectados.

7.4.4 Evaluación técnica

7.4.4.1 Descripción del proyecto de recarga artificial

7.4.4.1.1 Tipo de dispositivo y disposición de obras

- El tipo de dispositivo y características se considera adecuado para las características hidrogeológicas de la zona. No obstante, podría cuestionarse el papel del decantador puesto que la tendencia actual es la de construir balsas que operen intermitentemente sin decantación previa. Se diseñan ciclos de secado-llenado de las balsas alternativamente. Durante el secado se forman fracturas de desecación que permiten la infiltración si bien también hay que realizar tareas de mantenimiento y mezcla de finos.

El emplazamiento cuenta con las características adecuadas para poder implementar un sistema de balsas de infiltración:

- ✓ Usos del suelo. Se trata de la zona fluvial y por lo tanto no hay incompatibilidades con otros usos del suelo.
- ✓ Infiltración. Se estima una tasa media de 6,2 m/d la cual es superior al valor mínimo de 25 cm/d y superior al valor recomendado de 1 m/d.
- ✓ Contaminación de aguas subterráneas. Las analíticas presentadas no indican contaminación en esta zona que pueda limitar la operación de recarga artificial.
- ✓ Tiempo de residencia o de tránsito. Éste parámetro es poco relevante en este caso, ya que la calidad del agua de recarga es similar a la del acuífero y no contiene contaminantes. Se estima del orden de pocos días en base al modelo numérico (entre 1,5 y 3 días de media).
- ✓ No se ha estimado la eficiencia de recuperación, aunque en este caso no se considera relevante puesto que el objetivo no es extraer las aguas en otro pozo sino aumentar la disponibilidad de recursos hídricos en la zona.
- ✓ Profundidad de la zona no saturada. La zona no saturada tiene una profundidad media de 50 m. Es una profundidad adecuada para los objetivos del proyecto. Se

estiman aumentos de nivel de 10 m los cuales no supondrían potenciales impactos sobre infraestructuras o ecosistemas superficiales. El volumen de almacenamiento es suficiente para los objetivos de recarga.

- ✓ Potencia acuífero. El acuífero tiene una potencia media de 2 metros la cual se considera adecuada.
- ✓ Potencia de los niveles impermeables debajo la superficie no se han identificado niveles no permeables debajo de las balsas de recarga.
- ✓ No se ha estimado la vulnerabilidad del suelo o del acuífero.

7.4.4.1.2 Modelación hidrogeológica para estimar el efecto de la recarga

Se ha realizado una modelación hidrogeológica para diferentes escenarios de gestión. A continuación se realizan diferentes comentarios al modelo:

- El modelo sólo ha representado aspectos cuantitativos, no cualitativos. Como consecuencia, no se han evaluado posibles impactos sobre la calidad del agua del acuífero.
- Los diferentes escenarios han puesto de manifiesto diferentes domos de recarga de dimensiones variables. Ninguno de los domos simulados refleja potenciales impactos cuantitativos sobre el acuífero. Se esperan ascensos máximos temporales del nivel de agua de 10 metros.
- Los datos reportados con el modelo son inferiores a los solicitados en la *"Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA, 2012"*, aunque los procedimientos son adecuados.
- En los escenarios simulados no se ha tenido en cuenta las posibles variaciones ambientales por ejemplo en la recarga (épocas de sequía). Solamente se han variado las dimensiones de las balsas y los caudales.
- No se presentan los datos del análisis de sensibilidad y calibración del modelo presentado.
- El modelo no se ha actualizado aún con los datos de la fase piloto para verificar las simulaciones realizadas.
- No se analiza la viabilidad del sistema a largo plazo ni las variaciones por colmatación.

Los estudios de campo previos al modelo son correctos:

- Análisis del suelo.
- Granulometría.
- Tests de infiltración.
- Ensayos de bombeo.
- Geofísica.
- Topografía.
- Tests de bombeo, entre otros.

7.4.4.2 Descripción de las características geológicas e hidrogeológicas del sector de la recarga

- No se ha establecido la línea base ambiental y los datos disponibles no son ni suficientes ni adecuados para estimarla.
- Los estudios topográficos y geofísicos son adecuados.
- Se han construido pozos y se han realizado tests de campo de manera correcta.
- No se realiza una evaluación de los potenciales impactos sobre la calidad. Los impactos se analizan a partir del modelo y éste sólo contempla datos de nivel.

7.4.5 Plan de operación y mantenimiento

Dado que el objetivo del proyecto es implementar la fase piloto que funcionará durante 6 meses, se dan pocos detalles respecto la operación y mantenimiento del sistema:

- Se describen los materiales e infraestructuras existentes.
- No se indican los recursos humanos, técnicos y operacionales para la operación del sistema.
- La gestión de la colmatación según el funcionamiento operativo de las balsas se describe de manera muy sintética y no se aborda de manera cuantitativa. Se realizan sólo previsiones de limpieza de las balsas.
- El plan de monitoreo es correcto a escala piloto.
- No se elabora el Plan de Alerta Temprana ni el Plan de gestión de una eventual contaminación.
- No se realiza un estudio de costos.

7.4.6 Contenidos de la memoria técnica

La memoria técnica presentada finaliza a escala de planta piloto. No se han facilitado detalles sobre las características de la planta en la fase industrial.

Los apartados que no se han incluido en la memoria son:

- Cálculo de la demanda.
- El modelo conceptual es incompleto. Faltan las estimaciones de balance hídrico y el cálculo de la recarga al sistema.
- Análisis económico: costos de construcción, costos operativos y de mantenimiento.
- Fuentes de financiamiento.
- Identificación de posibles impactos por aumentos de nivel.
- Análisis de impacto ambiental.
- Plan de gestión de una eventual contaminación.
- Plan de Alerta Temprana.
- Modelización hidroquímica.
- Plan de operación y mantenimiento.
- Plan de cierre.
- Revisión del modelo.

8. Conclusiones

8.1 Conclusiones del análisis de antecedentes de recarga artificial

- Las experiencias de recarga artificial en el mundo avalan que es una tecnología segura y fiable que permite aumentar la disponibilidad de agua en zonas de demanda elevada. Se trata de una tecnología con más de un siglo de historia durante el cual se ha ido perfeccionando la técnica.
- En los últimos años, la recarga artificial ha demostrado ser una alternativa de gran efectividad con respecto a grandes obras hidráulicas, resultando una actividad de primer orden en varios países del mundo como EEUU, Holanda, Alemania, Australia e Israel.
- Prácticamente en todos los países se aplica algún tipo de recarga artificial con diferentes grados de complejidad abarcando desde pequeñas presas en ríos (en África por ejemplo) a campos con centenares pozos de inyección (EEUU). Actualmente hay países y grandes ciudades que dependen en más del 50% de los recursos que les proporciona la recarga artificial: Suecia, Berlín (Alemania), La Haya (Holanda), Amsterdam (Holanda), Ginebra (Suiza), Los Ángeles (California), Scottsdale (Arizona) y Queensland (Australia). Otros proyectos importantes son de la cuenca de Omdel en Namibia, calvinia en Sudáfrica, Shadfan (Israel), Rokugo (Japón), Kaftari (Irán), valle del Llobregat en Barcelona, (España), lee Valley (reino Unido), Long Island (Nueva York), Kerville (Tejas), Granite Reef (Arizona), Ciudad de México (México), Adeliada (Australia) y otros.
- Los dispositivos de recarga más ampliamente utilizados son las balsas y canales de infiltración. En África son muy comunes las infraestructuras en ríos para facilitar su recarga durante crecidas. En Australia y países áridos se aprovechan notablemente las aguas de crecida a través de diferentes tipos de instalaciones, balsas, canales y pozos. En el norte de Europa, donde los ríos son caudalosas, utilizan la infiltración a través del lecho filtrante del río (o de dunas) para abastecimiento municipal. Actualmente también, gran parte de la recarga se realiza con aguas regeneradas

procedentes de plantas de tratamiento. En estos casos se utilizan técnicas de infiltración o transporte en el acuífero para aprovechar el potencial de tratamiento que ofrece el suelo. El uso de este tipo de agua si bien es el que más está creciendo actualmente aún tiene que superar barreras legislativas en algunos de los países. En este sentido, en la mayor parte de países la legislación es la principal barrera en la implementación de esta tecnología, ya que cada país cuenta con una normativa propia que difícilmente cubre todos los aspectos necesarios.

- En Chile, la recarga artificial de acuíferos data de los años 70 con el desarrollo de una teoría o metodología aplicada en la cuenca del río Maipo. Dicha teoría permitió evaluar las variaciones de nivel en el acuífero producidas después de iniciada la recarga. Sin embargo, es a partir del año 2000 cuando se llevan a cabo algunos proyectos y experiencias piloto tanto en recarga de aguas superficiales como aguas servidas tratadas. Las iniciativas han sido impulsadas por los sectores públicos (CNR, DGA y DOH) y algunas entidades privadas (SQM, CMDIC, CMLB y Andes Iron).
- Los trabajos de recarga artificial en Chile han sido focalizados en aquellas cuencas que han sido declaradas áreas de restricción por la DGA. En este contexto, se puede mencionar el desarrollo de proyectos pilotos en: acuíferos de la Ligua y Petorca, Cuencas del río Choapa y Quilimarí, Valle del Aconcagua y la cuenca del Río San José.
- Los principales tipos de proyectos o iniciativas de recarga artificial de acuíferos desarrollados en Chile y que han sido mejores valorados son: las lagunas de infiltración y los pozos de inyección. A nivel de estudios exploratorios y prefactibilidad se ha evaluado la aplicación de otras técnicas tales como: zanjas de infiltración, escarificación de cauces y métodos de aforo.
- Respecto a los criterios de selección de cuencas potenciales de recarga de acuíferos, en Chile los parámetros más considerados han sido la profundidad del nivel freático, la permeabilidad/conductividad hidráulica y el área del acuífero. En un estudio desarrollado por la Comisión Nacional de Riego y GCF Ingenieros en 2013 han aplicado estos criterios, permitiendo el cálculo de un Índice de Recarga

Compuesto (IR) para conocer cuáles son las cuencas o subcuencas con mayor potencial para proyectos de recarga artificial en Chile.

- Hoy en día, en Chile se están desarrollando proyectos de recarga artificial cuyos resultados son muy satisfactorios. A pesar de que el marco normativo es muy disperso en el tema de recarga artificial, se han venido haciendo esfuerzos y avances significativos en materia de regularización de los proyectos de recarga artificial.
- El análisis de los antecedentes ha permitido tener las bases y avanzar hacia el desarrollo de la guía metodológica para la presentación, evaluación y análisis de proyectos de recarga artificial de acuíferos en Chile.

8.2 Conclusiones de las guías metodológicas de presentación y evaluación de proyectos de recarga

- En base al análisis de antecedentes, reuniones y talleres de trabajo con las diferentes unidades de la DGA (DARH, DEP, Conservación, Fiscalización y División Legal), se ha elaborado una propuesta de Guía metodológica para la presentación y evaluación de proyectos de recarga artificial, a saber:
 - Una Guía metodológica para presentar proyectos de recarga, donde se han recomendado las pautas que debe seguir cualquier usuario para elaborar y solicitar la autorización de ejecución de un proyecto de recarga artificial en Chile y su posterior solicitud de derecho. Esto incluye, la elaboración de un Formulario tipo para solicitud de derechos de aprovechamientos de agua con cargo a la recarga.
 - Una Guía metodológica para analizar y evaluar proyectos de recarga, que pretende ser una herramienta para facilitar el proceso de evaluación de proyectos de recarga artificial por parte de la Dirección General de Aguas (DGA).
- En Chile la experiencia piloto de recarga artificial es muy reciente y no existe un proyecto completamente finalizado ni mucho menos registrado en la DGA. En relación a esto, las guías metodológicas pretenden promover la ejecución de proyectos de recarga para llevarlos a cabo de una manera lo más idónea posible.

8.3 Conclusiones de la aplicación y validación de las guías metodológicas

- La validación de la metodología a tres cuencas distintas (Choapa, Quilimarí y Aconcagua) ha puesto de manifiesto que en los tres estudios se observan las mismas carencias que giran en torno a: la factibilidad ambiental, los potenciales impactos sobre el medio receptor, el modelo conceptual y numérico, los planes de contingencia ante eventuales contaminaciones, la regla de operación, efectividad de la recarga, el análisis de impacto, entre otros factores.
- Los estudios analizados no contemplan los planes de operación ni la evaluación de la efectividad de la recarga a realizar en la fase piloto. Hay que señalar que se trata de experiencias piloto y esto puede conllevar que no se tengan en cuenta este tipo de aspectos más operacionales. En este mismo sentido, los modelos numéricos realizados no se han sometido a evaluación, validación y modificación con los datos de campo de la fase piloto. Estas tareas formarían parte del PAT, el cual no se ha elaborado.
- Los tres estudios tienen en cuenta los aspectos hidrogeológicos clásicos y el desarrollo de modelos numéricos. Sin embargo, no consideran los aspectos de justificación de la necesidad, aspectos de carácter ambiental, evaluación de impactos y aspectos operacionales. Se trata de informes que no han sido adaptados con los resultados de la red de control.

9. Referencias

- American Water Works Association (AWWA) (2002). "Survey and analysis of aquifer storage and recovery (ASR) systems and associated regulatory programmes in the United States". AWWA, Estados Unidos.
- Anón. (1911). "Die wasserversorgung der stadt Bochum". GWF-Wasswer-Abwasser. Das Gas und Wasserfach 54 (15): 362-364 pp.
- Asano, T. (1985) Artificial Recharge to groundwater. Boston. Butterworth.
- Aureli, A. (1978). "Combined action of river training and recharging of aquifers using flood runoffs". Int. Congres. Irrigation & Drainage 1 (8): 211-215 pp.
- Aureli, A. (1980). "La rialimentazione di una falda idrica sovrasfruttata". Aria, Acqua e Suolo 3 (4).
- Banco Mundial & Gobierno de Chile. Estudio para el mejoramiento del marco institucional para la gestión del agua, 2013. 220 p.
- Baveye, P., Vandevivere, P., Hoyle, B.L., DeLeo, P. C., & de Lozada, D.S. (1998). Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 28(2), 123-191.
- Bekele, E., Toze, S. Hanna, J., Blair, P. & Turner, N. (2006). "Improvements in wastewater quality from soil and aquifer passage using infiltration galleries: case study in Western Australia". V International Symposium on Management of Aquifer Recharge. 663-668 pp. Berlín (Alemania).
- Biemond, M.C. (1960). "Les eaux d'Amsterdam". Techniques et Sciences Municipales 55 (8-9): 1-7 pp. París (Francia).
- Bize, J., Bourguet, L. & Lemoine, S. (1972). "L'alimentation artificielle des nappes souterraines". Massin & Cie. París (Francia). 199 pp.
- Blaszyk, T. & Pawwka, A. (1972). "Recherches sur l'amélioration des eaux souterraines en Pologne". Int. Water Supply Assoc, 11: 25-27 pp.

- Bojanich, E. (1969). "Recarga Artificial y mejoramiento de la capa freática utilizando aguas meteóricas". IV Congreso Nacional del Agua 1: 12 pp. Neuquen (Argentina).
- Bojanich, E. & Risiga, A. H. (1976). "Recarga Artificial de acuíferos en terrenos de baja permeabilidad". II Congreso Iberoamericano de Geología Económica. Buenos Aires (Argentina).
- Borst, L & Haas S.A (2006). Hydrology of Sand Storage Dams, A case study in the Kiindu catchment, Kitui District, Kenya. Vrije Universiteit, Amsterdam.
- Bourguet, L. (1971). "Inventaire international des aménagements d'alimentation artificielle: dépouillement et synthèse des réponses". Bull. Int. Assoc. Scientific Hydrology XVI (9): 51-102 pp.
- Bouwer, H. (1986). Water infiltration rate. Methods of Soil Analysis, Part, 1.
- Bouwer, H. (1988). The Bouwer and Rice Slug Test—An Update. Groundwater 27(3): 304-309.
- Bouwer, H. Ludke, J. & Rice R.C. (2001) "Sealing pond bottoms with muddy water". Ecological Engineering 18(2): 233-238.
- Bouwer, H., (2002) Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal. 10:121-142.
- Brown, R.F. & Signor, D.C. (1974). "Artificial recharge. State of the art". Ground Water 12 (3): 152-161 pp.
- Brown, E.F. (2002). Recarga Artificial de Acuíferos. Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica 17(1): 33-40.
- Cabrera G. (2014). Análisis desde Arica hasta el Maule: ¿Dónde hay condiciones para la recarga artificial de acuíferos en Chile? Revista AIDIS 47: 32-39.
- Casati, A. (1975). "Grundwasseranreicherung in der region Basel". Gas-Wasser-Abwasser 55 (12): 845-850 pp.
- Central Groundwater Board, CGB (2002). "Master plan for artificial recharge to groundwater in India". Ministry of Water Resources. New Delhi (India).

- Chadha, D.K. (2002). "Technological developments in artificial recharge of groundwater: case studies in India". Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Balkema Publishers, Australia.
- Charlesworth, P. B., Narayan, K.A. & Bristow, K.W. (2002). "The Burdekin Delta: Australia's oldest artificial recharge scheme". Management of aquifer recharge for sustainability. Sweets y Zeitlinger, Lisse (Australia).
- Chenini, I., Ben Mammou, A., & M. El May (2009). Groundwater Recharge Zone Mapping Using GIS-Based Multi-criteria Analysis: A Case Study in Central Tunisia (Maknassy Basin). Water Resour Manage.
- Comisión Nacional de Riego & GCF Ingenieros LTDA. (2013a). Estudio Diagnóstico de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos en las Regiones de Arica y Parinacota a la Región del Maule. Informe Final. Comisión Nacional de Riego (CNR), Ministerio de Agricultura.
- Comisión Nacional de Riego & Aqualogy Medioambiente Chile S.A. (2013b). Estudio básico "Análisis Alternativas Piloto Recarga Artificial Ligua - Petorca, V Región". Informe Final. Comisión Nacional de Riego (CNR), Ministerio de Agricultura.
- Comisión Nacional de Riego & GCF Ingenieros Ltda. (2013c). Mejoramiento de Agua Subterránea para Riego Ligua y Petorca. Resumen ejecutivo. Comisión Nacional de Riego (CNR), Ministerio de Agricultura.
- Comisión Nacional de Riego, Jorquera & Asociados S.A. (2012). Mejoramiento del Sistema de Aguas Subterráneas para su utilización en Riego en la cuenca del río Copiapó. Informe final. Comisión Nacional de Riego (CNR), Ministerio de Agricultura.
- Comisión Nacional de Riego-CNR & Departamento de Recursos Hídricos Universidad de Concepción (DRH-UDEC) (2010). Diagnóstico de Fuentes de Agua No Convencionales en el Regadío Inter-regional. Informe final. Tomo I. Comisión Nacional de Riego, Ministerio de Agricultura.
- Compañía Minera Doña Inés Collahuasi-CMDIC & GP Ingenieros (2003). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Optimización de Collahuasi. Anexo B. Parte IV. Medidas de Mitigación. CMDIC, Santiago.

- Compañía Minera Casale (CMC) y WHM (2011). Estudio de Impacto Ambiental Optimización Proyecto Minero Cerro Casale. Capítulo 7. Plan de Manejo Ambiental. CMC, Santiago.
- Compañía Minera Andes Iron SpA-CMAI & SRK Consulting (2013). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Dominga. En calificación. ANEXO DP-5. Sistema de Recarga Artificial Proyecto Dominga. Andes Iron SpA, Santiago.
- Compañía Minera Xstrata Lomas Bayas (CMXLB) & Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile (DIC-UCHILE) (2007). Evaluación técnico-económica de Recarga Artificial en la segunda Región. CMXLB, Chile.
- Compte, J.M., & Custodio, E. (1969). "Influence of impounding reservoirs on the quality and quantity of underground water". Int. Water Supply Assoc. 3: 1-18 pp. Londres (Reino Unido).
- Connorton, B.J. & McIntosh, P. (1994). "EUREAU survey on artificial recharge". Artificial recharge of groundwater. Proceedings of the Second Internacional Symposium on Artificial Recharge of Groundwater., New York (USA).
- Cortez, F.J. (2012). Recarga Artificial de Acuíferos Mediante Pozos de Infiltración. Memoria para optar al título de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Custodio, E. (1986). Recarga Artificial de acuíferos. Boletín de informaciones y estudios, 45.
- Custodio, E. & Llamas, M.R. (1983). "Hidrología subterránea". Omega. Barcelona (España). 2450 pp.
- Dassonville, G. (1979). "Distribution et gestion de l'eau souterraine: un étude par model de la gestion de l'eau souterraine de Moule (Pas de Calais)". Int. Symp. On Artificial Groundwater Recharge 1 (5): 299-318 pp. Berlín (Alemania).
- De La Orden, J.A., López-Geta, J.A. & Murillo, J.M. (2003). "Experiencias de Recarga Artificial de acuíferos realizadas por el IGME en acuíferos detríticos". Boletín Geológico y Minero 114 (2): 203-212 pp.

Decreto con Fuerza de Ley N°1.122. Código de Aguas. Santiago, Chile, 1981.
http://www.dga.cl/legislacionynormas/normas/Norma%20y%20reglamentos/codigo_de_aguas_actualizado_conreformas.pdf.

Decreto MOP N° 12 del 29 de Enero de 1992, que establece la organización y funciones de la Dirección General de Aguas. En este decreto se abordan las siguientes unidades de la DGA: Subdirección; Hidrología; Estudios y Planificación; Conservación y Protección de recursos Hídricos; Administración y Secretaría General; Administración de Recursos Hídricos; Legal y Direcciones Regionales.

Decreto N° 40, de 2013, del Ministerio del Medio Ambiente, aprueba reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental (publicado en Diario Oficial 12-02-2013).

Decreto Supremo N° 203, de 2013, del Ministerio de Obras Públicas, aprueba reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas (publicado en Diario Oficial 07/03/14).

Decreto Supremo N° 46, de 2002, que establece la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas (publicado en Diario Oficial 17-01-2003).

DEMEAU FP7 Project. Demonstration of Promising Technologies to Face Emerging Pollutants. WA1: Managed Aquifer Recharge Report. <http://demeau-fp7.eu/>

Department of Water Affairs (2009). Strategy and Guideline Development for National Groundwater Planning Requirements. A check-list for implementing successful artificial recharge projects. PRSA 000/00/11609/2 - Activity 12 (AR02), dated September 2009.

Department of Water Affairs (2010). Strategy and Guideline Development for National Groundwater Planning Requirements. Water Banking: A practical guide to using Artificial Groundwater Recharge, dated November 2010.

Dillon, P. (2009). "Water recycling via managed aquifer recharge in Australia". Boletín Geológico y Minero 120 (2): 121-130 pp. IGME. Madrid (España).

Dilyunas, I.P. (1976). "Experience in artificial groundwater recharge for water supply in Lithuania". Soviet Hydrology 15 (4): 340-343 pp.

Dirección de Obras Hidráulicas & Brown E.F. (2011). Estudio Recarga Artificial al Acuífero de la 1ª sección del valle del Aconcagua, con aguas reguladas desde Puntilla del Viento. Informe de avance del proyecto Rev. B. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección de Obras Hidráulicas & Brown E.F. (2012). Estudio de Recarga Artificial de Acuíferos en el Valle del Aconcagua Usando Derechos Eventuales del Fisco. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección de Obras Hidráulicas & GeoHidrología Consultores (2012a). Asesoría Técnica para Plan de Alerta Temprana Pozos DOH Aconcagua y para Análisis de Potencialidad de Recarga Artificial, Informe Final, Tomo II: Análisis de potencialidad de Recarga Artificial acuíferos primera y tercera sección valle del Aconcagua. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección de Obras Hidráulicas & GeoHidrología Consultores (2012b). Estudio e Implementación de un Plan Piloto de Recargas Artificiales a los Acuíferos del Valle del Aconcagua. En ejecución. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección General de Aguas (2004). Manual para la aplicación del concepto de Vulnerabilidad de Acuíferos establecido en la Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. Decreto Supremo N° 46 DE 2002. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección General de Aguas (2011). Guía para la presentación de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección General de Aguas & AC Ingenieros Consultores Ltda. (2012). Investigación Recarga Artificial Acuíferos Cuencas del Río Choapa y Quilimarí, Región de Coquimbo, SIT N° 292. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección General de Aguas (2013). Análisis y Síntesis Preliminar de Iniciativas sobre Recarga Artificial de Acuíferos en Chile. División de Estudios y Planificación SDT N°344. Ministerio de Obras Públicas.

Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, HIDROMAS CEF Ltda (2014). Diagnóstico y sistematización de información de planes de alerta temprana vigentes con condicionamiento de derechos. SIT N°336. Reglamento en redacción.

- Dirección Meteorológica de Chile. *Descripción climatológica*. [Consultado 26 de noviembre del 2011]. Disponible en: <http://www.meteochile.cl/climas/climas_región.html>. En Ávila K. (2012). "Análisis del Comportamiento de eventos extremos de precipitación en la zona Centro y Sur de Chile Continental". Trabajo de Investigación. Máster Oficial Agua. Análisis Interdisciplinario y Gestión Sostenible. Universitat de Barcelona.
- Dorn, F. (1974). "Geschichte und bedeutung der wassergewinnung-sanlagen in wiesbaden-schierstein". Wissenschaftliche Berichte der Eswe Stadwarke Wiesbaden 2, 7-16 pp.
- Duijvenbode, S.W. & Olsthoorn, T.N. (2002). "A pilot study of deep well recharge by Amsterdam water supply". Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Sweets and Zeitlinger, 35-40 pp.
- Eaton, L., Melady, J. & Tolan, T. (2009). "Successful implementation of ASR in basalt-hosted aquifers in the Pacific Northwest of the United States". Boletín Geológico y Minero 120 (2): 131-156 pp. IGME. Madrid (España).
- Edworthy, K. J. & Downing, R. A. (1979). Artificial recharge and its relevance in Britain. The Institution of Water Engineers and Scientists 33: 151-172 pp. Londres (Reino Unido).
- Ennabli, M. (1980). "Quantification des données hydrogéologiques et gestion intégrée des ressources en eau: cas des auifères du Nord-Est Tunicien". Bull. B.R.M.G. 3 (3): 235-247 pp. París (Francia).
- Enomoto, S. (2007). An introduction of the water works using artificial recharge methods: infiltration basin and its maintenance in Germany, Netherlands and Japan. J. Groundwater Tech. 49 (7): 9-21 pp.
- Eriksson, E., Baun, A., Scholes, L., Ledin, A., Ahlman, S., Revitt, M., Noutsopoulos, C. & Mikkelsen, P.S. (2007): Selected stormwater priority pollutants — a European perspective. The Science of The Total Environment 383: 41-51.
- Esfandiari-Baiat, M. & Rahbar, G. (2004). "Monitoring of inflow and outflow rate from Kaftari artificial recharge of groundwater system in Dorz-Sayban region in southeastern Iran".

- Falovsky, A.A. (1967). The present state of the study of the problems of groundwater enrichment in the Ukrainian S. S. R. *Artificial Recharge and Management of Aquifers*. Int. Assoc. Scientific Hydrology 72: 101-108 pp.
- Fernández-Escalante, E., Rubio, J.M., & Lendínez, A.A. (1995). "Algunas aportaciones al conocimiento hidrogeológico de los acuíferos de la provincia de Jaén mediante la aplicación del registro óptico de televisión y vídeo (rotv)".
- Fernández Escalante, A.E. & López, J. (2002). "Contribution to the hydrogeological knowledge of an artificial recharge area based on hydrochemical investigation. Los Arenales site, Duero basin, (Spain)." *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*, Dillon, P.J. (Ed) Proceedings of the 4th International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, Adelaide, South Australia 22-26 September 2002. Balkema Publishers-AIH. The Netherlands.
- Fernández- Escalante, A.E, García, M. & Villarroya, F. (2005). "Seguimiento y control de la restauración de humedales mediante técnicas de Recarga Artificial de acuíferos a partir del diseño de un sistema de indicadores medioambientales". *Revista Tecnología y Desarrollo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente*. Volumen III. Año 2005.
- Fernández Escalante, A.E. & García Rodríguez, M. (2006). *Gestión de la Recarga Artificial de acuíferos (MAR)*. Serie Hidrogeología Hoy. Grafinat.
- Fernández-Escalante, (2010). *La gestión de la recarga artificial de acuíferos en el marco del desarrollo sostenible*. Desarrollo tecnológico. Serie Hidrología Hoy. Título 6. DINA-MAR. 495 pp.
- Frank, W.H. (1979). "Historical development and present state of artificial groundwater recharge in the Federal Republic of Germany". *Int. Symp. on Artificial Groundwater Recharge* 1 (11): 11-41 pp.
- Fuentes J.L. (2013). *Proyecto de recarga artificial en el acuífero Colina*. Sociedad de Canal del Maipo (SCM). *Revista Vertiente*, Edición N°13.

- Galán, R., López, F., Martínez, J., Macías, C., Galán, G. & Fdez. Escalante, A.E. (2001). "Recarga Artificial del acuífero de los Arenales en la comarca de "El Carracillo" (Segovia). Soporte físico." VII Simposio de hidrogeología, AEH, Murcia.
- Gale, I.N., Williams, A.T., Gaus, I. & Jones, H.K. (2002). "ASR-UK: elucidating the hydrogeological issues associated with aquifer storage and recovery in the UK". BGS Report N° CR/02/156/N. British Geological Survey. Londres (Reino Unido).
- Gale, I.N. & Dillon, P.J. (2005). Strategies for manager aquifer recharge (MAR) in semi-arid areas. UNESCO. Paris (Francia).
- Galecio, J.E. (2007). Métodos de Aforo para la Estimación de la Recarga de Acuíferos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Galloway, D.L, Barlow., P.M., Reilly, T.E. & Tucci, P (2003). Evolving issues and practices in managing ground-water resources: case studies on the role of science. U.S. Geological Survey circular ; 1247.
- Gauss I., Cikurel H., Picot G., Aharoni A., Guttman, Azaroual M. & Kloppmann W. (2007). "Alternative SAT of secondary effluents using a combination of UF and short term SAT for increasing infiltration rates at the Shafdan site (Israel)". Paper submitted for the ISMAR6 conference, Phoenix 28/10/07-2/11/07.
- Ghayoumian, J., Mohseni Saravi M., Feiznia, S., Nouri, B. & Malekian A. (2007). Application of GIS techniques to determine áreas most suitable for artificial groundwater recharge in a coastal aquifer in southern Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 30 (2): 364-374.
- Gieseler, E.A. (1905). "A new form of filter gallery at Nancy, France". Engineering Record 51 (6): 148-1449 pp. Nueva York (USA).
- Godoy E., García, D & S. Fariña (1995). Recarga Artificial del acuífero freático en Filladelfia – Chaco central Paraguay. Disponible en: <http://www.ongagua.org.py/articulos/aguas%20subterranas.pdf> [Último acceso 31 de julio 2014].

- González-Báez, A. (1974). "Aprovechamiento de la capacidad almacenadora de los acuíferos: la Recarga Artificial". *Voluntad Hidráulica* 11 (29): 16-24 pp. La Habana (Cuba).
- Haimerl, G. (2004). *Groundwater Recharge in Wadi Channels Downstream of Dams: Efficiency and Management Strategies* (Doctoral dissertation, Technische Universität München, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft).
- Halek, V. (1970). "Artificial recharge in Czeckoslovakia". *Artificial Groundwater Recharge Conference. The Water Research Association* 2: 451-481 pp.
- Hazan, R. & Thauwin, J.P. (1968). Un exemple de recharge de nappe: le bassin du Charf-el-Akab (province de Tanger, Maroc). *Bull. B.R.G.M.* 1: 75-78 pp.
- Heilweil, V.M., Ortiz, G. & Susong, D.D. (2008). "Assessment of artificial recharge at Sand Hollow Reservoir, Washington County, Utah, updated to conditions through 2007". *Scientific Investigations Report 2008. USGS. Salt Lake City (USA)*.
- Heilweil, V.M., Solomon, D.K. & Ortiz, G. (2009). "Silt and gas accumulation beneath an artificial recharge spreading basin, Southwestern Utah, USA". *Boletín Geológico y Minero, Vol. 120. Instituto Geológico y Minero de España. ISSN 0399-0176. Madrid, 185-196 pp.*
- Hida, N. (2002). "Experience and forward-looking view of artificial recharge of groundwater". *J. Jap. Assoc. Hydrol. Sci.* 32: 63-70 pp.
- Hida, N. (2007). Experience of artificial recharge of groundwater in the Rokugo alluvial fan, Akita Precture. *J. Geography* 116: 23-30 pp.
- Hida, N. (2009). "Managed aquifer recharge by using spreading basin methods on alluvial fans: a general overview of the situation of Japan". *Boletín Geológico y Minero* 120 (2): 311-320 pp. Madrid (España).
- Hida, N. & Ohizumi, Y. (2005). "Basin artificial recharge of groundwater in the Rokugo alluvial fan, northern Japan". *Memoirs of Faculty of E.H.S. Akita University* 60: 29-39 pp.

- Hida, N. & Ohizumi, Y. (2006). Basin artificial recharge and groundwater Mound formation: a case of the Rokugo alluvial aquifer, Northern Japan. *Recharge Systems for Protecting and Enhancing Groundwater Resources. Series on Groundwater 13*: 687-692 pp.
- Hida, N., Nguyen, M. & Kagabu, M. (2009) "Experience of managed aquifer recharge using basin method in the Rokugo alluvial fan, Northern Japan". *International Symposium on Efficient Groundwater Resources Management*: 87-88 pp. Bangkok (Tailandia).
- Hiddink, G.J. (1974). "Erfahrungen mit der kuenstlichen grundwasseranreicherung ind Hardhof". *Das-Wasser-Abwasser 54 (11)*: 507-518 pp.
- Hjort, J. & Ericsson, P. (1996). "Investigation of a future artificial groundwater supply of greater Stockholm". *Artificial Groudwater Recharge. Proceedings of the International Symposium. Helsinki (Finlandia)*.
- Holthusen, W. (1928). "Das grundwasserwerk curslack ein weiterer schritt zur losloesung der hamburgen wasserversorgung von der Elbe". *FWR-Wasser-Abwasser. Das Gas und Wasserfach 71*, 86-97 pp.
- Houston, S.L., Duryea, P.D., & Hong, R., (1999) Infiltration considerations for round-water recharge with waste effluent. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 125(5): 264-272.
- Hutchison, A., Milczarek, M & M. Banerjee (2013). Clogging Phenomena related to Surface Water Recharge Facilities. In Martin Eds. *Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods. IAH Commission on Managing Aquifer Recharge, Australia*.
- IASH (1970). "International survey on existing water recharge facilities". *Int. Assoc. Scientific Hydr. Am. Geophysic. Union*.
- Icekson-Tal, N. & Blanc, R. (1998). "Wastewater treatment and groundwater recharge for reuse in agriculture: Dan Region reclamation project, Shagdan". *Third International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Amsterdam (Holanda)*.

- Iglesias, A. (2006). "Hidrodinámica subterránea y modelos en hidrogeología". Curso de Doctorado. E.T.S.I.M, U.P.M. Madrid (España). 128 pp.
- IGME (2008). "Aguas subterráneas: un reservorio para un planeta sediento". Exposición Planeta Tierra. Madrid (España).
- Izbicki, J.A., Flint, A.L. & Stamos, C.L. (2008): "Artificial Recharge Through a Thick, Heterogeneous Unsaturated Zone." *Ground Water* 46(3): 475-488.
- Jiménez, G.E. (2013). Caracterización de la Cuenca del Río San José en Arica para la Evaluación a Nivel de Perfil de un Sistema de Recarga Artificial de Acuíferos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Jos, H. (1996). "Are there any blueprint for artificial recharge?". International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Helsinki (Finlandia).
- Kakubari, M. (2006). "Summary and effect of the artificial recharge of groundwater". *Tennomizu Chinomizu* 159: 11-25 pp.
- Kalbus, E., Reinstorf, F. & Schirmer, M. (2006): "Measuring methods for groundwater – surface water interactions: a review." *Hydrol. Earth Syst. Sci* 10(6): 873-887.
- Kent, L.E. (1954). "Artificial recharge of groundwater in the Union of South Africa". Union of South Africa Geological Survey, 9 pp.
- Knapp, G. (1973). "Artificial recharge of ground water, a bibliography". Office of Water Resources Research. US Dept. Interior, USA, 309 pp.
- Knapton, A., Jolly, P., Pavelic, P., Dillon, P., Barry, K., Mucha, M. & Gates, W. (2004). "Feasibility of a pilot soil aquifer treatment plant at the Arid Zone Research Institute". Informe. Department of Infrastructure, Planning and Environment. Alice Springs (Australia).
- Koetter, K (1970). "Surface water pretreatment: simple procedures as a first step before recharge of groundwater". *Int. Symp. on Artificial Groundwater Recharge*, 34. Dortmund (Alemania).

- Kowal, A. (1979). "Infiltration practices in Poland". Int. Symp. on Artificial Groundwater Recarge 1 (11): 87-99 pp. Berlín (Alemania).
- Koziorowski, G. (2012): Preparatory hydrogeological investigations for the large-scale strategic ASRproject in the Liwa Desert of the Abu Dhabi Emirate. Hydrogeology of Arid Environments. Rausch, R., Schüth, C. and Himmelsbach, T. (Eds.), Hannover, 14.-17.03.2012, Bornträger Science Publishers. p.71-75.
- Lai, J. & Ren, L. (2006): "Assessing the Size Dependency of Measured Hydraulic Conductivity Using Double-Ring Infiltrimeters and Numerical Simulation." Soil Science Society of America Journal 71(6): 1667-1675.
- László, F. & Literathy, P. (1996). "Processes affecting the quality of bank-filtered water". International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Helsinki (Finlandia).
- Ley 1552 del 30 de agosto de 1902, modificada el 09 de enero de 2014 por la Ley 20720, sobre el Código de Procedimiento Civil del Ministerio de Justicia.
- Ley 18.902, de 1990 que crea la Superintendencia de Servicios Sanitarios. Última modificación el 26 de enero de 2010 por la Ley 20.417. <http://www.leychile.cl/N?i=30274&f=2010-01-26&p=>.
- Lluria, M.R., Gorey, T.L. & Marck, R.B. (1991). "Hydrogeochemistry and chemical compositional changes of groundwater from a deep well recharge operation using river water subjected to limited on-site treatment". V Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. University of Arizona. 155-165 pp.
- Lluria, M.R. (2009). "Successful application of managed aquifer recharge in the improvement of the water resources management of semiarid regions: examples from Arizona and the Southwestern USA". Boletín Geológico y Minero 120 (2): 111-120 pp. IGME. Madrid (España).
- Luhmann, A.J., Covington, M.D., Alexander, S.C., Chai, S.Y., Schwartz, B.F., Groten, J.T. & Alexander Jr, E.C. (2012): "Comparing conservative and nonconservative tracers in karst and using them to estimate flow path geometry." Journal of Hydrology 448-449(0): 201-211.

- Magni, E. (1977). "Esperienze sugli impianti di ravvenamento". Consorzio Provinciale di Acqua Potabile. Convegno su Risorche Idriche, 211-220 pp. Milán (Italia).
- Mandoul, H. (1898). "Contribution a l'étude des filtres naturels: application a l'alimentation en eau de Toulouse".
- Mania, J. & Ricour (1977). "Alimentation en eau de l'agglomeration boulonnaise a partir de la nappe du sequanien". Techniques et Sciences Municipales 72, 75-83 pp.
- Martí, B. (1984). "Recarga Artificial". Tecniberia 2 (6): 30-33 pp. Madrid (España).
- Martin, M., Xu, C. & Rattray, K. (2002). "Management of physical clogging at Jandakot ASR, Perth, Western Australia". Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Balkema. 199-202 pp.
- Martin, R., (ed.) (2013) Clogging issues associated with managed aquifer recharge methods. IAH Commission on Managing Aquifer Recharge, Australia.
- Martinell, R. (1979). "Operating experience from in situ removing of iron and manganese according to the Vyredox method". Int. Symp. on Artificial Groundwater Recharge 3 (13): 239-252 pp. Berlín (Alemania).
- Mazzarella, S. (1977). "Regolazione e protezione del serbatoio naturale sotterraneo mediante l'alimentazione artificiale". Consorzio Provinciale di Acqua Potabile. Convegno su Risorche Idriche, 172-179 pp. Milán (Italia).
- Mikkelsen, P.S., Weyer, G., Berry, C., Walden, Y., Colandini, V., Poulsen, S., Grotehusmann, D. & Rohlfing, R. (1994): "Pollution from urban stormwater infiltration." Water Science and Technology 29 (1/2): 293-302.
- Ministerio de Obras Públicas - MOP (1975). Algunos aspectos sobre la recarga de los acuíferos del Río Maipo. Santiago, Chile. Oficina Ingeniería y Planificación; Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Obras. 117 p. Ilus. (IPLA, 40).
- Ministerio de Obras Públicas - MOP (2013). Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012 - 2015. MOP, Gobierno de Chile.

- Muller-Feuga, R. & Ruby, P. (1965). "Alimentation artificielle de la nappe del alluvions de la Basse-Durance". *L'Houille Blanche* 3, 261-267 pp.
- Murillo, J.M. (1994). "Efecto de la colmatación en la estimación de la vida útil de una instalación de Recarga Artificial". *Boletín Geológico y Minero* 105 (6): 557-565 pp.
- Murillo, J.M., De La Orden, J.A., Armador, J.L. & Castaño, S. (2000). "Recarga Artificial de acuíferos". Diputación Provincial de Alicante. ITGE, Madrid.
- Murray, E.C. & TREDOUX, G. (1998). "Artificial recharge: a technology for sustainable water resource development". Water Research Commission Report Nº 842/1/98. Pretoria (Sudáfrica).
- Murray, E.C. & Tredoux, G. (2002). "Pilot artificial recharge écheme: testing sustainable water resource development in fractured aquifers". Water Research Commission Report Nº 967/1/02. Pretoria (Sudáfrica).
- Murray, E.C. (2004). "Wise water management for toxns and cities". Water Research Commission. City of Cape (Sudáfrica).
- Murray, E.C., Tredoux, G., Ravenscroft, P. & Botha, F. (2007). "Artificial recharge strategy". Department of Water Affairs and Forestry. Water Research Commission (Sudáfrica).
- Murray, R. (2009). A check-list for implementing successful artificial recharge projects. Republic of South Africa. Department water Affairs (DWA), PRSA 000/00/11609/2. Activity 12 (AR02).
- Norma Chilena – NCh1333.of78, modificada en 1987. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.
- Norma Chilena – NCh409. Norma sobre la calidad del agua potable. Agua potable, Parte 1: Requisitos.
- O'Shea, M.J. (1967). "Replenishment of underground water supplies: Burdekin delta, Queensland". *Civil Eng. Trans. Inst. Engineers* 9 (1): 117-126 pp. Australia.

- Olsthoorn, T.N. (1982). Clogging of recharge wells: main subjects. In *KIWA-communications* (Vol. 72). 136 pp. KIWA.
- Organización de las Naciones Unidas - ONU (1977). "Almacenamiento y Recarga Artificial de aguas subterráneas". Recursos Naturales. Serie del Agua 2, 306 pp.
- Ortiz, G. (2012) Investigación y cuantificación de los procesos de Colmatación en las operaciones de recarga artificial de acuíferos mediante balsas de Infiltración y pozos de inyección. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Paski, M.P. & Lluria, M.R. (2005). "Hydrogeologic and geologic considerations for site selection of a large water spreading facility in the West Salt River Valley". XII Symposium on Groundwater Recharge. 81-91 pp.
- Pavelic, P., Dillon, P., Toze, S., Barber, C., Yin Foo, D., Knapton, A. & Jolly, P.B. (2002). Water banking in the australian tropics: results from a trial on South Goulburn Island, Northern Territory. Management of Aquifer Recharge for Sustainability. Balkema. 441-446 pp.
- Pavelic, P., Dillon, P., Barry, K. & Gerges, N. (2006). Hydraulic evaluation of aquifer storage and recovery (ASR) with urban stormwater in a brackish limestone aquifer. *Hydrogeology Journal*. 14(8): 1544-1555.
- Pavelic, P., Dillon, P.J., Barry, K. E., Vanderzalm, J.L., Correll, R.L., & Rinck-Pfeiffer, S. M. (2007). Water quality effects on clogging rates during reclaimed water ASR in a carbonate aquifer. *Journal of Hydrology*, 334(1), 1-16.
- Pedretti, D., Barahona-Palomo, M., Bolster, D., Sanchez-Vila, X. & Fernàndez-Garcia, D. (2012): "A quick and inexpensive method to quantify spatially variable infiltration capacity for artificial recharge ponds using photographic images." *Journal of Hydrology* 430-431(2 April): 118-126.
- Perez-Paricio, A., & Carrera, J. (1999). Clogging handbook. Informe no publicado. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Pérez-Paricio, A. (2001). Integrated modelling of clogging processes in artificial groundwater recharge. Tesis Doctoral. UPC. 112 pp.

Pitt, R., Clark, S. & Field, R. (1999): "Groundwater contamination potential from stormwater infiltration practices." *Urban Water* 1(3): 217-236.

Pyne, R.D.G. (1995). "Groundwater recharge and wells. A guide to aquifer storage and recovery". Boca Raton, Lewis Publishers, Florida (USA).

Resolución DGA N° 980 del 12 de Mayo de 1995, que crea el Centro de Información de recursos Hídricos. Este acto administrativo entrega y define los objetivos y funciones de la unidad que se crea.

Resolución Exenta DGA N° 185 del 27 de Febrero de 2004, que crea la Unidad de Fiscalización de la Dirección General de Aguas y de la misma manera que otras resoluciones define sus objetivos y funciones.

Resolución DGA N° 1622 del 08 de Noviembre del 2005, aprueba instructivo para la aplicación del artículo 135 de Código de Aguas, relativo al cobro por visitas a terreno en la tramitación de Solicitudes de Derecho de Aprovechamiento de Aguas y Solicitudes de Regularizaciones por el Artículo 2 Transitorio. Modificada por la Resolución DGA N° 4137 del 21 de Diciembre del 2011.

Resolución DGA N° 4137 del 21 de Diciembre del 2011, deja sin efecto y aprueba instrucciones para la aplicación del artículo 135 del Código de Aguas relativas a la solicitud de fondos para realizar visitas inspectivas a terreno de la Dirección General de Aguas.

Resolución DGA N° 336 del 24 de Septiembre de 2007, que establece texto de resolución que dispone las atribuciones y facultades que son delegadas a los directores regionales.

Resolución Exenta DGA N° 1043 del 30 de Abril de 2008, que crea la unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas. En este acto administrativo, también se entregan los objetivos de la unidad así como las funciones.

Resolución Exenta DGA N° 3512 del 18 de Diciembre de 2008, que crea la Unidad de Auditoría Interna de la Dirección General de Aguas.

Resolución DGA Nº 1189 del 12 de Abril de 2011, que crea la unidad organizaciones de usuarios y Eficiencia Hídrica de la Dirección General de Aguas, asimismo se entregan los objetivos y funciones de dicha unidad.

Resolución DGA Nº 56 del 27 de Septiembre del 2013, que establece un nuevo texto de resolución que dispone las atribuciones y facultades que se delegan a los Directores Regionales del Servicio, dejando sin efecto una serie de resoluciones anteriores, entre ellas la Res. 336 del 24 de Septiembre de 2007.

Resolución Exenta DGA Nº 3453 del 18 de Diciembre de 2013, que rectifica la resolución DGA Nº 56.

Richter, R. C. Y Chun, R. & D. (1959). "Artificial recharge of ground water reservoirs in California". American Society of Civil Engineers. Irrigation and Drainage Division. Cleveland (USA). 44 pp.

Rinck-Pheiffer, S., Pitman, C. & Dillon, P. (2005). "Stormwater ASR in practice and ASTR (Aquifer Storage Transfer and Recovery) under investigation in Salisbury, South Australia". V International Symposium on Management of Aquifer Recharge. 151-159 pp. Berlín (Alemania).

Rodgers, M., Mulqueen, J., & Healy, M.G. (2004). Surface clogging in an intermittent stratified sand filter. Soil Science Society of America. 68: 1827-1832.

Rojas, M.A. (2013). Aspectos de diseño y operación de sistemas de recargas artificiales a acuíferos. Aplicación al valle del Aconcagua, Región de Valparaíso. Universidad Central de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Ingeniería Civil en Obras Civiles.

Sahún, B. & Murillo, J.M. (2000). "Identificación de acciones y programación de operaciones de Recarga Artificial de acuíferos en las cuencas intercomunitarias". Secretaría de Estado de Aguas y Costas. ITGE, Madrid.

Saraf, A.K. & P.R. Choudhury (1998) Integrated remote sensing and GIS for groundwater exploration and identification of artificial recharge sites. Int. J. Remote Sensing. Vol., 19. No. 10. 1825-1841.

- Schassmann, H. (1978). "Aus der praxis der grundwasseranreicherung in der Schweiz". *Osterreichische Wasserwistschaft* 30 (1): 7-18 pp.
- Servicio de Evaluación Ambiental – SEA (2012). Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA. Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General de Aguas.
- Servicio de Evaluación Ambiental – SEA (2014). Guía de permiso para efectuar modificaciones de cauce. Permiso Sectoriales (PAS). Ministerio del Medio Ambiente, Dirección General de Aguas.
- Schmidt, C.K., Lange, F.T., Brauch, H.J. & Kühn, W. (2003). "Experiences with riverbank filtration and infiltration in Germany". Water Technology Center. Berlín (Alemania).
- Shelef, G., R. Moraine, A. Meydan, G. Oron, E. Sand- bank, Y. Azov, A. Levin, & B. Turzynski. (1979). Combined systems for algal wastewater treatment and reclamation and Protein production. Sherman Environ-mentalEngineering Research Center, Technion, Haifa, Israel.
- Siegrist, R.L. (1987) Soil clogging during subsurface wastewater infiltration as affected by effluent composition and loading rate. *Journal of Environmental Quality* 16(2): 181–187.
- Simmonfy, Z. (2003). "Artificial recharge in Hungary: induced bank filtration". *Management of Aquifer Recharge and Subsurface Storage*, 32-43 pp. Netherlands National Committee for the IAH. Amsterdam (Holanda).
- SKM (2010). Managed Aquifer Recharge Feasibility Study. For Enviroenment Canterbury. 70 pp.
- Smith, C.G. & Hanor, J.S. (1975). "Underground storage of treated water: a field test". *Ground Water* 13 (5): 410-417 pp.
- Sociedad Química y Minera de Chile -SQM & Pramar Ambiental (2010). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa. Capítulo 7. Plan de medidas de mitigación, reparación y compensación. SQM, Santiago, Chile.

- Sorman, A.U, Abdulrazzak, M.J., & Rizaiza, O.A. (1997). Estimation of natural groundwater recharge under Saudi Arabian arid climatic conditions. In Estimation of Natural Groundwater Recharge (pp. 125-138). Springer Netherlands.
- Steinel, A. (2012). Guideline for assessment and implementation of Managed Aquifer Recharge (MAR) in (semi-)arid regions. Pre-feasibility study for infiltration of floodwater in the Amman-Zarqa and Azraq basins, Jordan. Fin. rep. of GeoSFF study "MAR in Jordan" prepared by MWI & BGR: 220 p.; Hannover.
- Stumm, W., & Morgan, J.J. (1996). Aquatic chemistry, chemical equilibria and rates in natural waters. Env. Sci. Technol.
- Stuyfzand, P.J. & Doomen, A. (2004). "The Dutch experience with MARS (Managed Aquifer Recharge and Storage): a review of facilities, techniques and tools". NWP/PMC Groundwater Publication. KIWA Partners voor Water (Holanda).
- Taylor, L.E. (1963). A report on artificial recharge of aquifers for hydrology. Journal British Water Works Association 45: 1-36 pp. Londres (Reino Unido).
- Tixeront, J. & Daniel, J.M. (1967). Alimentation et suralimentation des nappes souterraines: observation d'un cas de réalimentation par pompage: l'oued Biskra (Algérie). Artificial Recharge and Management of Aquifers. Int. Assoc. Scientific Hydrology 72: 173-181 pp.
- Tobar, E. (2009). Modelación del Efecto de la Recarga Artificial Sobre la Operación del Dren Las Vegas. Memoria para optar al título de Ingeniería Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Töre, S. (2014). El lento camino en la Recarga Artificial de acuíferos. Revista AIDIS 47: 27-31.
- Toze, S., Hanna, J., Smith, A. & Hick, W. (2002). "Halls Head indirect treated wastewater reuse scheme". Informe. Water Corporation of Western Australia. 106 pp.
- Tredoux, G. & Cave, L.C. (2002). "Atlantis aquifer: a status report on 20 years of groundwater management at Atlantis". CSIR Report N° ENV-S-C-2002-069. City of Cape Town (Sudáfrica).

- Tredoux, G., Cave, L.C. & Bishop, R. (2002). Long-term stormwater and wastewater infiltration into sandy aquifer, South Africa. *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. Sweets and Zeitlinger, 35-40 pp.
- Trueeb, E. (1979). Uebersicht ueber den stand der kuenstlichen grundwasseranreicherung in der Schweiz". *Int. Symp. On Artificial Groundwater Recharge 1* (11): 43-62 pp. Berlín (Alemania).
- Tuinhof, A., Van Steenberg, F., & Tolck, L. (2012). Profit from storage: The costs and benefits of water buffering.
- Valliant, J.C. (1964). Artificial recharge of surface water to the Ogallala formation in the high plains of Texa". *Ground Water 2* (2): 42-45 pp.
- Victoria, J.A. & Pellegrino, J.M. (1972). "Recarga Artificial en el valle de Tulum, provincia de San Juan". *Centro Regional de Aguas Subterráneas. Subsecretaría de Recursos Hídricos 162*: 7 pp. Argentina.
- Volker, R.E. (ed) (1981). *Proc. Groundwater Recharge Conference*. Tonsville. July, 1980. Aust. Water Resources water Conf. Series Nº 3. Pp 60-71. Aust. Government Publishing Service. Canberra.
- Warburton, J. (1998): A reconnaissance survey of surface water infiltration characteristics. In: *Arid Land Resources and their Management. Jordan's Desert Margin*. Dutton, R.W., Clarke, J.I. and Battikhi, A.M. (Eds.). London, Kegan Paul International, p. 157-170.
- Yamamoto, S. (1972). "Artificial recharge in Japan". *I.A.H. Memoire 2*: 111-114 pp.
- Zeelie, S. (2002). "Omdel dam and recharge ponds to enhance recharge in Namib Desert". *Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. Sweets and Zeitlinger, 387-392 pp. Adelaida (Australia).