



#

INFORME TÉCNICO
Análisis y Síntesis Preliminar de Iniciativas
Sobre Recarga Artificial en Chile

REALIZADO POR:
División de Estudios y Planificación
SDT N° 344

Santiago, Septiembre de 2013

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. ANTECEDENTES GENERALES DE LA RECARGA ARTIFICIAL.....	6
2.1. Objetivos, Condiciones y Ventajas de la Recarga Artificial.....	6
2.2. Requerimientos de Información	7
2.3. Métodos o Dispositivos de Recarga.....	9
2.3.1. <i>Dispositivos Superficiales.....</i>	<i>10</i>
2.3.2. <i>Dispositivos Profundos</i>	<i>11</i>
3. ANTECEDENTES LEGALES DE LA RECARGA ARTIFICIAL	13
3.1. Disposiciones del Código de Aguas.....	13
3.1.1. <i>Código de Aguas</i>	<i>13</i>
3.1.2. <i>Reglamento del Código de Aguas.....</i>	<i>17</i>
3.1.3. <i>Consideraciones Relacionadas con el Otorgamiento y el Ejercicio.....</i>	<i>18</i>
3.2. Disposiciones Relativas a Medio Ambiente.....	20
3.2.1. <i>Ley de Bases de Medio Ambiente.....</i>	<i>20</i>
3.2.2. <i>Reglamento de la Ley de Bases de Medio Ambiente.....</i>	<i>21</i>
3.2.3. <i>Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas</i>	<i>21</i>
4. ESTUDIOS Y EXPERIENCIAS DE RECARGA ARTIFICIAL EN CHILE	23
4.1. DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA)	23
4.1.1. <i>Investigación Recarga Artificial Acuíferos Cuencas del Río Choapa y Quillimarí, Región de Coquimbo, SIT N° 292; DEP-DGA, AC Ingenieros Consultores Ltda.; 2012.</i>	<i>23</i>
4.1.2. <i>Iniciativas en estudio</i>	<i>27</i>
4.2. COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO (CNR)	29
4.2.1. <i>Mejoramiento del Sistema de Aguas Subterráneas para su utilización en Riego en la cuenca del Río Copiapó; CNR, Jorquera y Asociados S.A.; Noviembre 2012.</i>	<i>29</i>
4.2.2. <i>Mejoramiento de Agua Subterránea para Riego Ligua y Petorca; CNR, GCF Ingenieros Ltda.; Enero 2013.....</i>	<i>38</i>
4.2.3. <i>Estudio Básico “Análisis alternativas piloto recarga artificial Ligua – Petorca, V Región”; CNR, Aqualogy Medioambiente Chile S.A.; Agosto 2013.</i>	<i>43</i>
4.2.4. <i>Estudio Diagnóstico de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos en las Regiones de Arica y Parinacota a la Región Del Maule; CNR, GCF Ingenieros Ltda.; Marzo 2013.</i>	<i>54</i>

4.2.5. <i>Iniciativas en estudio</i>	64
4.3. DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS (DOH).....	65
4.3.1. <i>Estudio Recarga Artificial de Acuíferos en el Valle del Aconcagua Usando Derechos Eventuales del Fisco; DOH, Ernesto Brown F.; Enero 2012.</i>	65
4.3.2. <i>Análisis de potencialidad de recarga artificial acuíferos primera y tercera sección valle del Aconcagua; DOH, GeoHidrología Consultores; 2012.</i>	68
4.3.3. <i>Estudio e Implementación de un Plan Piloto de Recargas Artificiales a los Acuíferos del Valle del Aconcagua; DOH, GeoHidrología Consultores; en ejecución.</i> ...	73
4.3.4. <i>Iniciativas en estudio</i>	73
4.4. OTRAS INSTITUCIONES PÚBLICAS.....	74
4.4.1. <i>Instituto Nacional de Hidráulica (INH)</i>	74
4.4.2. <i>Universidad Católica del Norte</i>	75
4.5. OTRAS INICIATIVAS DE RECARGA ARTIFICIAL	76
4.5.1. <i>Proyecto de recarga artificial en el acuífero de Colina; Sociedad de Canal del Maipo.</i> 76	
4.5.2. <i>Proyecto de recarga artificial en el acuífero de Santiago; Sociedad de Canal del Maipo.</i>	80
4.6. OTRAS REFERENCIAS	84
5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	88
6. BIBLIOGRAFÍA	89

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el Código de Aguas contiene una serie de herramientas para una gestión adecuada de los acuíferos, algunas de las cuales fueron complementadas con la reforma del año 2005.

Respecto de las aguas subterráneas, es importante destacar tres aspectos en la modificación del Código de Aguas:

- Reconoce legalmente que las aguas subterráneas son parte del sistema hidrológico de una cuenca
- Posibilita la formación de comunidades de aguas subterráneas para el manejo y control de los acuíferos
- Incorpora legalmente acciones para la recarga de acuíferos, pues permite la inscripción de derechos de aprovechamiento sobre la base del volumen recargado al acuífero.

Sin embargo el mayor desafío ha sido su implementación. La falta información y poco conocimiento del recurso en algunas zonas del país, falta de reglamentación, entre otros aspectos, han hecho que se avance lentamente en la utilización de estas herramientas. Aun así, la misma Dirección General de Aguas y otros organismos estatales han creído conveniente avanzar en estudios relativos a la recarga artificial de acuíferos.

En ese sentido, este informe tiene como objetivo principal recopilar información y aspectos generales de las iniciativas de recarga artificial de acuíferos que se han llevado a cabo o están en desarrollo y sean financiadas por organismos del Estado.

Se revisaron los estudios realizados a la fecha por la Dirección General de Aguas (DGA), la Comisión Nacional de Riego (CNR), la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), entre otras reparticiones públicas, y se averiguó respecto a iniciativas en carpeta a desarrollar en el corto plazo por estos organismos.

Así, en este informe se presenta la información recopilada y una síntesis preliminar de las iniciativas de recarga artificial de acuíferos en Chile.

2. ANTECEDENTES GENERALES DE LA RECARGA ARTIFICIAL¹

2.1. Objetivos, Condiciones y Ventajas de la Recarga Artificial

Se considera como recarga artificial a cualquier acción antrópica destinada a incrementar la tasa de infiltración natural sobre un acuífero con el objeto de aprovechar la capacidad de regulación natural de éste para su aprovechamiento en un tiempo posterior o bien para reducir el nivel de sobreexplotación de largo plazo.

Los principales objetivos de la recarga artificial son:

- Almacenar en acuíferos agua superficial excedente, evitando las pérdidas por evaporación, utilizando la función capacitiva del acuífero, e incrementando el volumen del recurso agua disponible.
- Transvasar agua de un punto a otro, sin necesidad de obras de conducción, actuando el acuífero no sólo como almacén sino también como elemento de transporte.
- Crear barreras para:
 - frenar el descenso regional del nivel de aguas subterráneas,
 - frenar el avance de la intrusión marina, o
 - limitar la extensión del cono de drenaje producido por un drenaje minero u excavación subterránea
- Actuar frente a problemas de subsidencia

El desarrollo de obras de recarga artificial requiere de ciertas condiciones que favorecen o facilitan el proceso de infiltración y almacenado de las aguas en el acuífero. Aunque no son totalmente limitantes pueden condicionar de forma importante el objetivo de una obra de recarga. Dichas condiciones tienen que ver con contar con suelos permeables que condicionan el método de recarga, un acuífero suficientemente permeable para asegurar un proceso de infiltración eficiente hasta la napa y un agua de recarga de calidad adecuada tanto física (desprovista de sedimentos), como química (que no afecte la calidad natural del agua de la napa). Las principales ventajas de la implementación de proyectos de recarga artificial son:

- Reducir el descenso del nivel del agua producido por sobre-bombeo o sobreexplotación, que genera los consiguientes problemas y sobrecostos derivados de abandono de pozos o re-profundización de los mismos.
- Utilización del acuífero como embalse regulador natural, favoreciendo la reducción de pérdidas por evaporación, y por otro, facilitar a los usuarios la oportunidad de tener una cierta independencia de las intermitencias del ciclo hidrológico, y una favorable repartición temporal de los recursos, aumentando el rendimiento y la regulación de los recursos del agua.

¹ Lo presentado en este apartado corresponde a un extracto del estudio "Investigación Recarga Artificial Acuíferos Cuencas del Río Choapa y Quilimarí, Región de Coquimbo", SIT N° 292 (DEP-DGA, AC Ingenieros Consultores Ltda.; 2012.).

Otras ventajas de menor relevancia que pueden señalarse son:

- Utilización del acuífero como red de distribución, lo que permite reducir o evitar la construcción o instalación de obras de conducción o distribución.
- Permitir compensación de efecto de pérdida de recarga natural producido por actividades antrópicas tales como modificación de cauces, urbanizaciones, drenajes, etc.
- Evitar que aguas de inferior calidad existentes en el acuífero se desplacen hacia las captaciones de buena calidad.
- Establecer una barrera hidráulica para controlar o “encapsular” focos de contaminación
- Evacuación y depuración de aguas residuales tratadas, en la medida que las disposiciones vigentes lo permitan, a través de su infiltración en el terreno.
- Control de intrusión salina en zonas costeras

2.2.Requerimientos de Información

En términos generales, los estudios de base y la ejecución del proyecto requieren abordar aspectos tales como: análisis de usos y demandas, caracterización hidrológica, climatológica e hidroquímica; caracterización hidrogeológica, modelación numérica del sistema hidrogeológico (simulación para diseño, operación y gestión), desarrollo de estudios hidrogeológicos de detalle; levantamiento de información de terreno; idealmente la construcción de una instalación piloto y, su seguimiento y control.

Lo anterior permite disponer de un conocimiento básico para la evaluación de la obra de recarga e identificar de forma adecuada los factores que condicionan su realización. Dichos factores corresponden a: características del agua de recarga; características del acuífero receptor; condiciones meteorológicas y ambientales del entorno, y características de la instalación y método de recarga.

i. Características del agua de recarga

El agua de recarga puede tener diferentes orígenes, desde aguas de escorrentía superficial; distinguiendo las de deshielo, las de crecidas y las de flujo base; aguas procedentes de plantas de tratamiento (sanitarias o riles); aguas lluvias urbanas; aguas de desalinización, entre otras.

Resulta fundamental conocer adecuadamente la evolución temporal de esa agua, tanto en cantidad como en su constitución físico-química, lo anterior incluye el análisis de la situación de extracciones y descargas, por cuanto pueden incidir en cantidad y calidad (incluyendo los aspectos sedimentométricos).

La información necesaria para estos efectos corresponde a:

- Caudales medios, máximos y mínimos
- Concentración de sólidos en suspensión,

- Composición físico-química incluyendo macroelementos, metales pesados, compuestos orgánicos, compuestos nitrogenados y fósforo.
- Análisis bacteriológico y virológico
- Contenido en gases disueltos

Probablemente no se cuente con toda la información requerida a través de las redes de monitoreo públicas; lo que requerirá el levantamiento de información de campo y evaluar la necesidad de implementar mediciones sistemáticas para el desarrollo del proyecto y para posteriormente el seguimiento y control de su desempeño.

ii. Características del acuífero receptor

En principio, la recarga artificial puede realizarse sobre cualquier formación permeable, que tenga condiciones de almacenamiento y transmisión adecuadas. El éxito de la operación depende, en gran medida, de sus características hidrogeológicas e hidrodinámicas, así como del régimen de explotación al que esté sometido.

Normalmente, la recarga artificial se realiza sobre acuíferos libres, con nivel piezométrico a profundidad intermedia o somera, bien en materiales granulares (depósitos aluviales o areniscas), bien en materiales consolidados (calizas y dolomías fracturadas y/o karstificadas), aun cuando también puede ser aplicada a acuíferos confinados a cierta profundidad y bajo presiones elevadas.

Los datos del acuífero que es necesario conocer corresponden a:

- geología, litología (formaciones, fallas, volcanismo, etc.)
- hidrogeología (extensión rellenos, naturaleza y estructura, espesor, granulometría, compactación, transmisividad, porosidad, coeficiente de almacenamiento, permeabilidad, dirección del flujo, niveles, etc.)
- calidad del agua almacenada y potencial respuesta o reacciones frente a cambios de parámetros físico-químicos (quimismo)
- ubicación de afloramientos y zonas de pérdida del cauce

En lo referente a los aspectos hidrodinámicos la respuesta del acuífero frente a la señal hidrológica es relevante. Esto, en el sentido de que existen sistemas de respuesta rápida, con vaciamientos y llenado frecuente, incluso en casos donde la explotación puede ser intensiva, frente a otros de mayor volumen, o con una razón "volumen de recarga/volumen almacenado" mucho menor cuyas fluctuaciones son más lentas.

iii. Características hidroclimatológicas

La meteorología condiciona la oferta de agua; también las condiciones de flujo de infiltración en los primeros horizontes del suelo. Los factores hidrometeorológicos más relevantes que inciden en el balance hídrico, especialmente en su distribución temporal y en las variaciones de almacenamiento que son las relevantes en este tipo de proyectos, son:

- Pluviometría
- Evaporación
- Evapotranspiración
- viento, temperatura, insolación.

iv. Características ambientales del entorno

El relieve del entorno, condiciona las posibilidades de recarga, así como el método y las instalaciones más apropiadas. Los factores ambientales más relevantes que deben ser considerados, son los referentes a:

- topografía y pendiente
- cobertura vegetal
- red de drenaje superficial

v. Alternativas de instalaciones de recarga

El análisis de la técnica y método de recarga apropiado, para cada caso, debe ser analizado teniendo en cuenta los siguientes factores:

- diferentes alternativas de instalaciones de infiltración
- necesidad y tipo de instalaciones auxiliares (decantadores, filtros, balsas de sedimentación, electrificación, sistema de inyección a presión, conducción, etc.)
- métodos, equipos de control y seguimiento (caudalímetros, piezómetros, presión de inyección, toma de muestras, etc.)
- elementos de conducción del agua de recarga (acequias, canales, tuberías, etc.).

2.3. Métodos o Dispositivos de Recarga

Existen diversos tipos de métodos o dispositivos desarrollados para incrementar la recarga hacia los acuíferos, de hecho hay varios métodos de carácter ancestral utilizados en la zona de los Andes (por ejemplo: terrazas de riego y canales o zanjas interceptoras) cuyos fundamentos se siguen aplicando en la actualidad.

Los dispositivos u obras de recarga se pueden clasificar en dos grandes grupos: superficiales y profundos. Las obras de carácter superficial, como su nombre lo señala, buscan infiltrar el agua desde la superficie, ya sea en el cauce natural o fuera de éste; en contraposición, las obras profundas o subterráneas; buscan infiltrar el agua en profundidad, es decir en forma directa en el subsuelo, usualmente en contacto con el agua almacenada.

En el primer caso la recarga aplica a acuíferos libres, por cuanto en acuíferos confinados la capa confinante impide el ingreso de las aguas de recarga inducida por esta vía. En el caso de los métodos subterráneos este condicionamiento no existe.

2.3.1. Dispositivos Superficiales

i. Ubicados dentro del cauce

Los principales tipos de instalaciones de recarga superficial, en cauces, son los siguientes:

- **Serpenteos y barreras o diques:** Se basan en aumentar el tiempo de permanencia y la superficie de contacto, entre el agua y el terreno, mediante la construcción de diques; espigones, o barreras, transversales al cauce, que obligan a que el agua serpenteo incrementando la infiltración natural del río. Naturalmente para estos efectos el cauce natural (río, estero, quebrada) debe ser perdedor o curso influente.
- **Escarificación del lecho del cauce:** Busca mejorar las condiciones de infiltración a través de la limpieza, rascado o arado del lecho del cauce; a objeto de remover el asentamiento o depositación de materiales finos. Es una alternativa sencilla y económica que aplica cuando el cauce infiltra.
- **Zanjas filtrantes en cauces:** Consiste en zanjas excavadas dentro del lecho del cauce y perpendicularmente al sentido del flujo. Por lo general no son muy profundas; se rellenan con piedras de cantos rodados para facilitar la infiltración.; puede considerarse relleno graduado en la parte superior para un mejor control de la colmatación. La incorporación de barreras inmediatamente aguas abajo favorece la infiltración. Es importante el análisis de la variabilidad de los flujos y la torrencialidad del cauce para los fines de la estabilidad de la obra; dependiendo de esta condición puede tratarse de obras que requieran rehacerse año a año; en estos casos la construcción de barreras debe considerar tramos fusibles para evitar golpes de agua. También es una alternativa sencilla y económica aplicable cuando el cauce infiltra.
- **Barreras en cauces:** Corresponde a barreras de pequeña envergadura; el objeto es aumentar el tiempo de retención del flujo de agua, especialmente en épocas de lluvia. Puede haber de carácter permanente o de carácter provisorio; estas últimas resultan más económicas y sencillas. Dentro de este caso se pueden distinguir distintas opciones: a) Barrera impermeable; barrera permeable; barrera con orificios o ranuras; cada alternativa aplica según las condiciones del cauce en términos de la variabilidad o asimetría de los caudales; torrencialidad del cauce (pendiente, arrastre; proporción de finos respecto de fracción gruesa). En general aplica a cauces ubicados en zonas áridas, semiáridas y de transición; en particular en cauces de menor orden son recomendables ya que no implican tamaños importantes; como efecto adicional permiten amortiguamiento de las crecidas. Debe tenerse precaución en su diseño, especialmente cuando se contempla este tipo de obras en serie para evitar fallo secuencial en caso de tormentas intensas.

ii. Ubicados fuera del cauce

El fundamento de estos sistemas ampliar el área de recarga buscando una superficie de terreno propicia para la infiltración al acuífero, que para estos efectos corresponde a un acuífero libre. Las principales obras de recarga desde superficie y fuera de cauces son:

- Zanjas, acequias o canales: Corresponden a obras lineales de conducción de agua, de poca profundidad, que siguen la topografía del terreno (curvas de nivel); cumplen la función de interceptar el flujo superficial producido por la precipitación generalmente, la infiltración se produce por el fondo y por las paredes de la canalización
- Balsas, lagunas o piscinas de infiltración: Corresponde a obras, por lo general de geometría rectangular y de tierra, de poca profundidad destinadas a almacenar agua para su infiltración; la profundidad además del volumen asociado permite contar con "carga hidráulica" para reforzar el proceso de infiltración que se produce por el fondo. Estas obras de recarga suelen construirse en grupo ya sea en serie o con líneas en paralelo. La vida útil, con un adecuado mantenimiento, suele estar entre 10 y 20 años.
- Superficies de recarga: Se trata de extender agua por la superficie del terreno, normalmente mediante aspersión, de forma que se oxigena mucho el agua, creando un ambiente oxidante, que mejora la calidad bacteriológica del agua. Un caso particular corresponde a los denominados "campos de extensión o inundación", que son campos de labor agrícola sobre los que se aplican elevadas dotaciones de forma intencional, de modo de aprovechar la superficie existente para infiltración; esta técnica sólo es posible en situaciones de excedencia hídrica.
- Filtración inter-dunar: En este método, los valles entre dunas costeras de arena son inundados con agua de ríos; el agua se filtra al interior de los sedimentos subyacentes y crea un volumen de agua de recarga. Este volumen puede tener un rol importante en cuanto a prevenir la intrusión salina, además de ser una fuente de agua para utilizar tierra adentro. Un objetivo principal de este tipo de obras es la mejora de la calidad de agua del cuerpo receptor usualmente con niveles de salinidad importantes.

2.3.2. Dispositivos Profundos

El propósito es la introducción de agua de recarga en forma directa al acuífero; se realiza a través de pozos o sondajes profundos. Aplica a acuíferos libres con cierta profundidad y acuíferos confinados. Las principales obras de recarga profunda son:

- Pozos de inyección: La inyección se realiza a través de pozos o sondajes profundos, por gravedad o mediante presión. El agua se inyecta bajo el nivel piezométrico. Es importante cuidar la forma de inyección de forma de evitar turbulencias y desprendimiento de CO₂, que podría ocasionar la formación de

incrustaciones calcáreas en los filtros. Por lo general la vida útil de obras adecuadamente operadas suele ser de 5-10 años.

- Balsas o zanjas con pozos de infiltración: Corresponde a un sistema mixto, que considera las balsas y zanjas descritas previamente, a los que se incorporan pozos de inyección.
- Galerías filtrantes: Corresponde a pozos horizontales, socavones, túneles filtrantes; existiendo una gran diversidad de denominaciones; la utilización de estas obras es ancestral para el aprovechamiento de aguas subterráneas. En este caso el principio es similar pero en sentido inverso. Puede aplicarse en zonas donde se dispone de escorrentía pero los suelos someros son poco permeables, esto en combinación con zanjas o fosos que concentran y conducen el flujo hacia el punto de infiltración.
- Pozos con galerías: Considera dos componentes; una perforación vertical a partir de la cual desde el fondo se desarrollan galerías o pozos horizontales, lugar donde se produce el proceso de infiltración al acuífero. En diversos casos se entiende forma parte dentro del concepto galería filtrante.
- Simas y dolinas: En acuíferos kársticos, en los que existen cavidades verticales que alcanzan a la superficie, se pueden aprovechar estas depresiones kársticas, a modo de sumideros, para la recarga artificial.
- Filtración en el lecho de los ríos: Consiste en inducir la infiltración en el lecho del río induciendo un gradiente por bombeo desde un pozo cercano. Al igual que en la mayoría de los casos, el inconveniente principal es la génesis de procesos de colmatación (tanto biofilms como relleno de los poros por partículas de arcilla, limo o carbono orgánico), y además la acumulación de metales y compuestos orgánicos en el lecho. La conductancia del lecho y la capacidad de depuración están condicionadas, entre otros factores, por la distribución de los granos del acuífero, la calidad del agua y la temperatura. Los procesos colmatantes reducen la capacidad de infiltración del lecho, pero también contribuyen a la biodegradación de contaminantes.

3. ANTECEDENTES LEGALES DE LA RECARGA ARTIFICIAL²

A continuación se presentan todas las disposiciones que se refieren a la posibilidad de realizar la acción de recarga; las relacionadas con la materialización de las obras mismas, y las relacionadas con la operación de la recarga, elementos contenidos en el Código de Aguas y su Reglamento relativo a las aguas subterráneas.

3.1. Disposiciones del Código de Aguas

3.1.1. Código de Aguas

i. Recarga artificial

El Código de Aguas, en la modificación efectuada en el año 2005, incorpora el concepto de recarga artificial:

Art. 66. La Dirección General de Aguas podrá otorgar provisionalmente derechos de aprovechamiento en aquellas zonas que haya declarado de restricción³. En dichas zonas, la citada Dirección limitará prudencialmente los nuevos derechos pudiendo incluso dejarlos sin efecto en caso de constatar perjuicios a los derechos ya constituidos. Sin perjuicio de lo establecido en el inciso primero del artículo 67, y no siendo necesario que anteriormente se haya declarado área de restricción, previa autorización de la Dirección General de Aguas, cualquier persona podrá ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos, teniendo por ello la preferencia para que se le constituya un derecho de aprovechamiento provisional sobre las aguas subterráneas derivadas de tales obras y mientras ellas se mantengan.

² Lo presentado a continuación corresponde a un extracto del estudio "Investigación Recarga Artificial Acuíferos Cuencas del Río Choapa y Quilimarí, Región de Coquimbo", SIT N° 292 (DEP-DGA, AC Ingenieros Consultores Ltda.; 2012.).

³ La DGA, mediante Resolución N°2455 Exenta, de fecha 10 de Agosto de 2011, reemplazó el punto 6.4.2 Áreas de Restricción (Expediente Tipo VAR), en su párrafo relativo al Procedimiento, del "Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos - 2008", por el siguiente: "Declarada un área de restricción, la DGA está facultada para constituir prudencialmente, derechos de aprovechamiento de aguas, en calidad de provisionales, los que podrán transformarse en definitivos, después de 5 años de ejercicio efectivo en los términos concedidos y sin que los titulares de derechos constituidos, hayan demostrado sufrir daños.

La magnitud de los derechos de aprovechamiento provisionales quedará determinada para cada sector hidrogeológico de aprovechamiento común, utilizando otro sector hidrogeológico de aprovechamiento común como patrón o referencia, cuyas características son comparables y en el cual no se han detectado o establecido afectación a derechos de terceros ni afectación a la fuente. Dicho sector hidrogeológico de aprovechamiento de referencia o patrón se definirá en función de las características hidrogeológicas, régimen hídrico, características morfológicas, ubicación geográfica, interrelación con fuentes superficiales, áreas productivas predominantes y la relación entre la demanda comprometida y el volumen sustentable.

El volumen a otorgar como derechos provisionales, se calculará 'como el volumen determinado en la relación "demanda comprometida partido por volumen sustentable del patrón, multiplicado por el volumen sustentable del sector acuífero en estudio, menos la demanda comprometida a la fecha en el sector". Se entenderá como demanda comprometida los derechos constituidos, derechos regularizados y regularizables mediante el artículo 2° Transitorio del Código de Aguas, así como los derechos constituidos y susceptibles de ser constituidos conforme a los artículos 3°, 4° Y 6° de la Ley 20.017 de 2005. En el sector acuífero utilizado como patrón, se otorgarán nuevos derechos en calidad de provisionales, por un volumen igual al 20% de su volumen sustentable.

Art. 67. Los derechos de aprovechamiento otorgados de acuerdo al artículo anterior, se podrán transformar en definitivos una vez transcurridos cinco años de ejercicio efectivo en los términos concedidos, y siempre que los titulares de derechos ya constituidos no demuestren haber sufrido daños. Lo anterior no será aplicable en el caso del inciso segundo del artículo Art. 66, situación en la cual subsistirán los derechos provisionales mientras persista la recarga artificial. La Dirección General de Aguas declarará la calidad de derechos definitivos a petición de los interesados y previa comprobación del cumplimiento de las condiciones establecidas en el inciso precedente.

Cabe señalar además que, en el caso de proyectos de recarga artificial de acuíferos, para los cuales se contemple solicitar derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, asociados a los caudales de recarga, en calidad de provisionales, estos recursos corresponden a nuevos volúmenes de agua, que no serían homologables en una cuenca patrón de condiciones similares, pues se generan a través de un proceso no natural, como es utilizar en obras de recarga, por ejemplo aguas servidas tratadas o los caudales excedentes de invierno que se perderían en el mar e infiltrarlos al acuífero. Por lo tanto en este caso, de acuerdo a la Res. DGA N°2455, el procedimiento a aplicar para fijar los derechos provisionales sería el de considerar una magnitud equivalente al volumen sustentable en el sector, sujeto al monitoreo de la explotación y el seguimiento del comportamiento del acuífero⁴.

⁴ Para aquellos sectores en los cuales no sea aplicable la metodología anterior, debido a las características particulares del sector, o bien no exista un sector hidrogeológico de aprovechamiento común patrón, se otorgará derechos provisionales en magnitud equivalente al volumen sustentable en dicho sector, sujeto al monitoreo de la explotación y seguimiento del comportamiento del acuífero. La Dirección General de Aguas podrá exigir además un Plan de Alerta Temprana (PAT), en aquellos casos cuya evaluación y características particulares justifiquen la conveniencia de establecer un mejor control y seguimiento del estado del acuífero y su condición de explotación.

Para el otorgamiento de derechos provisionales no será requisito que la comunidad de aguas subterráneas se haya organizado, pero sí lo será al momento en que se desee la transformación de derechos provisionales a definitivos. La declaración de un sector acuífero como área de restricción, deberá publicarse en el Diario Oficial y sus efectos legales comenzarán a regir desde la fecha de su publicación.

ii. Construcción de obras de recarga

Dependiendo del tipo de solución que se desarrolle, particularmente en el caso de obras superficiales, puede ser necesaria la obtención de permisos o autorizaciones; los casos genéricos corresponden a:

- Cualquier modificación⁵ de cauce natural o artificial.
- Construcción de acueductos⁶ con capacidad de más de 2 m³/s, o aquellos próximos al límite urbano y con capacidad de más de 0,5 m³/s y a un nivel superior en 10 m por sobre el terreno del límite urbano.
- Cualquier cruce de cauce natural que se realice a través de sifón o canoa.
- Los embalses, obras de acopio de agua, cuyo volumen sea mayor a 50 mil m³ o cuyo muro tenga más de 5 m. de altura.

Quedan exceptuados de este trámite de aprobación los servicios dependientes del MOP. En el caso de las obras consideradas en el art. 294, denominadas obras mayores, se establecen exigencias relacionadas con la supervisión durante la construcción de las

⁵ Art. 41.- El proyecto y construcción de las modificaciones que fueren necesarias realizar en cauces naturales o artificiales, con motivo de la construcción de obras, urbanizaciones y edificaciones que puedan causar daño a la vida, salud o bienes de la población o que de alguna manera alteren el régimen de escurrimiento de las aguas, serán de responsabilidad del interesado y deberán ser aprobadas previamente por la Dirección General de Aguas de conformidad con el procedimiento establecido en el párrafo 1 del Título I del Libro Segundo del Código de Aguas. La Dirección General de Aguas determinará mediante resolución fundada cuáles son las obras y características que se encuentran en la situación anterior.

Se entenderá por modificaciones no solo el cambio de trazado de los cauces mismos, sino también la alteración o sustitución de cualquiera de sus obras de arte y la construcción de nuevas obras, como abovedamientos, pasos sobre o bajo nivel o cualesquiera otras de sustitución o complemento. La operación y la mantención de las nuevas obras seguirán siendo de cargo de las personas o entidades que operaban y mantenían el sistema primitivo. Si la modificación introducida al proyecto original implica un aumento de los gastos de operación y mantención, quien la encomendó deberá pagar el mayor costo.

Art. 171. Las personas naturales o jurídicas que desearan efectuar las modificaciones a que se refiere el artículo 41 de este Código, presentarán los proyectos correspondientes a la Dirección General de Aguas, para su aprobación previa, aplicándose a la presentación el procedimiento previsto en el párrafo 1º de este Título. Cuando se trate de obras de regularización o defensa de cauces naturales, los proyectos respectivos deberán contar, además, con la aprobación del Departamento de Obras Fluviales del Ministerio de Obras Públicas. Quedan exceptuados de los trámites y requisitos establecidos en los incisos precedentes, los Servicios dependientes del Ministerio de Obras Públicas, los cuales deberán remitir los proyectos de las obras a la Dirección General de Aguas, para su conocimiento, informe e inclusión en el Catastro Público de Aguas.

⁶Art. 294. Requerirán la aprobación del Director General de Aguas, de acuerdo al procedimiento indicado en el Título I del Libro Segundo, la construcción de las siguientes obras: a) Los embalses de capacidad superior a cincuenta mil metros cúbicos o cuyo muro tenga más de 5m. de altura; b) Los acueductos que conduzcan más de dos metros cúbicos por segundo; c) Los acueductos que conduzcan más de medio metro cúbico por segundo, que se proyecten próximos a zonas urbanas, y cuya distancia al extremo más cercano del límite urbano sea inferior a un kilómetro y la cota de fondo sea superior a 10 metros sobre la cota de dicho límite, y d) Los sifones y canoas que crucen cauces naturales. Quedan exceptuadas de cumplir los trámites y requisitos a que se refiere este artículo, los Servicios dependientes del Ministerio de Obras Públicas, los cuales deberán remitir los proyectos de obras a la Dirección General de Aguas, para su conocimiento, informe e inclusión en el Catastro Público de Aguas.

Art. 295. La Dirección General de Aguas otorgará la autorización una vez aprobado el proyecto definitivo y siempre que haya comprobado que la obra no afectará la seguridad de terceros ni producirá la contaminación de las aguas. Un reglamento especial fijará las condiciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de dichas obras.

obras⁷ y el establecimiento de garantías⁸; que es necesario tener presente si las obras a proyectar o construir quedan comprendidas dentro de estas especificaciones. A la fecha la reglamentación referida tanto en el art. 41 y en el 294, no ha sido oficializada; pero se encuentra en proceso avanzado por lo cual es esperable que sea publicada en un plazo relativamente breve.

Cabe agregar que también se establece la facultad de fiscalización de obras mayores (art. 307), que puedan encontrarse en una condición de deterioro y por este efecto afectar a terceros. Pudiendo establecer normas de operación transitorias y determinar multas de no efectuarse las reparaciones que corresponda.

iii. Requisitos para funcionamiento de una obra de recarga

Cualquier utilización del recurso hídrico asociada a este tipo de proyectos requiere contar con los derechos correspondientes⁹.

La obtención de los derechos puede hacerse por la vía administrativa, judicial en el caso de regularización o bien por la compra de ellos¹⁰.

No obstante existen situaciones especiales en las cuales el uso es permitido bajo ciertas condiciones, como en el caso de las aguas pluviales¹¹; situación que requiere una evaluación cuidadosa y detallada.

⁷ Art. 296. La Dirección General de Aguas supervisará la construcción de dichas obras, pudiendo en cualquier momento, adoptar las medidas tendientes a garantizar su fiel adaptación al proyecto autorizado. Las resoluciones que se dicten en conformidad a estas normas deberán ser fundadas y en contra de ellas procederán los recursos a que se refieren los artículos 136° y 137°, de este código, que en estos casos no suspenderán su cumplimiento

⁸ Art. 297. Los que construyan las obras de qué trata este título deberán constituir las garantías suficientes para financiar el costo de su eventual modificación o demolición, para que no constituyan peligro, si fueren abandonadas durante su construcción. La garantía se constituirá a favor del Fisco y será devuelta una vez recibida la obra por la Dirección General de Aguas. En el caso de que sea abandonada durante su construcción, se restituirá el saldo de la garantía no aplicada a la ejecución de las obras de modificación o demolición. Para reiniciar las obras, deberá constituirse la garantía a que se refiere el inciso primero. El Director General de Aguas podrá eximir de la obligación de constituir las garantías a que se refiere este artículo, tratándose de obras que ejecuten los Servicios Públicos o las Empresas del Estado, siempre que en el proyecto respectivo se contemplen las medidas tendientes a asegurar que en el caso de una eventual paralización de las obras éstas no constituirán peligro

⁹ Art. 5 Las aguas son bienes nacionales de uso público y se otorga a los particulares el derecho de aprovechamiento de ellas

¹⁰ Art. 6 El derecho de aprovechamiento sobre las aguas es de dominio de su titular, quien podrá usar, gozar y disponer de él en conformidad a la ley.

¹¹ Son aguas pluviales las que proceden inmediatamente de las lluvias.

Art. 10 El uso de las aguas pluviales que caen o se recogen en un predio de propiedad particular corresponde al dueño de éste, mientras corran dentro de su predio o no caigan a cauces naturales de uso público. En consecuencia, el dueño puede almacenarlas dentro del predio por medios adecuados, siempre que no se perjudique derechos de terceros

En el caso de disponer de derechos u obtenerlos en puntos distintos y en el mismo cauce, será necesario recurrir al traslado del ejercicio acorde al art. 163¹².

En el evento de que las aguas disponibles se encuentren en una fuente distinta será necesario el cambio de la fuente de abastecimiento, según lo estipulan los artículos 158 y 159¹³.

Debe tenerse presente que en los casos mencionados adicionalmente debe contarse con la autorización para construcción de bocatoma que ordena el art. 151¹⁴.

3.1.2. Reglamento del Código de Aguas

En lo fundamental en lo referido al reglamento de aguas subterráneas, el análisis se centrará en lo referido a la recarga artificial.

Específicamente el Reglamento de Aguas Subterráneas (Resolución DGA N° 425 del año 2007) establece respecto de la recarga artificial:

“Artículo 34º. Para los efectos de lo dispuesto en los artículos 66 inciso segundo y 67 inciso primero parte final, ambos del Código de Aguas, quienes deseen ejecutar obras de recarga artificial de acuíferos, deberán entregar una memoria técnica que contenga, a lo menos, lo siguiente:

- a) Descripción del sistema de recarga artificial.
- b) Descripción de la naturaleza física y situación jurídica del agua a utilizar en la recarga artificial.
- c) Descripción del sitio de recarga.
- d) Características geológicas e hidrogeológicas del sector.
- e) Características de la zona no saturada.
- f) Características de acuífero.
- g) Velocidad y dirección del flujo.

¹² Art. 163. Todo traslado del ejercicio de los derechos de aprovechamiento en cauces naturales deberá efectuarse mediante una autorización del Director General de Aguas, la que se tramitará en conformidad al párrafo 1º de este Título.(Título I, Libro segundo). Si la solicitud fuera legalmente procedente, no se afectan derechos de terceros y existe disponibilidad del recurso en el nuevo punto de captación, la Dirección General de Aguas deberá autorizar el traslado

¹³ Art. 158. La Dirección General de Aguas estará facultada para cambiar la fuente de abastecimiento, el cauce y el lugar de entrega de las aguas de cualquier usuario, a petición de éste o de terceros interesados, cuando así lo aconseje el más adecuado empleo de ellas.

Art. 159. El cambio de fuente de abastecimiento sólo podrá efectuarse si las aguas de reemplazo son de igual cantidad, de variación semejante de caudal estacional, de calidad similar y siempre que la sustitución no cause perjuicio a los usuarios.

¹⁴ Art. 151. Toda solicitud de construcción, modificación, cambio y unificación de bocatomas, deberá expresar, además de la individualización del peticionario, la ubicación precisa de las obras de captación en relación a puntos de referencia conocidos, la manera de extraer el agua y los títulos que justifiquen el dominio de los derechos de aprovechamiento que se captarán con las obras que se pretende ejecutar. El interesado podrá ingresar a un predio ajeno en la forma prevista en el art. 107, para efectuar los estudios de terreno necesarios para la elaboración del proyecto de obras.

- h) Comportamiento histórico de los niveles de agua en el sector.
- i) Calidad del agua.
- j) Impactos asociados a la obra de recarga artificial, área de influencia de la recarga artificial, impactos calculados, análisis de domos e impacto sobre la calidad del agua.
- k) Plan de monitoreo, que contemple al menos:
 - 1. Monitoreo del nivel de las aguas.
 - 2. Monitoreo de la calidad de las aguas.
 - 3. Control del caudal de recarga.
 - 4. Control de extracciones.
- l) Plan de contingencia, que contemple al menos:
 - 1. Medidas de protección del acuífero.
 - 2. Planes de alerta ante impactos no deseados.”

Cabe mencionar que los requerimientos establecidos en el art. indicado cubren en forma completa los elementos esenciales de un proyecto de recarga artificial.

En general en proyectos de esta naturaleza se puede agrupar las actividades de la siguiente forma:

Caracterización del sistema:

- Caracterización y descripción del medio físico existente
- Caracterización jurídica de las aguas de recarga
- Descripción del sistema de recarga y sus obras anexas (incluye operación y mantenimiento)

Análisis predictivo de la respuesta del sistema:

- Análisis predictivo de efectos sobre el medio y sobre derechos existentes

Seguimiento y control:

- Plan de monitoreo del sistema
- Plan de operación y mantenimiento
- Plan de contingencia
- Plan de abandono

Se observa que no está explícitamente descrito un plan de abandono; en el evento que esto ocurra; en este sentido es necesario establecer las acciones necesarias para que la obra no represente efectos negativos al quedar abandonada. En los casos que ella quede comprendida dentro del art. 294; este punto queda cubierto.

3.1.3. Consideraciones Relacionadas con el Otorgamiento y el Ejercicio

En este punto el análisis se centra en las condiciones o situaciones que pudieran presentarse en la operación de un sistema de recarga en lo referente al aprovechamiento de los derechos provisionales asociados.

- **Establecimiento de un derecho de aprovechamiento asociado**
Son derechos de carácter provisional que no requieren que exista una declaración de área de restricción previa.
La cuantía del derecho no queda condicionada al concepto de derechos provisionales que establece el art. 66; sino que se relaciona con los volúmenes que el sistema es capaz de infiltrar al acuífero; en forma similar a un derecho de aguas subterráneas el derecho se define en términos de caudal y volumen a extraer, el cual por lo general es variable año a año.
Tampoco podrán dejarse sin efecto en el sentido de lo establecido en la primera parte del artículo 66; estos derechos se mantienen en la medida que los volúmenes o cuantía de la recarga los sustenten. Por esta misma razón estos derechos no tienen la posibilidad de transformarse en definitivos.
Tampoco es posible otorgarlos en zona de prohibición, la ley no hace la distinción específica por lo que aplica a todo tipo de derechos¹⁵.

- **Sujeción a condicionamientos**
El art. 66 establece expresamente que los derechos provisionales otorgados a partir de una declaración de área de restricción pueden dejarse sin efecto.
Sin embargo en el caso de otorgarse este tipo de derechos dentro de un área de restricción, estos no quedan supeditados a quedar sin efecto por la no sostenibilidad del acuífero; por cuanto su sustento proviene de volúmenes adicionales producidos artificialmente.
No obstante lo anterior parece razonable que deba integrar la comunidad de aguas subterráneas. No se hace exclusión expresa al respecto¹⁶.
En otro orden de ideas, los derechos provisionales derivados de recarga artificial quedan sujetos a la aplicación de reducción temporal del ejercicio¹⁷. En primer

¹⁵ Art. 63. La Dirección General de Aguas podrá declarar zonas de prohibición para nuevas explotaciones, mediante resolución fundada en la protección de acuífero, la cual se publicará en el Diario Oficial. La declaración de una zona de prohibición dará origen a una comunidad de aguas formada por todos Art. 1º N° 6 los usuarios de aguas subterráneas comprendidos en ella.
Las zonas que correspondan a acuíferos que alimenten vegas y los llamados bofedales de las Regiones de Tarapacá y de Antofagasta se entenderán prohibidas para mayores extracciones que las autorizadas, así como para nuevas explotaciones, sin necesidad de declaración expresa. La Dirección General de Aguas deberá previamente identificar y delimitar dichas zonas. Sin perjuicio de lo dispuesto en el inciso anterior, la Dirección General de Aguas podrá alzar la prohibición de explotar, de acuerdo con el procedimiento indicado en el artículo siguiente.

¹⁶ Art. 65. Serán áreas de restricción aquellos sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en los que exista el riesgo de grave disminución de un determinado acuífero, con el consiguiente perjuicio de derechos de terceros ya establecidos en él.
Cuando los antecedentes sobre la explotación del acuífero demuestren la conveniencia de declarar área de restricción de conformidad con lo dispuesto en el inciso anterior, la Dirección General de Aguas deberá así decretarlo. Esta medida también podrá ser declarada a petición de cualquier usuario del respectivo sector, si concurren las circunstancias que lo ameriten.
Será aplicable al área de restricción lo dispuesto en el artículo precedente.
La declaración de un área de restricción dará origen a una comunidad de aguas formada por todos los usuarios de aguas subterráneas comprendidas en ella

¹⁷ Art. 62. Si la explotación de aguas subterráneas por algunos usuarios ocasionare perjuicios a los otros titulares de derechos, la Dirección General de Aguas, a petición de uno o más afectados, podrá establecer la reducción temporal del ejercicio de los derechos de aprovechamiento, a prorrata de ellos.
Esta medida quedará sin efecto cuando los solicitantes reconsideren su petición o cuando a juicio de dicha Dirección hubieren cesado las causas que la originaron.

lugar, por cuanto estos derechos pueden ser otorgados fuera de un área de restricción; es decir, no existe la condición previa de declaración de área de restricción.

Lo anterior parece lógico ya que, como se mencionó, el derecho está sustentado en el volumen adicional artificialmente infiltrado y no en las condiciones naturales y propias del acuífero. Al respecto puede ocurrir que haya efectos no deseados o imprevistos, por razones técnicas o de operación, que sin necesidad de dejar sin efecto el derecho lo limiten y ajusten a condiciones imperantes.

Uno de los casos puede provenir de condicionantes sobre aguas superficiales; en efecto, a pesar de que los derechos subterráneos no están sujetos a la aplicación de las disposiciones establecidas en el art 314, referidas a redistribución de caudales cuando se declara escasez; si quedan afectados los caudales de recarga por lo que los volúmenes esperables cambian por esta razón y pueden inducir un efecto no previsto en el acuífero no imputable al diseño del sistema.

3.2. Disposiciones Relativas a Medio Ambiente

3.2.1. Ley de Bases de Medio Ambiente

La ley establece que todo proyecto o actividad comprendidos en el artículo 10 deberá presentar una Declaración de Impacto Ambiental o elaborar un Estudio de Impacto Ambiental, según corresponda. Aquéllos no comprendidos en dicho artículo podrán acogerse voluntariamente al sistema.

El artículo 10 referido no incluye en forma explícita proyectos de recarga artificial de acuíferos; por lo que como actividad no queda sujeto a ingreso obligatorio al sistema de evaluación.

Sin embargo, en los casos en que se ubique en zonas protegidas, que identifica la letra p, del citado art. 10; procede su ingreso a evaluación.

Asimismo requiere de ingreso a evaluación, de acuerdo con lo señalado en la letra a del mismo artículo, aquellas obras que quedan comprendidas dentro lo establecido por el art. 294 del Código de Aguas. También caben aquellas obras que impliquen alteración significativa de cuerpos o cursos naturales de aguas; esto último podría aplicar a aquellas alternativas que implican intervención en el cauce de un río o estero; tales como serpenteos, barreras, diques (superficiales, subsuperficiales o profundos) dependiendo de la magnitud de la obra en relación con el cauce.

La exigencia de elaborar un estudio de impacto ambiental, acorde a lo establecido en el art. 11, no es posible establecerlo a priori ya que depende de la magnitud de la obra en relación con los recursos o factores ambientales donde se emplaza. Por lo que es de importancia una evaluación adecuada al respecto.

3.2.2. Reglamento de la Ley de Bases de Medio Ambiente

El Reglamento precisa lo indicado en el art. 10, indicando para los casos identificados la cuantía o dimensiones de las obras o acciones que requieren de ingreso al sistema de evaluación.

Es el caso de las obras referidas a la letra a) del artículo 10; el Reglamento en la letra a.4¹⁸ precisa los volúmenes de material movilizado a partir de los cuales se requiere evaluación ambiental. Se indica además el alcance de defensa o alteración de un curso de agua.

Por otra parte, el reglamento precisa lo referido a la letra o "proyectos de saneamiento ambiental"; que en su definición genérica incluye "Proyectos de saneamiento ambiental, tales como sistemas de alcantarillado y agua potable, plantas de tratamiento de agua o de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios, emisarios submarinos, sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos"

Pero al momento de detallar establece en literal O.7 sistemas de tratamiento o disposición cuyos efluentes tratados se usen para el riego o se infiltren¹⁹; este caso aplica a la infiltración de aguas servidas tratadas u otros riles tratados.

3.2.3. Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas

El Decreto Supremo Nº 46 de 2003 (DS 46) determina las concentraciones máximas de contaminantes permitidas en los residuos líquidos que son descargados por una fuente emisora (establecimiento industrial), a través del suelo, a las zonas saturadas de los acuíferos, mediante obras destinadas a infiltrarlo.

El decreto establece en su tabla los valores característicos para una fuente emisora²⁰, aquellas con valores menores a esto quedan exentas de los requisitos que impone el DS 46.

¹⁸ a.4. Defensa o alteración de un cuerpo o curso de aguas terrestres, tal que se movilice una cantidad igual o superior a cincuenta mil metros cúbicos de material (50.000 m³), tratándose de las regiones I a IV, o cien mil metros cúbicos (100.000 m³), tratándose de las regiones V a XII, incluida la Región Metropolitana. Se entenderá por defensa o alteración aquellas obras de regularización o protección de las riberas de éstos cuerpos o cursos, o actividades que impliquen un cambio de trazado de su cauce, o la modificación artificial de su sección transversal, todas de modo permanente.

¹⁹ O.7 Sistemas de tratamiento y/o disposición de residuos industriales líquidos, que contemplen dentro de sus instalaciones lagunas de estabilización, o cuyos efluentes tratados se usen para el riego o se infiltren en el terreno, o que den servicio de tratamiento a residuos provenientes de terceros, o que traten efluentes con una carga contaminante media diaria igual o superior al equivalente a las aguas servidas de una población de cien (100) personas, en uno o más de los parámetros señalados en la respectiva norma de descargas líquidas

²⁰ Fuente emisora: Establecimiento que descarga sus residuos líquidos por medio de obras de infiltración tales como zanjas, drenes, lagunas, pozos de infiltración, u otra obra destinada a infiltrar dichos residuos a través de la zona no saturada del acuífero, como resultado de su proceso, actividad o servicio, con una carga

La norma fija límites máximos de emisión en términos totales, para los acuíferos con vulnerabilidad calificada como media (tabla 1) o baja (tabla 2).

La norma establece que si el contenido natural de la zona saturada del acuífero excede al límite máximo permitido en este decreto, el límite máximo de la descarga será igual a dicho contenido natural.

También especifica que no se podrá emitir directamente a la zona saturada del acuífero, salvo que la emisión sea de igual o mejor calidad que la del contenido natural.

Si la vulnerabilidad del acuífero es calificada como alta, sólo se podrá disponer residuos líquidos mediante infiltración, cuando la emisión sea de igual o mejor calidad que la del contenido natural del acuífero.

Estas disposiciones aplican al caso de recarga de aguas derivadas de tratamiento, sin perjuicio de las disposiciones aplicables al caso, enumeradas previamente.

contaminante media diaria superior en uno o más para los parámetros indicados en la tabla denominada ESTABLECIMIENTO EMISOR

4. ESTUDIOS Y EXPERIENCIAS DE RECARGA ARTIFICIAL EN CHILE

En Chile los estudios, planes piloto y experiencias en general de recarga artificial de acuíferos en el ámbito público son muy limitadas. En los últimos años han sido la DGA, CNR, DOH, entre otras entidades, las que han llevado adelante unas pocas iniciativas. A continuación se presentan una recopilación de estas iniciativas desarrolladas por las entidades señaladas.

4.1. DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS (DGA)

4.1.1. Investigación Recarga Artificial Acuíferos Cuencas del Río Choapa y Quilimarí, Región de Coquimbo, SIT N° 292; DEP-DGA, AC Ingenieros Consultores Ltda.; 2012.

Hasta ahora, la única iniciativa formal impulsada por la DGA ha sido el estudio licitado durante 2012, llamado "Investigación Recarga Artificial Acuíferos Cuencas del Río Choapa y Quilimarí, Región de Coquimbo" (SIT N° 292), cuyo desarrollo fue llevado a cabo por AC Ingenieros Consultores Ltda.

El objetivo principal del trabajo fue la identificación de zonas de infiltración relevantes de los acuíferos de las cuencas del Choapa y Quilimarí para la implementación de obras de recarga artificial en el cauce principal o en otros sectores que se proponga.

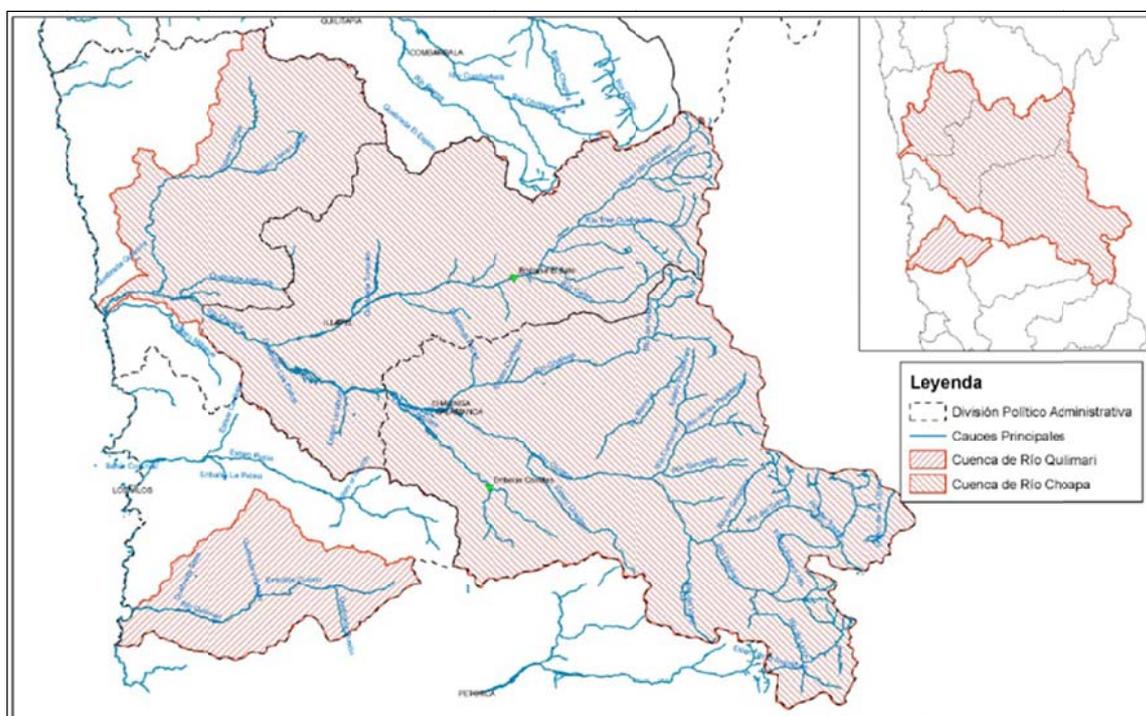


Figura 1: Área de estudio

En términos generales, el informe incluye los temas que han sido desarrollados para concretar el trabajo, los que principalmente son: Recopilación y análisis de antecedentes, levantamiento de información complementaria, antecedentes técnicos y legales respecto a la recarga artificial de acuíferos, caracterización hidrogeológica y modelación de los flujos subterráneos en el área de estudio, identificación de sectores con potencial para recarga artificial, análisis y evaluación de alternativas de recarga artificial y propuesta de un proyecto piloto.

En cuanto al análisis de antecedentes, se desarrolló un proceso de recopilación y análisis de información contenida en estudios realizados previamente en el área de estudio; la información recabada corresponde principalmente a antecedentes hidrológicos e hidrogeológicos. En forma complementaria, se incluyó una breve recopilación de literatura técnica relacionada con el tema de la recarga artificial de acuíferos.

Luego de ello, se realizó un proceso de revisión de imágenes satelitales (Google Earth) que permitió definir preliminarmente una serie de sectores que aparecían geomorfológicamente como favorables para recarga artificial. Posteriormente, se realizó un recorrido de las cuencas, para identificar nuevos sectores y para verificar las características y validar o desechar los sectores definidos preliminarmente. El total de sitios identificados fue de 13, 6 en la cuenca del río Choapa y 7 en la cuenca del río Quilimarí.

Se realizó en terreno un levantamiento de información complementaria que consideró las siguientes actividades:

- Catastro de captaciones de aguas subterráneas con el objetivo de generar información de niveles freáticos, específicamente en los sectores que se ubican aguas abajo de los embalses de riego en las cuencas de Choapa (222 captaciones con niveles estáticos entre 0 y 5 m) y Quilimarí (93 captaciones con niveles estáticos entre 1 y 18 m).
- Prospecciones geofísicas en el área de estudio, tendiente a definir la profundidad de la roca, los niveles de napa y las características de los rellenos.
- Análisis de calidad de aguas superficiales y subterráneas, para caracterizar la calidad de las aguas potencialmente infiltrables y de las aguas receptoras de la recarga. Las muestras fueron analizadas considerando los parámetros de la norma de riego (NCh. 1333) y cumplieron en su totalidad con ella.

Además, para complementar la información existente se realizó una caracterización hidrológica y una caracterización hidrogeológica general del área de estudio.

Se incluye también un capítulo con un análisis de antecedentes técnicos (objetivos, condiciones y ventajas de la recarga artificial; requerimientos de información; métodos o dispositivos de recarga) y aspectos legales (disposiciones del Código de Aguas; Reglamento de aguas subterráneas; consideraciones relacionadas con el otorgamiento

y el ejercicio; disposiciones relativas a medio ambiente) de la recarga artificial de acuíferos.

A partir de la caracterización hidrogeológica general del área de estudio, se realizó una caracterización hidrogeológica detallada considerando información geológica regional e información de terreno, específicamente información obtenida a partir de las prospecciones geofísicas, la excavación de 15 pozos someros en los sectores seleccionados preliminarmente como favorables para la recarga donde además se realizaron pruebas de infiltración y con la interpretación de pruebas de bombeo de los pozos de agua potable existentes en la zona.

Luego, se generó y aplicó una metodología para priorizar las zonas acuíferas de cada cuenca en estudio. Para ello se desarrolló un modelo hidrogeológico de flujo, cuyo principal objetivo fue determinar cómo varía el estado del sistema, incorporando entradas de flujo, correspondientes a infiltraciones inducidas artificialmente. Se estudió la capacidad de la napa para recibir y conducir la recarga artificial. Además, se analizó la red de drenaje superficial y cuantificó la disponibilidad hídrica superficial que permitiría abastecer a los proyectos de recarga artificial. Así, se logró priorizar las zonas acuíferas de cada cuenca.

Teniendo las zonas acuíferas priorizadas en cada cuenca por una parte (condición hidrológica) y los sitios identificados preliminarmente por otra (condición geomorfológica), se cruzó esta información para tener los sitios identificados ordenados de acuerdo a la priorización resultado de la modelación. En resumen se tiene que en el caso de la cuenca del río Choapa, los sectores con mayor potencialidad para recarga artificial en orden de precedencia, son los siguientes: CH-4, Río Choapa (Panguecillo); CH-3, Río Chalinga; y CH-5, Estero Camisas. En el caso del río Quilimarí, la evaluación de la disponibilidad hidrológica y del comportamiento de los acuíferos frente a la recarga permitió priorizar los sectores identificados previamente, determinándose el siguiente orden de precedencia para ellos: Q-5, Guangualí, Q-6, Aguas abajo de Guangualí y Q-7, Quilimarí.



Figura 2: Sitios con mayor potencial para recarga, cuenca Río Choapa

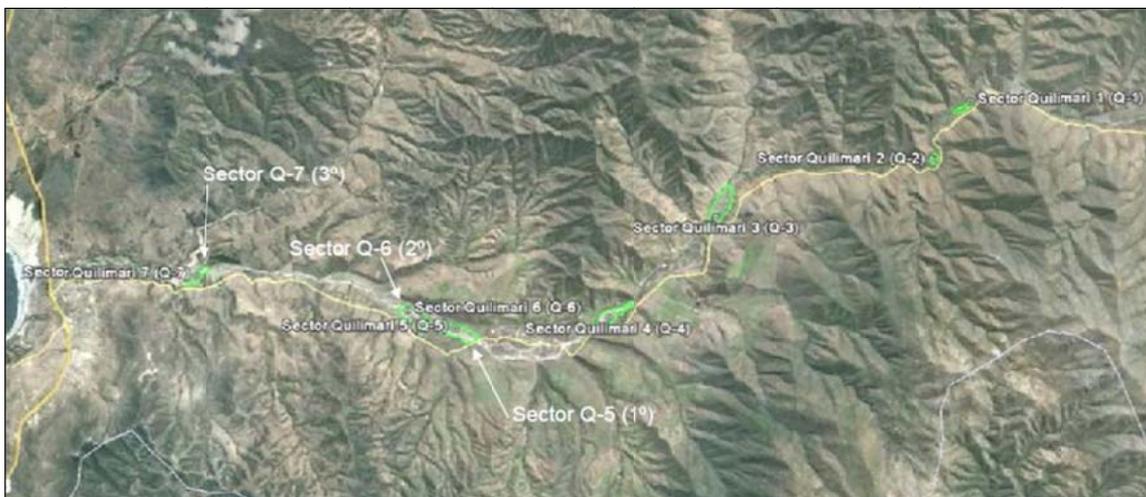


Figura 3: Sitios con mayor potencial para recarga, cuenca Río Quilimarí

Luego, se realizó una evaluación técnico-económica de las alternativas seleccionadas. Esta evaluación solo se realizó para los sectores CH-4 (Panguecillo) y CH-3 (Chalinga) ya que son los únicos sectores con disponibilidad de recursos para recargar, de acuerdo a los análisis realizados. También, se determinó que lo más favorable para las características de la zona son los métodos de recarga superficial: Balsas o piscinas de infiltración para el sector CH-4 y Zanjas de Infiltración para el sector CH-3. Al observar

los resultados de las evaluaciones económicas efectuadas se puede concluir que los proyectos no son rentables, ni siquiera desde el punto de vista social.

Finalmente, de los resultados del estudio se puede destacar que:

- En la cuenca del río Choapa se identificaron tres sectores con el mayor potencial de hidrogeológico para efectuar la recarga del acuífero y a partir del estudio se estableció que existen disponibilidad de agua suficiente para abastecer un proyectos de recarga. Sin embargo, la condición de las napas da cuenta de niveles de agua subterránea muy cercanos a la superficie del terreno, entre 1 y 5 m, lo que significaría que en este momento no sería necesario recargar las napas e incluso dicha condición de niveles representa una limitación para dicho proceso. Aun así, las condiciones hidrogeológicas observadas en algunos sectores permitirían tener perspectivas de elaborar proyectos rentables, pues los caudales disponibles permitirían obtener beneficios tangibles del proceso de recarga, pero al realizar una evaluación técnico-económica de proyectos en los lugares identificados, se obtuvieron en ambos casos indicadores de rentabilidad, privada y social, negativos.
- Por otro lado, en la cuenca del río Quilimarí también se identificaron tres sectores con potencial de hidrogeológico para efectuar la recarga del acuífero y en las visitas a terreno se comprobó que la recarga artificial de acuíferos aparece como necesaria. Pero en el estudio se comprobó que no se tienen condiciones hidrogeológicas favorables para ello (ya que el acuífero no es una unidad continua sino que corresponde a pequeños subsistemas independientes producto de los angostamientos y afloramientos rocosos que se observa a lo largo del valle) y se tiene que la disponibilidad de agua superficial para utilizarla en la recarga es prácticamente nula. Actualmente, los escasos recursos disponibles se usan principalmente en riego, lo que dificulta buscar recursos para recarga que actualmente estén destinados a otros usos.

A pesar de los resultados obtenidos, según lo planteado en los objetivos del estudio, se desarrollaron las Especificaciones Técnicas para la implementación de un proyecto piloto, el que de acuerdo a los resultados obtenidos, debiera ubicarse en el sector Panguecillo del río Choapa y estar constituidas por una piscina de infiltración más sus obras anexas.

4.1.2. Iniciativas en estudio

A la fecha de redacción de este informe, la DGA no tiene iniciativas o estudios de recarga artificial en marcha.

Sin embargo, desde diciembre de 2012 existe un protocolo firmado entre Aguas Andinas S.A., Sociedad Canal del Maipo, la DGA y el Ministerio de Obras Públicas donde los involucrados manifiestan su interés en desarrollar estudios y mediciones

respecto a temáticas propias del quehacer científico-técnico relacionado con los recursos hídricos, entre los que se cuentan:

- a) Modelación hidrogeológica en la cuenca de Santiago con énfasis en la infiltración y recarga artificial de acuíferos.
- b) Monitoreo, seguimiento, control y evaluación de experiencias pilotos existentes sobre infiltración y recarga artificial de acuíferos, con miras a generar conocimiento para la aplicación de la normativa existente sobre la materia y a la mejora de la misma cuando así se justifique por las iniciativas realizadas.
- c) Ruta de nieve y modelación en periodo de deshielo con miras a obtener un mejor pronóstico de la escorrentía superficial en dicho periodo en la cuenca de Santiago.
- d) Disponibilidad (oferta-demanda) de recursos hídricos en la cuenca de Santiago que permita conocer su dinámica desde la perspectiva de sus solicitudes antrópicas y ambientales.

En este protocolo se considera trabajar en el tema de recarga artificial de acuíferos, pero actualmente se está trabajando sobre el punto a), lo que considera un diagnóstico de los modelos disponibles para la cuenca de Santiago y a partir de ello se continuará con la etapa de actualización de la modelación propiamente tal, en un plazo no menor a un año. Respecto a los otros puntos aún no hay definidas actividades o un programa de trabajo.

4.2.COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO (CNR)

4.2.1. Mejoramiento del Sistema de Aguas Subterráneas para su utilización en Riego en la cuenca del Río Copiapó; CNR, Jorquera y Asociados S.A.; Noviembre 2012.

Durante 2011, la CNR licitó este estudio cuyo objetivo general fue analizar alternativas a nivel de prefactibilidad, de obras de infiltración del agua subterránea para su uso en riego, proponiendo obras que permitan la utilización óptima de los recursos superficial y subterráneo a través de recarga y del embalsamiento natural o artificial en el acuífero.

En la Figura 4 se presenta el área de estudio y la sectorización adoptada como referencia para el estudio.

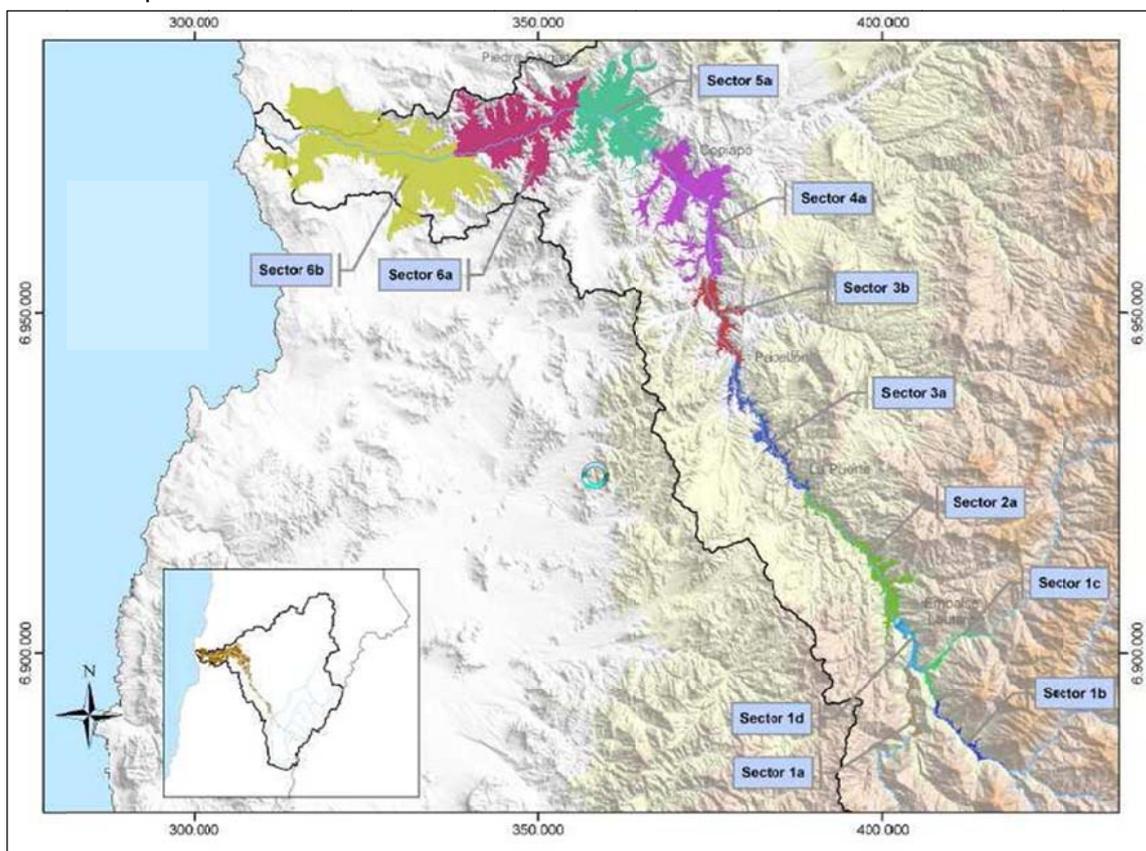


Figura 4: Área de estudio y sectores acuíferos del valle del río Copiapó

El recopiló y analizó toda la información disponible sobre el uso del suelo agrícola por sector hidrogeológico. Se llega a un total de 10.139 ha regada en la temporada 2010-2011. La encuesta realizada por el consultor en noviembre 2012 en el sector hidrogeológico 5 acusa una tendencia a la baja en la superficie regada para uso agrícola.

Se realizó un análisis para la recarga y se determinó que hay 3 elementos principales en el análisis del acuífero que inciden en la factibilidad de realizar recarga artificial:

- i. Que exista un espacio no saturado bajo el nivel estático máximo histórico y que existan las condiciones hidrogeológicas para infiltrar.
- ii. Que exista disponibilidad del recurso de agua superficial para infiltrar.
- iii. Que se disponga o pueda disponer de superficie para el emplazamiento de las obras.

Revisando la condición primera condición (i) se tiene lo siguiente:

Hay sectores acuíferos en que se han producido descensos de niveles según datos del modelo subterráneo desarrollado por SERNAGEOMIN y que se utiliza y opera como referencia general:

- Sector 1 entre 15 y 50 metros en Iglesia Colorada y Manflas respectivamente con datos de 2010 y 2009 respectivamente.
- Sector 2 entre 10 y 20 metros en pozos en Fundo San Antonio y Goyo Diaz respectivamente hasta 2009 y 2010 respectivamente.
- Sector 3 entre 30 y 35 metros entre Quebrada Cerrillos y Nantoco, con datos hasta 2006 y 2010.
- Sector 4 entre 20 y 80 metros según datos no oficiales hasta 2012.
- Sector 5 hasta 30 metros según datos hasta 2009, en Valle Dorado.
- Sector 6 hasta 5 metros en sector Hacienda Margarita.

Del análisis se tiene como resultado es que hay un espacio no saturado que puede recibir la recarga de agua superficial disponible en las crecidas.

Revisando la segunda condición (ii) se tiene lo siguiente:

Recarga Natural

De acuerdo al SERNAGEOMIN, los sectores 1 y 2 reciben recarga periódicamente, cada 4 ó 5 años rellenan sus acuíferos. Frente a un año de elevada escorrentía en el río Copiapó, la recarga natural será suficiente para producir el llenado del acuífero, sin necesidad de recurrir a un proceso de recarga artificial. En el sector 3 se prevé que para una crecida elevada (equivalente a la de los años 1983 a 1988), los niveles estáticos subirán por encima de su máximo histórico (considerando el registro de 1960-1988). Este sector también se beneficia de las infiltraciones en los sectores 1 y 2, al aumentar el caudal de salida por las vertientes aguas arriba de La Puerta. El sector 4, recarga por percolación de canales, riego de los sectores aguas arriba e infiltración del río. Los sectores 5 y 6 solo recargan a través de infiltración de las aguas del río.

Infiltración Total		
Sector	Caudal (l/s)	Caudal (Mm3/año)
1 Arriba Embalse Lautaro	1076	33.92
2 Embalse Lautaro - La Puerta	166	5.23
3 La Puerta - Mal Paso	1039	32.78
4 Mal Paso - Copiapó	683	21.54
5 Copiapó - Piedra Colgada	185	5.84
6 Piedra Colgada - Angostura	120	3.79

Tabla 1: Recargas Anual Promedio por Sector en Modelo Copiapó (1993-2006)

Estos valores, corresponden a la sumatoria de los tres factores de recarga que provienen de: la percolación en canales, la recarga por riego, e infiltración de las aguas del río Copiapó para cada uno de los 6 sectores acuíferos.

Disponibilidad para Infiltrar por Recarga Artificial

Se desarrolló una serie de volúmenes mensuales disponibles para infiltración artificial para todos los años con la estadística disponibles. Dicha serie de volúmenes se resumió en un gráfico de volúmenes mensuales posibles de infiltrar y que corresponden a los volúmenes excedentes de la estación Mal Paso que se encuentran disponibles para ser infiltrados, tanto natural como artificialmente. Estos volúmenes se obtienen a partir de la estadística de escurrimientos de la estación Mal Paso aguas arriba de la bocatoma descontada la demanda de este correspondiente a los 2m³/s a nivel mensual

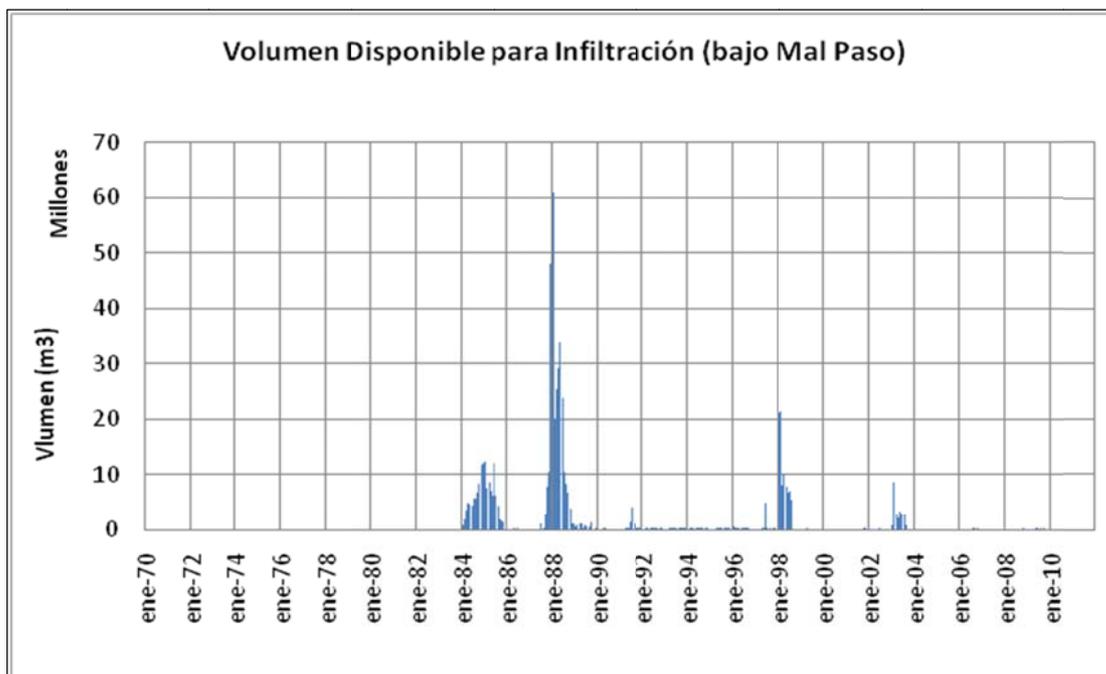


Gráfico 1: Volúmenes Mensuales Disponibles de Infiltrar

Una vez obtenidos los caudales o volúmenes excedentes posibles de infiltrar para el río Copiapó, de acuerdo a las zonas a definir como potenciales lugares de infiltración, se debe estimar la superficie necesaria para infiltrar dichos caudales de acuerdo a las características hidrogeológicas del sector. Preliminarmente y para una primera aproximación de las superficies requeridas, se utilizó el mínimo valor de permeabilidad considerado para la zona en el Estudio SIT N° 211²¹, el cual plantea valores de permeabilidad obtenidos de la calibración del orden de 3 a 35 m/d, además de existir antecedentes que hablan entre 4 a 180 m/d, pero se ha optado conservadoramente por un valor de 1 m/d.

De acuerdo a ese valor de permeabilidad, para los momentos de mayores caudales medios mensual en el río se ha obtenido una superficie de infiltración necesaria del orden de las 150 ha. Esta superficie puede distribuirse espacialmente a lo largo del lecho del río en los sectores de interés, es decir los sectores 4 y 5, si se considera que el sector entre Mal Paso y Angostura constituye una zona de infiltración natural importante en aquellos períodos en que el río conduce una caudal superior a la capacidad de porteo del canal Mal Paso de 2 m³/s, dejando pasar el excedente, el cual se infiltra parcialmente en dicha zona.

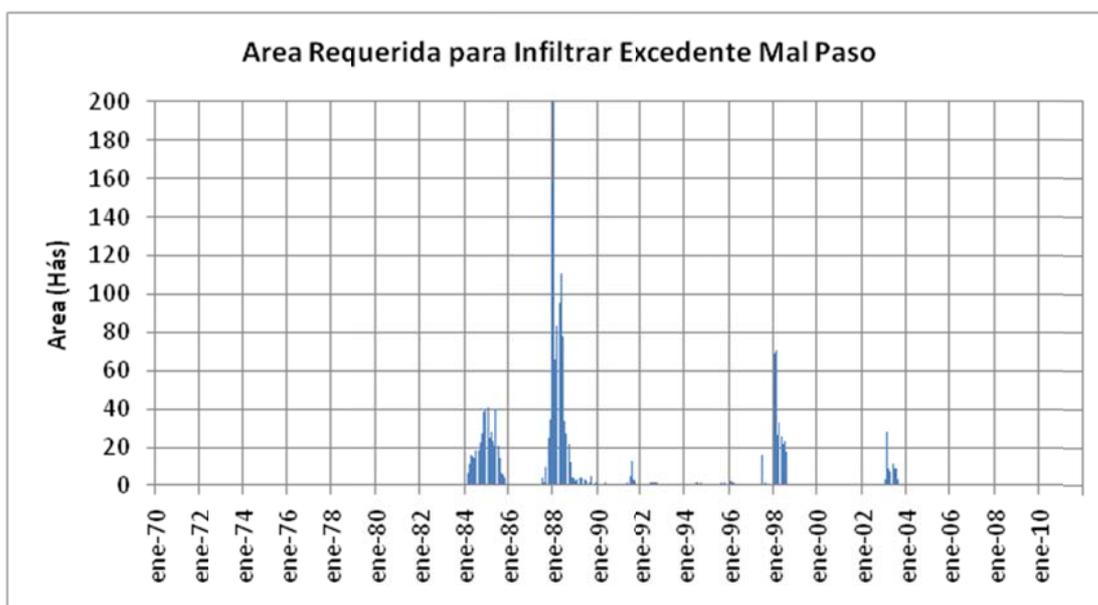


Gráfico 2: Área Requerida para Infiltrar

Revisando la segunda condición (iii) se tiene lo siguiente:

Se hizo un completo análisis de los métodos de recarga posibles en la cuenca del río Copiapó. Después de un análisis preliminar de todos los métodos conocidos, considerando las características de los sectores en estudio, se seleccionó los siguientes para hacer diseños preliminares y compararlos:

²¹ Análisis integrado de gestión en cuenca del río Copiapó; DGA, DICTUC; 2010.

- Infiltración por lagunas en el cauce del río
- Infiltración por lagunas laterales al cauce del río
- Infiltración por pozos

Del análisis de costos, condiciones hidrogeológicas y factibilidad de ubicación física de las obras se estimó que las lagunas en el cauce del río eran las más adecuadas. En el Tomo I del Informe Final se consigna los diseños preliminares y los cuadros de comparación de costos.

Selección y recomendaciones sobre los métodos de infiltración: En función de las características hidrogeológicas de los sectores, el comportamiento de la recarga y las superficies disponibles, se recomendó:

- En el sector de los ríos Manflas, Jorquera y Pulido, efectuar escarificaciones del río para aumentar su recarga natural.
- Entre La Puerta y Mal Paso, se recomienda escarificación del río y perfilaje de su cauce.
- Entre Mal Paso y Copiapó se recomienda lagunas de infiltración, en los sectores de Tierra Amarilla y Punta Negra,
- Entre Copiapó y Piedra Colgada, En el sector de Toledo se recomienda hacer lagunas de infiltración.
- Entre Piedra Colgada y Angostura, se recomienda una escarificación del lecho del río entre Piedra Colgada y Hacienda Margarita.

Luego, se realizó una completa evaluación de alternativas de recarga artificial siguiendo los siguientes pasos:

i. Definición de alternativas

Las lagunas fueron proyectadas en el lecho del río en los sectores acuíferos 4 y 5, debido a que son los sectores que presentan las mayores depresiones (disponibilidad de espacio no saturado), buenas condiciones hidrogeológicas para efectuar la infiltración, y la existencia de lugares adecuados para la construcción de las obras. El lecho del río es el lugar que presenta las mejores características de conductividad hidráulica así como espacio suficiente para la implementación de dicha solución.

El Sector 3, que también cuenta con condiciones hidrogeológicas favorables para la recarga artificial, es un tramo del valle angosto y de un desarrollo agrícola importante, con un ancho medio del cauce de aprox. 40 metros, por lo que no presenta extensiones de terreno suficiente para desarrollar obras de estas características, lo que significaría expropiar y disminuir el área productiva, con un costo mayor por expropiaciones.

Por lo tanto se han propuesto dos zonas de infiltración en el sector 4 y una en el sector 5.

ii. Evaluación ambiental de las alternativas

Esto se resume en la siguiente tabla.

COMPONENTE	SECTOR 3	SECTOR 4	SECTOR 5
Biota Acuática	Sólo se tienen referencias bibliográficas de presencia de especies vulnerables en los sectores 3-A y 3-B	No se presenta curso de agua natural	
Vegetación Terrestre	Sector 3-B: Extendida distribución de formaciones xerofíticas, especialmente formaciones de alta valor ecológico	Sector 4-A: Extendida distribución de formaciones xerofíticas, especialmente formaciones de alta valor ecológico	
Fauna Terrestre	No se evidenciaron especies en categorías de conservación	No se evidenciaron especies en categorías de conservación	En el sector 5-B se encontraron especies endémicas de poblaciones reducidas (<i>Philodryas chamissonis</i> , <i>Liolaemus atacamensis</i> y <i>Liolaemus platei</i>)
Asentamientos Humanos y población	En el sector 3-A, la población solo se vería afectada por el movimiento de maquinaria durante la etapa de construcción	No se contempla población afectada	No se contempla población afectada
Arqueología	En los sectores de estudio no se estima alteración en el componente arqueológico debido a que no se evidenciaron hallazgos		

Tabla 2: Evaluación ambiental de alternativas

iii. Modelación de las alternativas

Se consideraron tres alternativas de modelación, que se presentan a continuación.

- Alternativa 1 (Escenario 1): Sector 4: recarga a través de lagunas de infiltración
- Alternativa 2 (Escenario 2): Sector 5: recarga a través de lagunas de infiltración
- Alternativa 3 (Escenario 3): Sector 4: recarga a través de lagunas de infiltración
Sector 5: recarga a través de lagunas de infiltración

Para esto se tuvo las siguientes consideraciones:

- La modelación se llevó a cabo a partir de modelo hidrogeológico desarrollado por SERNAGEOMIN en la plataforma Visual Modflow.
- La modelación de las obras se trabaja con un periodo de tiempo total más corto que el utilizado por el modelo original utilizando de los años 1993 al

2020, donde el periodo de interés y análisis se concentra de 2011 al 2020, periodo en que se simula la recarga artificial equivalente al periodo 1980-1988 periodo que no incluye el modelo original.

- En la evaluación económica y social se considera adicionalmente un escenario de una mayor escasez hídrica.

iv. Alternativa seleccionada por la modelación

De los escenarios analizados se desprende que la mejor alternativa de obras corresponde al Escenario 3, en cuyo caso los recursos disponibles para recarga artificial se distribuyen entre el sector 4 y 5. Esto porque de un análisis conjunto de la variación del almacenamiento de todos los sectores de interés es el que presenta un mejor balance con -26 millones de m³, presentando un beneficio conjunto del acuífero con una mayor área beneficiada y no limitado a un solo sector. Sin embargo todas las opciones, considerando las limitaciones del modelo, a saber, están dentro de la envolvente de las opciones compatibles con el modelo considerando las limitaciones estructurales y de datos de entrada. El modelo considera un análisis y procesamiento sobre la base de datos anuales, el área definida en 150 ha se obtuvo de un valor arbitrario y conservador de capacidad de infiltración de 1 m/d, y el tamaño de las celdas no es el adecuado para el análisis de infiltración.

La cantidad de 150 ha, como área de infiltración, se predefinió considerando una capacidad de infiltración de 1m/día en forma uniforme. El modelo de SERNAGEOMIN empleado, se calibró con valores de capacidades de infiltraciones mayores y diferentes en cada celda.

Luego de la selección de alternativas se realizó el diseño preliminar de ellas. Se diseñaron lagunas de infiltración en los sectores 4 y 5 elegidos. En las figuras a continuación se muestran, a escala 1:25000 las lagunas de infiltración y las áreas aledañas a las lagunas con detalles de imagen satelital.

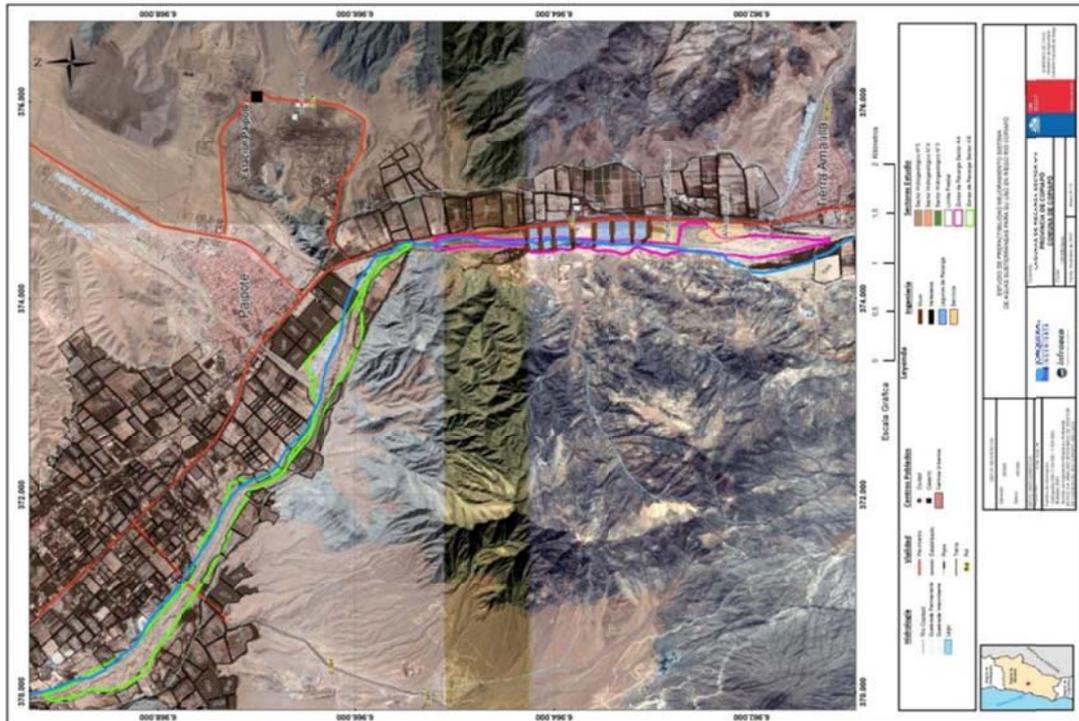


Figura 5: Lagunas de recarga, sector 4

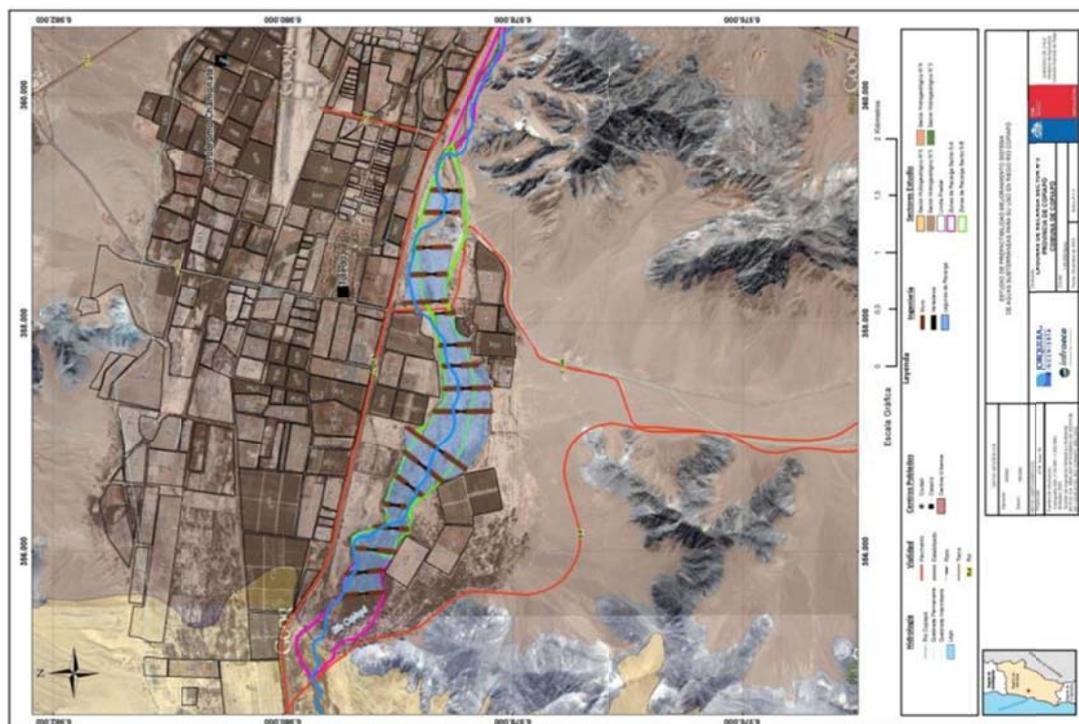


Figura 6: Lagunas de recarga, sector 5

La simulación del proceso de infiltración realizada para este proyecto, empleó los valores de capacidad de infiltración del modelo calibrado por SERNAGEOMIN, por lo

que el resultado del modelo arrojó las superficies necesarias en cada uno de los sectores de infiltración que corresponden a 23 ha en el sector 4 y 119 ha en el sector 5. Estas superficies satisfacen las salidas del proceso de simulación del modelo de SERNAGEOMIN.

En cualquier caso, la superficie final que se necesita para el proceso de infiltración se obtiene del resultado del proyecto piloto, en el que se medirá en terreno en diversos sectores la capacidad real de infiltración.

La superficie obtenida del modelo sirvió de base para el prediseño de las lagunas de infiltración. En la siguiente etapa de factibilidad será necesario tener la estimación de valores para el coeficiente de infiltración como resultado de las lagunas piloto que son imprescindibles. Además deberá contarse con un modelo que represente en mejor forma el proceso estudiado.

Si bien el modelo cumple con el objetivo de análisis del fenómeno de recarga artificial, esta herramienta cumple un rol principalmente de análisis cualitativo más que cuantitativo, dado que esta herramienta no representa fielmente el fenómeno de recarga natural en los periodos de mayor disponibilidad debido a las debilidades estructurales que este presenta y cuyas modificaciones serían objeto de una nueva modelación.

Finalmente, los principales resultados del estudio son los siguientes:

Se identificó los caudales y volúmenes de agua superficial que son susceptibles de infiltrar, estimándose en unos 430 millones de m³ disponibles cada 20 años. Volúmenes que actualmente descargan al mar en épocas de crecidas.

Se estableció los volúmenes no saturados de los acuíferos que hacen posible realizar esta recarga, y que alcanzan para los recursos disponibles para infiltrar. Asimismo se estableció que esta infiltración es posible en cuanto a las características hidrogeológicas de los acuíferos.

Se investigó los sitios posibles en que se podían construir obras para recargar y los métodos para realizar las recargas utilizando el modelo de simulación hidrogeológico preparado por SERNAGEOMIN y adaptado por el consultor. Se encontró los lugares más apropiados en razón de las demandas, de los consumos, utilización actual del suelo, baja interferencia con obras existentes, y se eligió la infiltración por lagunas en los sectores 4 y 5 como el método más conveniente.

También se investigó la viabilidad de estas obras en relación con posibles impactos ambientales negativos y medidas de mitigación de esos impactos, llegándose a la conclusión que ellos son mínimos en los sitios elegidos, existiendo impactos positivos por la recarga. Se definió una línea base, investigando las variables físicas, biológicas, sociales y de patrimonio arqueológico y patrimonial, para el seguimiento futuro de las situaciones ambientales.

Se hicieron diseños preliminares de obras para infiltrar y se establecieron sus costos. Se estudiaron los beneficios de la mayor disponibilidad del agua y se generaron índices de beneficio /costos siguiendo las normas de MIDEPLAN, índices que, en la mayoría de los casos, resultan atractivos para la inversión. Se identificaron las fórmulas posibles para el financiamiento de las obras y el marco legal para la construcción.

Los índices de inversión son mejores respecto de cualquier otro proyecto que pueda conocerse para aumentar los recursos de agua del valle de Copiapó. Cualquier otra opción para aumentar los recursos, como ser embalses superficiales, desalación, carretera del agua, está muy lejos de ser comparables con esta proposición, sin que estos últimos sean descartables.

Además se entregan antecedentes y se hacen recomendaciones de los pasos a seguir a continuación, que son los siguientes:

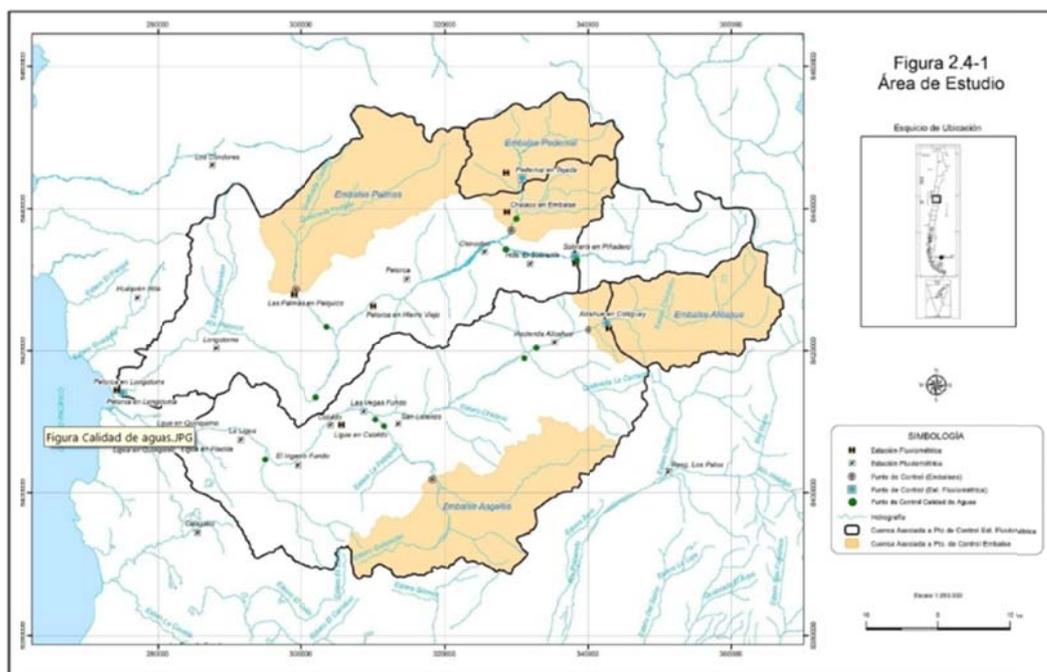
- Establecimiento de la titularidad del derecho de aprovechamiento de las aguas superficiales que durante las crecidas descargan al mar (agua disponible).
- Profundización del estudio de recurrencia de caudales más allá del análisis de las estadísticas locales, que incluyan las quebradas aportantes entre La Puerta y Piedra Colgada.
- Delimitación y manejo del cauce público (superficie disponible para obras).
- Monitoreo de niveles estáticos y caudales bombeados en los sectores hidrogeológicos en toda la cuenca (determinación actualizada del volumen de acuífero disponible).
- Realización de proyectos piloto de infiltración para precisar el coeficiente de infiltración en los sitios recomendados para construir obras y la superficie necesaria de lagunas.
- Elaboración del proyecto de la factibilidad de la recarga artificial. En este estudio de factibilidad deben proponerse los criterios de manejo conjunto de las aguas superficiales y subterráneas. Para pasar a esta etapa es necesario que estén resueltos los cinco temas anteriores.

4.2.2. Mejoramiento de Agua Subterránea para Riego Ligua y Petorca; CNR, GCF Ingenieros Ltda.; Enero 2013.

La Comisión Nacional de Riego, como organismo responsable de la planificación y de la generación de información para el desarrollo de estrategias y proyectos de inversión en riego, y atendida la necesidad de evaluar las potencialidades del sistema hídrico subterráneo de las cuencas hidrográficas de los ríos Ligua y Petorca, ha considerado de imprescindible necesidad ejecutar un estudio de prefactibilidad para el proyecto de mejoramiento de aguas subterráneas para riego del sistema hídrico de ambas cuencas.

Así, el objetivo general de este estudio fue analizar alternativas y desarrollar, a nivel de prefactibilidad, obras de recarga artificial, en las cuencas de Ligua y Petorca, para

su uso en riego, proponiendo obras que permitan la utilización óptima del recurso superficial y subterráneo.



El informe final del estudio se estructuró sobre la base de toda la información recopilada y generada durante el desarrollo del trabajo, partiendo por la recopilación y análisis de información, hasta la evaluación económica de los proyectos seleccionados y desarrollados a nivel de prefactibilidad, los que fueron resultado de un proceso de ajuste y redefinición, tanto de los diseños como de las disponibilidades de agua para recarga.

En cuanto a la recopilación de información, se buscó información disponible para las cuencas de La Ligua y Petorca, contenida en estudios realizados previamente en la zona por diversas instituciones (DGA, DOH, CNR, etc.). La información recopilada incluyó antecedentes hidrológicos, hidrogeológicos, de demandas de agua y de calidad de aguas. Se debe señalar que la mayoría de esta información se obtuvo del estudio Diagnóstico de los Recursos Subterráneos en el Sistema Hídrico Ligua y Petorca; CNR, GCF Ingenieros Ltda.; 2011.

Preliminarmente, se identificó sitios en que se podría implementar proyectos de recarga artificial, sobre las imágenes satelitales (Google Earth), áreas vecinas al lecho de los cauces (Ligua, Petorca y afluentes) donde se observase espacio disponible como para construir obras de recarga superficial de acuíferos. El total de sitios identificados fue de 19 (12 en Ligua y 7 en Petorca) y en una campaña posterior de terreno se verificó que, en general, los sectores en los lechos de los cauces elegidos presentaban suficiente amplitud para que en ellos pudieran construirse espigones o piscinas de infiltración.

Se realizó un balance hídrico preliminar para los ríos Ligua y Petorca, calculados con los datos obtenidos de los modelos hidrogeológicos y modelo integral de los ríos de estudios de referencia en el área. Los resultados constituyen una aproximación inicial, dado que más adelante se desarrollaron modelos subterráneos y superficiales integrados, que permitieron cuantificar los balances con un mayor respaldo metodológico y operacional.

Se desarrolló una caracterización hidrogeológica, a partir de los antecedentes de estudios previos y de una serie de actividades de terreno, que incluyeron: un catastro de captaciones subterráneas en ambos valles para caracterizar el uso actual de las aguas subterráneas; pruebas de bombeo para complementar la información de parámetros de los acuíferos, por sectores; y un estudio geofísico (gravimetría, TEMs) en ambos valles, para complementar la información geofísica disponible. Todo esto para determinar capacidad de infiltración y volúmenes de almacenamiento por sector. También se caracterizó la demanda y se recopiló la información de derechos de aguas subterráneas, enfocado a la implementación de un modelo de simulación hidrogeológica.

Se analizó detalladamente la situación actual del riego en ambos valles en estudio, donde se realizó una caracterización agroclimática a partir de la cual se concluyó que los parámetros agroclimáticos son óptimos para una gran gama de cultivos (adaptabilidad de los cultivos). También se revisó la situación de derechos de aguas y organizaciones de usuarios en el área de estudio, el uso actual del suelo y se determinó la demanda de agua para uso agrícola.

El estudio consideró la determinación de sectores favorables para la recarga y la selección progresiva de ellos, en función de las disponibilidades de agua, las que se fueron afinando, mediante la utilización de un modelo de simulación con celdas más pequeñas aplicado a sectores específicos. De igual modo, el tipo de obras consideradas en la primera evaluación se fue ajustando a la disponibilidad de aguas y de superficie para instalarlas, hasta llegar al diseño que finalmente se sometió a evaluación económica, consistente en piscinas de infiltración agrupadas en módulos de recarga.

Se realizó una modelación que permitió establecer las magnitudes de los caudales que estarían disponibles para ser utilizados en las obras de recarga. Se determinó los caudales para probabilidad de excedencia 85% y 50%. Los caudales asociados al 85% de probabilidad de excedencia podrían solicitarse como derechos de ejercicio permanente y discontinuo, mientras que los correspondientes a 50%, como derechos de ejercicio eventual y discontinuo. Para el caso de 85% de probabilidad de excedencia, los caudales disponibles en cada cuenca varían: entre 19 y 21 l/s para el período Julio a Agosto en Petorca y entre 33 y 203 l/s para el período Junio a Septiembre en Ligua. Es decir, estos caudales son prácticamente inexistentes en Petorca y muy reducidos en La Ligua. Para el caso de 50% de probabilidad de excedencia, los caudales disponibles en cada cuenca varían: entre 240 y 804 l/s para el período Junio a Septiembre en Petorca y entre 158 y 1357 l/s para el período Mayo a Septiembre en La Ligua.

Los recursos asociados a 85% de probabilidad de excedencia, podrían destinarse a frutales por representar una disponibilidad promedio de 5 por cada 6 años. Los recursos asociados a 50% de probabilidad de excedencia, podrían destinarse a chacras y hortalizas por representar una disponibilidad promedio de 1 por cada 2 años.

A partir de las evaluaciones de las características de cada sector y considerando las disponibilidades de aguas superficiales de invierno en cada uno de ellos se realizó la selección de alternativas a desarrollar. Se seleccionó inicialmente un total de 19 sitios favorables para la recarga (12 en La Liga y 7 en Petorca), de los que finalmente quedaron solo 4. Los proyectos fueron evaluados considerando que se dispondrá de los caudales 50% de probabilidad de excedencia.

- La Liga: A4-L3 (Sector Pililén) y A3-L6 (Sector Cabildo)
- Petorca: A1-P5 (Sector Hierro Viejo) y A2-P9 (Sector La Canela)

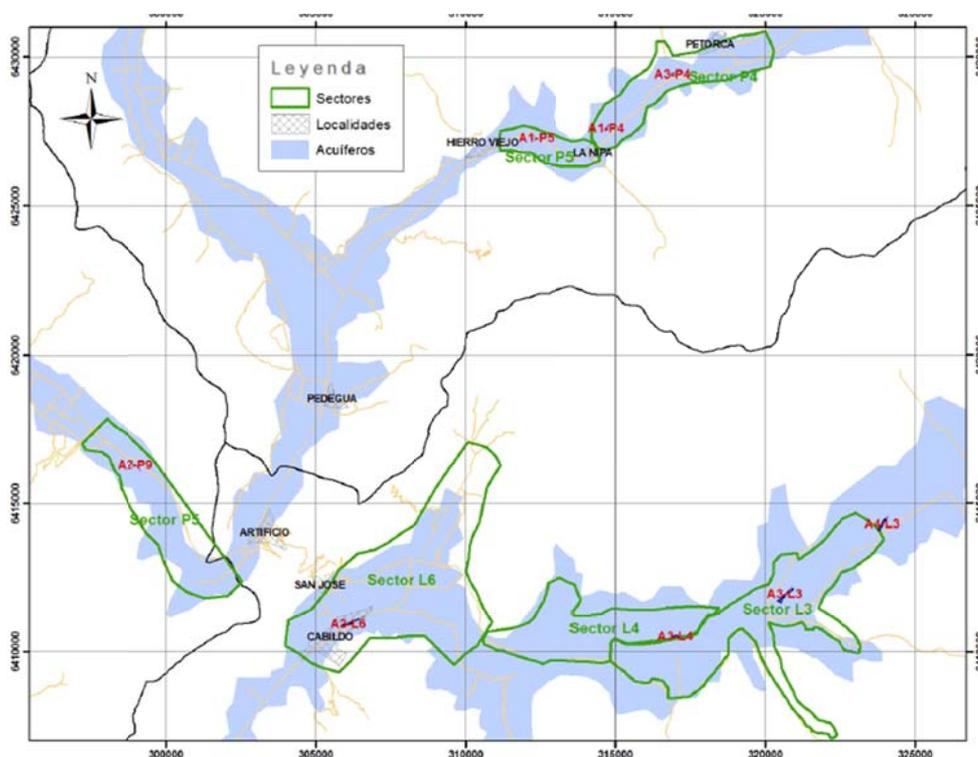


Figura 8: Ubicación general de sectores y sitios favorables para la recarga.

Se hizo un análisis ambiental y se estableció la línea base de flora y fauna terrestre en los sectores de proyecto. Se determinó también que los proyectos no tienen ninguna limitación de este tipo; aunque se recomienda su ingreso voluntario al sistema de evaluación ambiental.

Se desarrolló un estudio agronómico enfocado a las áreas de influencia de los proyectos, actualizándose la información de series de suelos y de uso de suelos. En las áreas de influencia de cada proyecto se hizo encuestas agropecuarias a la gran

mayoría de los potenciales beneficiarios, para definir la situación actual agropecuaria y la situación futura o con proyecto.

Se hizo un estudio de mercados, comercialización y precios, para establecer las condiciones de comercialización asociadas a la situación futura. Se determinó los flujos de márgenes agrícolas para cada sector, como antecedentes para la evaluación económica de los proyectos.

Se realizó el diseño a nivel de prefactibilidad de las obras de recarga, lo que incluyó: dimensionamiento, cubicación y presupuesto de las obras asociadas a cada sector y proyecto seleccionado, determinándose que el costo de implementarlos variará entre 635 y 845 millones de pesos.

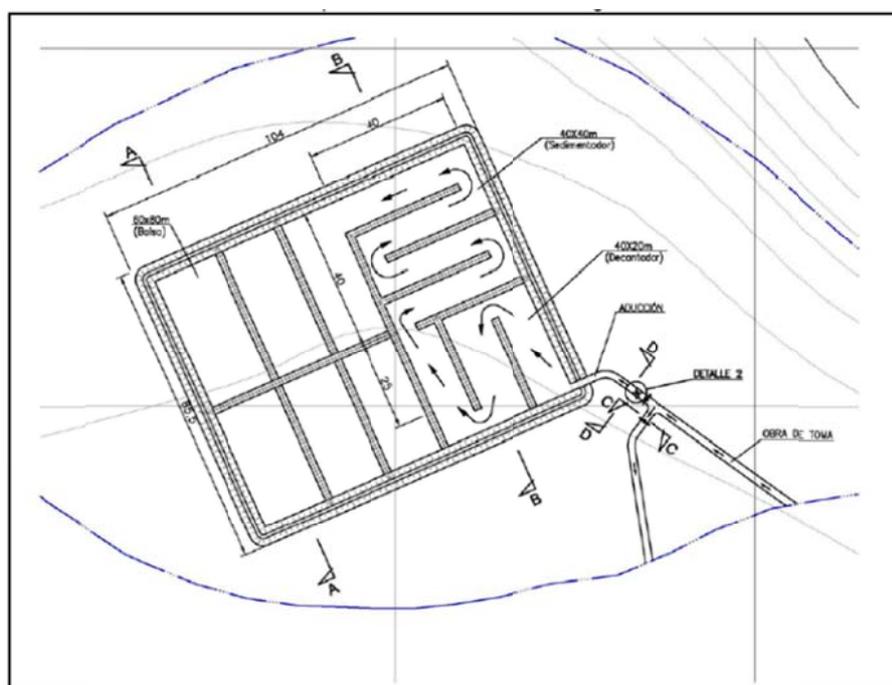


Figura 9: Esquema del Módulo de Recarga.

Se realizaron las evaluaciones económicas de los proyectos (o sectores), las que entregaron los resultados que se presentan en las Tablas siguientes.

Sector	Costo Obras	Precios de Mercado			Precios Sociales		
		VAN	TIR	IVAN	VAN	TIR	IVAN
	(Mill \$)	(Millones de \$)	(%)		(Millones de \$)	(%)	
A4-L3	844.5	741.8	19.0	0.74	3172.7	27.5	3.02
A3-L6	844.7	757.2	13.7	0.76	8872.8	18.2	8.44
A1-P5	844.4	-121.5	11.2	-0.12	2260.9	14.8	2.15
A2-P9	635.5	-226.5	10.5	-0.30	2092.5	14.7	2.65

Tabla 3: Resumen de Resultados Evaluación Económica

Sector	Superf.	Q Medio	VAN Unitario - Pr de Mercado		Rentabilidad
	Benefic.	Infiltrado	Total	por año	mill \$/(l/s)
	(ha)	(l/s)	(Mill \$/ha)	(Mill \$/ha/año)	
A4-L3	687.8	445	1.08	0.036	1.7
A3-L6	672.4	511	1.13	0.038	1.5
A1-P5	295.1	365	-0.41	-0.014	-0.3
A2-P9	375.0	450	-0.60	-0.020	-0.5

Tabla 4: Rentabilidades Unitarias de los Proyectos

Los proyectos de la cuenca del río Petorca tienen rentabilidades negativas, para precios de mercado. Al considerar los precios sociales, la rentabilidad es positiva. El indicador IVAN señala que el proyecto A2-P9 es el más conveniente en la cuenca del río Petorca. Los proyectos de la cuenca del río La Ligua tienen rentabilidad positiva, tanto para precios de mercado como sociales. Al comparar el indicador IVAN, se observa que el proyecto A3-L6 es el más conveniente en la cuenca del río La Ligua. Esto se mantiene si se observa la rentabilidad unitaria (por hectárea). Por lo tanto, de concretarse algún proyecto en estos valles, debiera ser en la cuenca del río La Ligua y si se considera solo los aspectos económicos, debiera ser en el sector cercano a Cabildo, que tiene mejores indicadores que el proyecto que se ubica en el sector La Viña.

Se esbozó un programa para la instalación de equipos de medición de caudal en los pozos que se ubiquen cercanos a las obras de infiltración, de forma de controlar adecuadamente los caudales de extracción atribuibles a la recarga. Adicionalmente, se plantea controlar los niveles freáticos aguas abajo de las obras, mediante piezómetros; los caudales afluentes a las obras, mediante flujómetros del tipo Parshall y limnigrafos; los volúmenes en las piscinas, mediante reglas limnimétricas; y la precipitación y evaporación en cada sector con obras de recarga, mediante la instalación de pluviógrafos y evaporímetros.

Los proyectos de recarga artificial que han sido evaluados en este estudio, que serán complementarios con los proyectos de embalse, son muy pequeños en el contexto de cada valle, por lo que sus efectos, si bien tendrán una influencia en la vecindad inmediata, serán marginales a nivel de cuenca.

4.2.3. Estudio Básico "Análisis alternativas piloto recarga artificial Ligua – Petorca, V Región"; CNR, Aqualogy Medioambiente Chile S.A.; Agosto 2013.

A partir de los resultados del estudio anterior ("Mejoramiento de Agua Subterránea para Riego Ligua y Petorca"; CNR, GCF Ingenieros Ltda.; Enero 2013), la CNR desarrollo un estudio o proyecto para ejecutar un Plan Piloto de recarga artificial, de manera de rescatar indicadores y resultados que sirvan para extrapolar la experiencia conseguida, tanto en futuros proyectos pilotos en otras zonas del país, como en proyectos a mayor escala.

El objetivo general del estudio fue desarrollar un proyecto piloto para recargar artificialmente los acuíferos de los Valles de Ligua y Petorca mediante un sistema de lagunas de infiltración. Los objetivos específicos planteados para este estudio fueron:

- Analizar la información hidrológica, hidrogeológica y topográfica existente para los 5 sitios identificados en el estudio "Mejoramiento de Aguas Subterráneas para Riego Ligua y Petorca".
- Analizar los aspectos legales del aprovechamiento de excedentes superficiales recargados artificialmente.
- Seleccionar el sitio piloto entre los 5 sitios identificados en el estudio "Mejoramiento de Aguas Subterráneas para Riego Ligua y Petorca".
- Construir las obras necesarias para el desarrollo del piloto.
- Realizar pruebas de recarga.
- Determinar las tasas de infiltración del sistema.
- Evaluar el impacto en los niveles de los pozos cercanos al sistema.

En el desarrollo de este estudio, se comenzó trabajando sobre los sitios preseleccionados anteriormente y se efectuó una evaluación para identificar el mejor sitio. A medida que se desarrolló esta actividad, fueron surgiendo otras alternativas, en particular el sitio privado, al que se le denominó Sitio Privado Bartolillo (SPB), donde en definitiva se construyó el proyecto.

Los sitios evaluados en La Ligua fueron:

- A4-L3 (Sector Bartolillo)
- A3-L3 (Sector La Vega)
- A3-L6 (Sector Cabildo)
- SPB (Sector Bartolillo)

Los sitios evaluados en Petorca:

- A1-P5 (Sector Hierro Viejo)
- A2-P9 (Sector La Canela).

Los emplazamientos de la propuesta original, presentaron características muy similares y, en principio, muy apropiadas para operaciones de recarga. En todos se dispuso de la cantidad suficiente de terreno y en las cercanías del río, el sustrato presentó elevadas permeabilidades, se encuentran en zona de recarga del acuífero, los permisos similares y los usuarios con los que se tomó contacto se mostraron favorables al proyecto.

No obstante a lo dicho, hubo una serie de factores excluyentes cuya presencia hizo inviable la operación de recarga en el sitio y otros factores condicionantes, que son los que la limitan o la dificultan y, en definitiva, son los que clarifican la viabilidad de la recarga.

Los principales factores diferenciadores fueron:

- Factores excluyentes: el sitio A3-L6 presentó una baja disponibilidad de recurso. En los estudios previos se asignaron unos caudales medios circulantes por el río de cierta entidad, pero con bajas probabilidades, lo que se traduce en su no disponibilidad en los periodos de sequía.
- Factores en riesgo de exclusión: en el sitio A3-L3 se determinó la presencia de un pozo y galería, que puede drenar del acuífero los recursos que se pudieran infiltrar. En el caso que se demostrase que esta galería está colapsada, o que se puede regular, este factor excluyente dejaría de tener efecto.

Los principales factores condicionantes fueron:

- Para alimentar el sitio A4-L6 B, se debe trazar una tubería que atraviese una parcela privada, mediante tubería enterrada de cerca de 300 m de longitud, que excede el alcance de un piloto.
- Aguas abajo del sitio A4-L6 A, a unos 200 m, se encuentra un dren que atraviesa transversalmente el acuífero, que condicionaría los volúmenes de admisión, ya que actuaría como barrera de drenaje y extraería del acuífero parte de los recursos infiltrados.
- En los sitios A4-L6 A y A4-L6 B la napa se encuentra muy próxima a superficie lo que limita los volúmenes posibles a regular.

Descartados las parcelas con factores excluyentes, y evaluados los condicionantes, sólo quedó como sitio favorable para realizar el piloto el sitio A4- L3.

El sitio privado (SPB), cumplió con todos los atributos establecidos para el sitio A4-L3, aunque la red de control piezométrico es de menor cuantía. Pero el sitio SPB presentó varias otras singularidades que favorecieron su selección, como emplazamiento óptimo para la construcción del plan piloto:

- Sitio particular con autorización del dueño del predio, que a su vez es el presidente de la asociación de canalistas del Canal Alicahue, señor José Luis Oyanedel.
- Disponibilidad del recurso hídrico en el interior del predio, a través de un canal que descarga en un tranque, que además aporta la gran ventaja y variable de decisión, por su regulación.
- Pozos de control piezométrico, aguas abajo de la zona y aguas arriba deL ahora ya materializado emplazamiento.

El sitio privado se encuentra en la localidad de Bartolillo, que se encuentra en el valle de Alicahue.

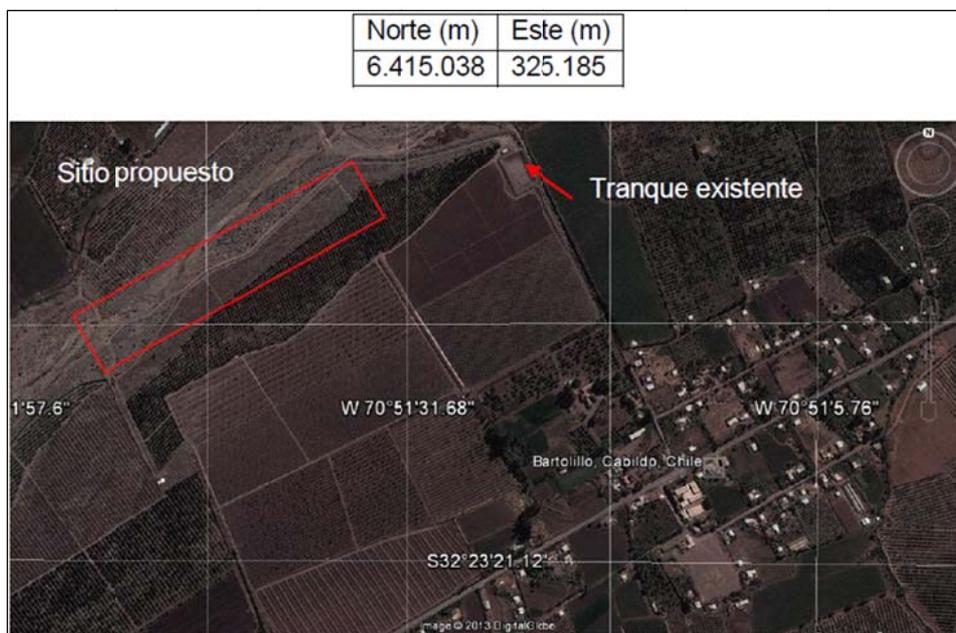


Figura 10: Coordenadas UTM y emplazamiento del SPB

Operación del Proyecto

La estimación original de poder disponer de la totalidad de las aguas del Canal Alicahue, durante los meses de junio a septiembre, no fue tal, producto de la climatología y la demanda del recurso de los agricultores, lo que reforzó la decisión de seleccionar este sitio privado, ya que por el período de junio y julio se dispuso de los caudales de cargo del dueño del predio, bajo turnos con frecuencia de ocho días, embalsados en el tranque de su propiedad, y que en definitiva permitió regular los caudales de alimentación a la obra de recarga.

La disponibilidad de agua para la operación del sistema de recarga artificial, se encontró condicionada al recurso discontinuo recibido en el tranque de acumulación, producto del sistema de turnos de riego, junto con las necesidades del consumo propio de los cultivos en el predio donde se emplaza el proyecto.

Así, la operación de estas balsas se desarrolló según la correspondiente disponibilidad de agua en el tranque mencionado. Originalmente, de acuerdo a estimaciones del agricultor propietario del predio del proyecto, el Consultor dispondría de la totalidad de los recursos en el tranque, desde junio hasta el mes de agosto.

A partir de estas predicciones, se fueron desarrollando ciclos de recarga, los que fueron informados al Mandante, según fueran realizados.

La disponibilidad de recursos estimada, se vio afectada antes de lo previsto, por los requerimientos propios de riego, con un efecto inmediato de caudales menores de llenado, producto de la merma en el tranque. Finalmente, ya no se dispuso del recurso.

A pesar de esta limitación del elemento base para el desarrollo de la operación del proyecto de recarga, con todos los ciclos de operación ejecutados, se dispuso de la información suficiente, para atender el objetivo principal de este proyecto, que fue estimar tasas de infiltración, asociadas por cierto a cargas de agua en las balsas, y a volúmenes aportados.

Se destaca que la variable volumen no presenta mayor utilidad en sí misma, si no va asociada a la unidad de tiempo en que opera, es decir, interesa la variable caudal por sobre el volumen.

Respecto a la variación de los niveles en la balsa de recarga, se dan tres posibilidades, que son la de llenado, estabilización y descarga.

- En el proceso de llenado, una tasa de variación de niveles decreciente, orienta en cuanto a que se está logrando el nivel de estabilización. Al proyectar estas tasas buscando el valor nulo, se hace posible estimar el nivel de estabilización.
- La estabilización es una condición relativa, ya que la fuente de alimentación obedece a una curva de descarga, caudal función del nivel en el tranque, por lo tanto, una vez estabilizado el nivel en la balsa, éste empezaría a descender en la misma proporción que el caudal de entrada.
- La descarga definida a partir de la detención de la alimentación a la balsa, reporta las tasas de infiltración según la altura de agua en la balsa. También se puede dar un descenso en el nivel de la balsa cuando el caudal se reduce en demasía, pero esta situación se intentó evitar.

El tranque del predio donde se emplaza el proyecto, recibe un caudal en turnos nocturnos, cada ocho (8) días. Lo anterior impone un flujo discontinuo (pulsos), de entrega a las balsas.

Se definieron los siguientes ciclos de recarga:

- Operación diaria de una hora de duración, con válvulas completamente abiertas. El caudal entregado es aproximadamente 110 l/s (430 m³).
- El segundo ciclo consideró la regulación del caudal de entrada a la balsa 1, estabilizando el nivel, de tal forma que no se produjera el trasvase a la segunda balsa. Consiguiendo entrar en régimen, se mantuvo la operación hasta utilizar todo el volumen disponible.
- El tercer ciclo contempló, lograr la estabilización del nivel en las balsas 1 y 2, sin trasvase a la balsa N° 3. Sólo fue posible estabilizar la balsa 1.

Atendiendo a estos ciclos de recarga y a la disponibilidad de agua, se ejecutaron las siguientes cinco etapas de operaciones:

- Ciclo 1: Operaciones diarias entre el 11 y 19 de Junio

- Ciclo 2: Operación única el día 20 de junio
- Ciclo 3: Operación única el día 1 de julio
- Ciclo 4: Operación única el día 2 de julio
- Ciclo 5: Operaciones diarias entre el 12 y 13 de julio

Tasas de Infiltración

La tasa de infiltración y el impacto en los niveles de los pozos cercanos al sistema, fueron los principales objetivos a verificar durante la operación. La tasa de infiltración se obtuvo directamente del proceso de recesión. En la Tabla 5 se presenta el consolidado de curvas de recesión generadas durante la operación del Piloto.

07/13
7,3
6,5
6,1
6,0
6,4
7,2
8,3
9,9
11,9
14,2

Se analizó la evolución en el tiempo de las curvas de recesión, intentando identificar efectos sobre ellas de la humedad o colmatación del suelo.

Para evaluar el posible efecto de colmatación, se confrontó la curva de recesión inicial (11/06/2013), con la curva final (02/07/2013). En el Gráfico 3, se observó que no existe una manifiesta y persistente baja de la tasa de infiltración, que es el efecto de la colmatación, es más, se observó un aumento de la tasa, a partir de cargas incluso inferiores a 40 cm.

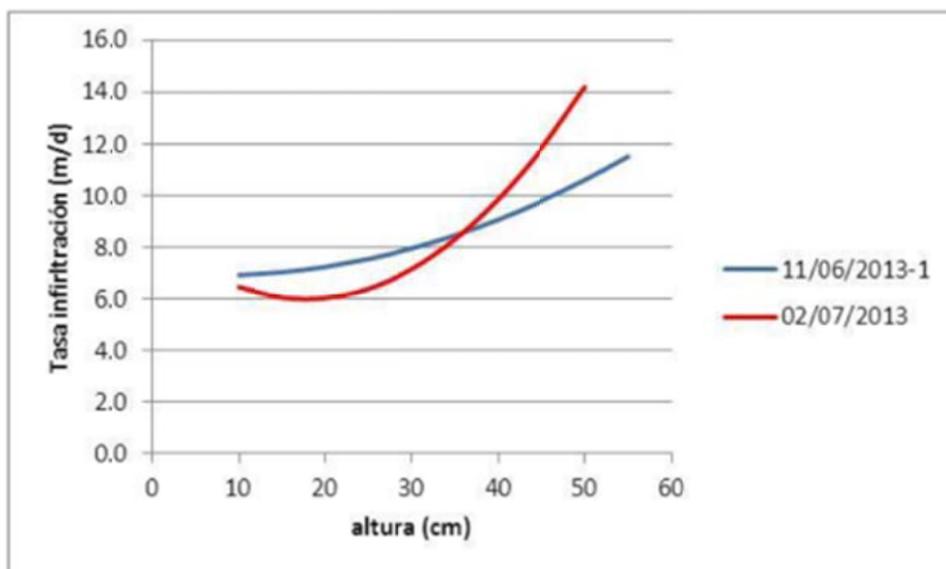


Gráfico 3: Curvas de Recesión Inicial y Final

El efecto de humedad implica que los poros se saturan, pudiendo con ello reducirse la tasa de infiltración. En el Gráfico 4, se presenta la operación de cuatro días consecutivos. Para tasas altas, éstas se reducen con el correr de los días, pero todas las curvas de recesión convergen a 6 m/d al acercarse al límite de detección del sensor.

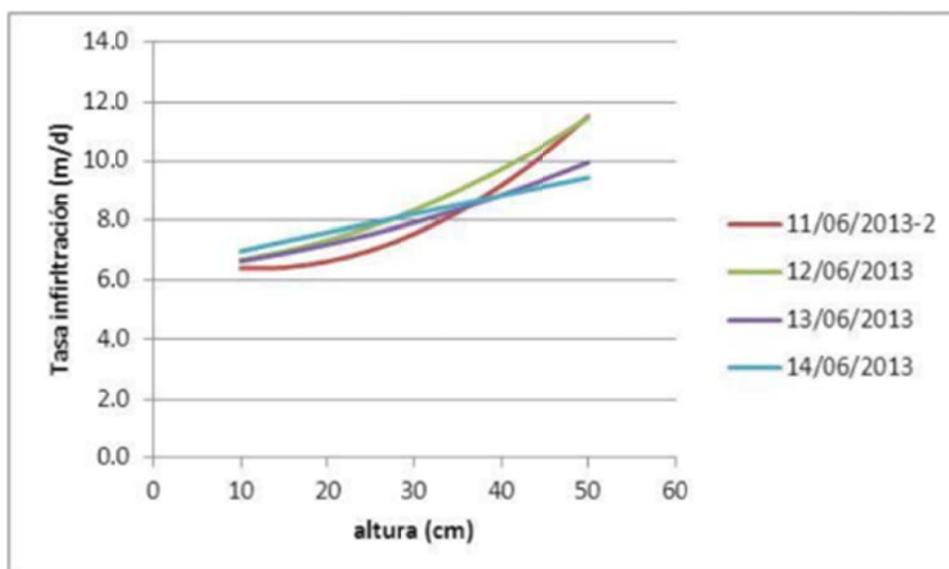


Gráfico 4: Curvas de Recesión Inicial y Final

En las dos operaciones finales, realizadas más de diez (10) días después del tren inicial de recarga, vale decir, un terreno con baja humedad, se pudo observar que las tasas de infiltración altas aumentan, lo que corrobora la idea de la influencia de la humedad en la velocidad de infiltración (ver Gráfico 5).

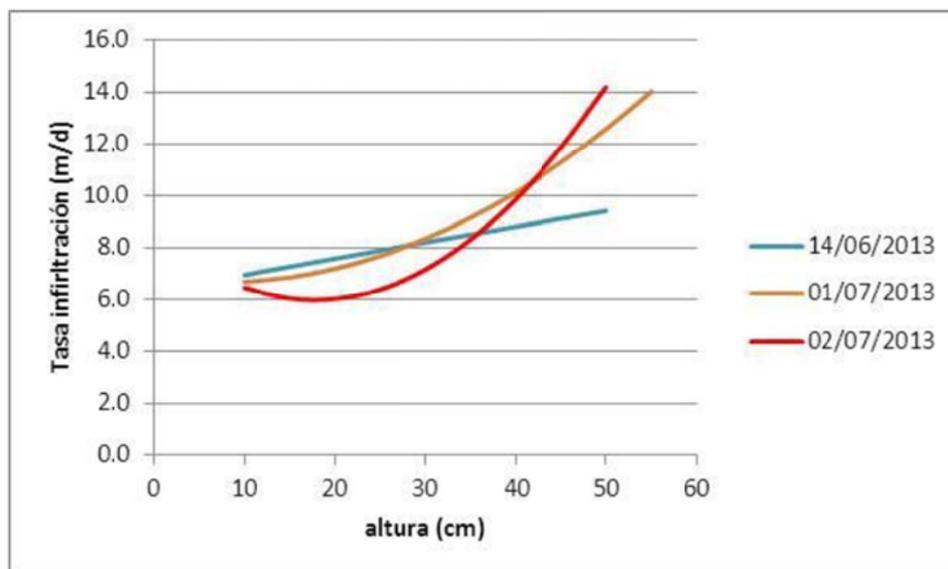


Gráfico 5: Curvas de recesión desfasadas en más de diez días

Se seleccionó la última curva de recesión del ciclo continuo, esto es, la curva generada en la operación del día 14/06/2013.

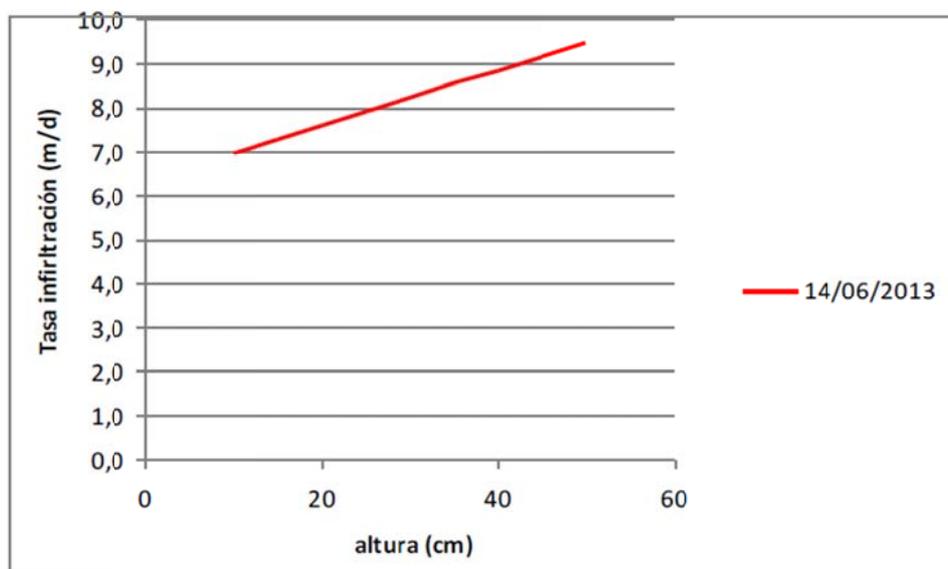


Gráfico 6: Curva de recesión seleccionada

Caudales Recargados

Se integró la información de la curva Hipsométrica y las curvas de recesión, anteriormente expuestas, para estimar caudales de recarga, según se presenta en la Tabla 6.

h Diver (cm)	Base sup. (m ²)	11/6/13-1	11/6/13-2	12/06/13	13/06/13	14/06/13	17/06/13	01/07/13	02/07/13
18	265	22	20	21	21	22	23	22	19
23	266	23	20	22	22	23	24	23	18
28	268	24	21	24	23	24	25	25	19
33	269	26	23	25	24	25	25	28	21
38	270	28	25	27	26	26	26	30	24
43	271	30	28	30	27	27	27	34	29
48	272	32	31	32	29	28	27	38	35
53	273	35	35	35	31	29	28	42	42
58	275	39	39	38	33	31	28	48	50
63	276	42	44	42	35	32	29	53	60
68	277	46	50	46	37	33	29	60	71
73	278	50	56	50	40	34	30	66	83
78	279	55	63	54	42	35	30	74	97

Tabla 6: Consolidado de caudales posibles de recargar (l/s)

En particular, si se recarga continuamente la balsa 1, manteniendo por ejemplo el nivel del agua en 28 cm, resultará en:

$$Q_{\text{recargado}} \text{ (l/s)} = 7,8 \text{ m/d} \times 268 \text{ m}^2 = 24 \text{ l/s}$$

La extrapolación es directa, en cuanto a aumentar el área de la alguna Piloto a otras dimensiones. Es decir, una laguna de 3000 m², supondrá para el nivel de agua mencionado, una recarga de 271 l/s. En la Tabla siguiente, se presentan los volúmenes infiltrados en cada ciclo, y el total de todo el proceso, que alcanzó a 12,055 m³.

Fecha	Lectura Inicial (m ³)	Lectura Final (m ³)	Volumen (m ³)
10/06/2013	0	790	790
11/06/2013	790	1,215	425
11/06/2013	1215	1,650	435
12/06/2013	1650	2,080	430
13/06/2013	2080	2,380	300
14/06/2013	2380	2,880	500
17/06/2013	2880	3,220	340
19/06/2013	3220	3,715	495
01//07/2013	3715	4,966	1251
02//07/2013	4966	5,396	430
12/07/2013	5396	8,141	2745
13/07/2013	8141	12,055	3914
		Total (m ³):	12,055

Tabla 7: Consolidado de volúmenes recargados durante los ciclos de operación

Impacto de la Recarga en el Acuífero

Para evaluar el impacto en acuífero, se instalaron data logger en pozos cercanos a la zona de recarga para medir variaciones de nivel en nivel freático de los mismos, y se construyó la curva de tendencia a partir de los registros almacenados obtenidos. Se menciona que el pozo 1 (aguas arriba de la zona de recarga), a la fecha se mantiene seco.

El sensor acusó un tramo de cuatro días sin registrar, motivo por el cual se presentan dos gráficos con la variación de presión en el pozo de control.

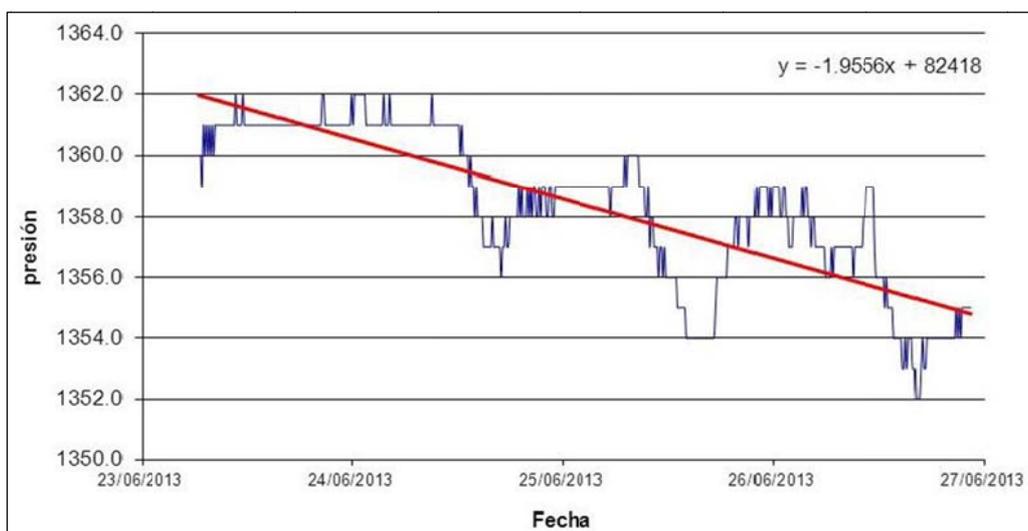


Tabla 8: Variaciones de carga en pozo de control N° 2, control junio 2013

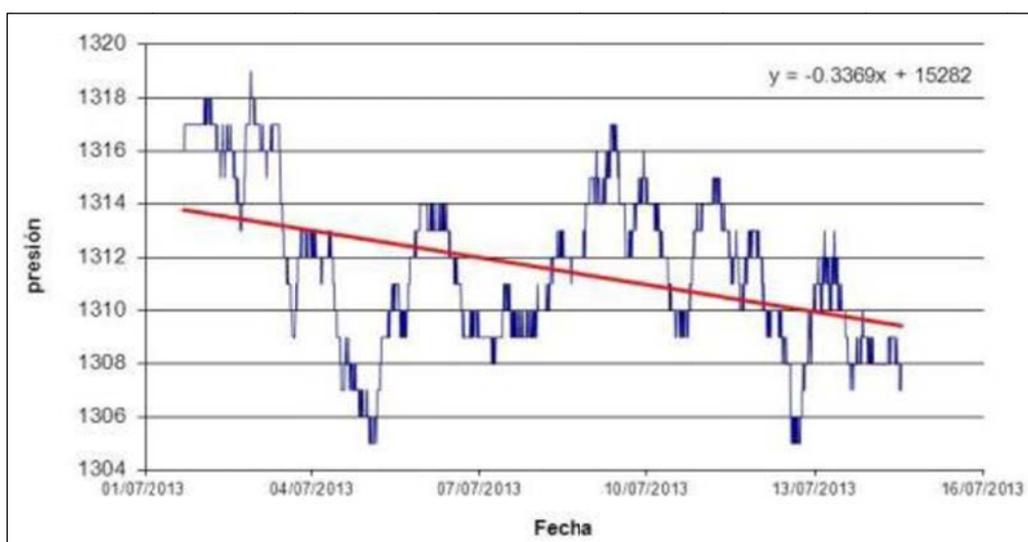


Tabla 9: Variaciones de carga en pozo de control N° 2, control primera quincena de julio 2013

En términos generales se observó una tendencia de descenso del nivel en el pozo, pero la tasa de descenso se reduce al comparar los dos tramos monitoreados: la pendiente

de descenso disminuye entre el control de junio 2013 (-1,9556) y la primera quincena de julio (-0,3369).

Por otro lado, los niveles detectados los primeros quince días de julio, a pesar de que no exhiben recuperación detectable, muestran periodos de recuperación y periodos de descenso tal y como se muestra a continuación:

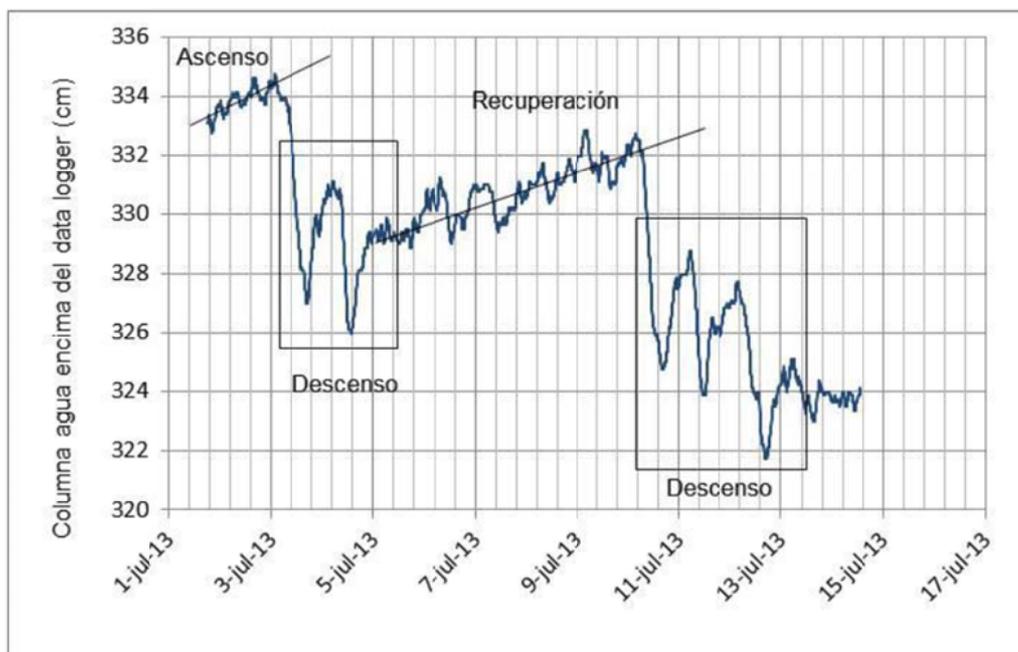


Tabla 10: Variaciones de carga en pozo de control N° 2, primera quincena de julio

Debido al carácter puntual y aislado de los descensos observados en la gráfica anterior, se cree que pueden ser debidos a la afección de pozos de bombeo cercanos al punto de observación. Por tanto, si no se tienen en cuenta dichos descensos se observa una atenuación al descenso piezométrico inicial, con leves recuperaciones. Se concluye que el sensor instalado en el pozo 2 ha recibido una fuente de recarga que atenuó la tendencia general de descenso.

Conclusiones y Recomendaciones

Una de las conclusiones fundamentales de este proyecto, que puede ser presentada como una principal recomendación, es que para garantizar el éxito en cuanto a logro de objetivos, es poder integrar a la comunidad potencialmente beneficiada por las obras de recarga. Este proyecto particular, pudo desarrollarse y operar, gracias a la buena disposición del señor José Oyanedel, Presidente de la Asociación de Canalistas del Canal Alicahue, y dueño del predio donde se materializó el Plan Piloto.

Como la regulación de un acuífero, es tema de balance, el efecto de una recarga artificial lo modificará, entonces se recomienda que para otras experiencias, el control piezométrico, se inicie con antelación a la operación de recarga. De esta forma se

determina la regulación antes y durante la operación del proyecto, una variación en la regulación del sistema, implica por supuesto un impacto de la recarga en los niveles piezométricos.

Como recomendaciones técnicas para futuros proyectos pilotos se mencionan las siguientes:

- Establecer una línea base con bastante antelación a la entrada en operación del proyecto.
- En el dimensionamiento de las balsas, se deberá privilegiar la profundidad por sobre el área, ya que queda establecido que la tasa de infiltración depende de la carga, y son directamente proporcionales.
- Si no se dispone de fuentes de control, se debe contemplar la construcción de piezómetros
- Como ya se mencionó, se debe privilegiar la profundidad sobre el área, con lo cual las unidades podrían construirse más pequeñas, y considerar una de ellas con carpetas impermeables que sirva de almacenamiento para las pruebas.
- Ya que interesa el caudal por sobre los volúmenes, es totalmente recomendable, que la alimentación del Piloto, también posea un mecanismo de registro continuo de caudales.

4.2.4. Estudio Diagnóstico de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos en las Regiones de Arica y Parinacota a la Región Del Maule; CNR, GCF Ingenieros Ltda.; Marzo 2013.

La CNR está trabajando en estudios que apuntan a definir y desarrollar proyectos de recarga artificial de acuíferos, entre los cuales, este trabajo, que es el primero que abarca una amplia zona del territorio nacional, entre Arica y Parinacota y la Región del Maule, configura un panorama positivo respecto a lo que pueda obtenerse de estos proyectos de mejoramiento o aumento de la disponibilidad de agua subterránea a nivel nacional. Destaca en este caso el diseño de un *Índice de Recarga Compuesto*, lo que constituye la primera aproximación a un método de selección de sectores aptos para la recarga artificial.

El objetivo general de este trabajo fue la determinación de zonas potenciales para aplicar recarga artificial de acuíferos, en las principales cuencas ubicadas entre las regiones de Arica y Parinacota a Maule. Por su parte, los objetivos específicos fueron los siguientes:

- Caracterización de las cuencas,
- Determinación de las zonas potenciales de recarga,
- Validación en terreno de los resultados,

- Generación de perfiles de costos para proyectos de referencia
- Implementación de una plataforma SIG.

En primer lugar, se realizó una identificación preliminar de cuencas favorables para la recarga.

Se consideró que para esta identificación de sectores específicos donde se espera que proyectos de recarga artificial tuvieran resultados exitosos, hay ciertas condiciones que deben cumplirse, las que, por un lado, provienen de las condiciones hidrogeológicas del área de estudio y, por otro, de la efectiva disponibilidad de agua para efectuar la recarga. En cuanto a las condiciones hidrogeológicas, se señala que un proyecto de recarga artificial será exitoso si se tiene una napa libre con un nivel estático profundo, que se encuentre desconectado de los cauces superficiales que pudieran existir en el entorno. Además, debe cumplirse que el medio a través del cual se realice la recarga a la napa tenga permeabilidad alta, sea que ésta se realice gravitacionalmente o usando inyección del agua a presión. Por otra parte, un proyecto de recarga artificial en una cuenca o sector donde la napa está siendo sobreexplotada, tendrá un mayor impacto económico positivo que el que se esperaría en un sector subexplotado o en equilibrio hidrológico.

Dentro de la identificación preliminar, se realizó una caracterización conceptual general y un análisis de las cuencas involucradas en este estudio, para estimar la validez y utilidad que se obtendría con el desarrollo de proyectos de este tipo. Las cuencas estudiadas se presentan en la siguiente tabla.

N°	Cuenca	Región N°	Región Nombre
1	Río Lluta	XV	Arica y Parinacota
2	Río Azapa	XV	Arica y Parinacota
3	Río Copiapó	III	Atacama
4	Río Huasco	III	Atacama
5	Río Elqui	IV	Coquimbo
6	Pan de Azúcar	IV	Coquimbo
7	Río Limarí	IV	Coquimbo
8	Río Choapa	IV	Coquimbo
9	Río Ligua	V	Valparaíso
10	Río Petorca	V	Valparaíso
11	Río Aconcagua	V	Valparaíso
12	Río Maipo	XIII	Metropolitana
13	Río Rapel	VI	Libertador General B. O'Higgins
14	Río Maule	VII	Maule

Tabla 11: Cuencas Estudiadas

En cada una de las cuencas estudiadas se generaron coberturas de permeabilidades, basado en estudios anteriores, para visualizar las zonas más permeables en todas las cuencas.



Figura 11: Permeabilidades en Cuencas Estudiadas

También se determinó el volumen para almacenamiento disponible. Se procesaron los datos de niveles estáticos disponibles en cada cuenca para identificar aquellos sectores acuífero con niveles estáticos profundos, que posibiliten el almacenamiento de recarga artificial.

Tomando en consideración las características hidrogeológicas de las cuencas estudiadas, se subdividieron en sectores acuíferos con el objetivo de priorizar sectores aptos para recarga artificial. Para establecer la importancia relativa de cada sector, se determinó un índice de recarga compuesto, que consideró tres variables: profundidad de la napa, coeficiente de permeabilidad y superficie del relleno o área de la subcuenca acuífera. Los resultados de esa evaluación son los que se presentan en la siguiente tabla, definiéndose con ello las áreas prioritarias para la implementación de proyectos de recarga artificial.

N°	Cuenca	Índice
1	Putendo - Quebrada Seca	100.00
2	Aconcagua hasta San Felipe	66.43
3	Mapocho y subcuenca norte del Maipo	54.41
4	Chacabuco - Polpaico	32.52
5	Pan de Azúcar aguas abajo de El Peñón	31.46
6	Maipo hasta confluencia con Mapocho (subcuenca sur)	30.01
7	Cachapoal	28.75
8	Copiapó aguas arriba de Tierra Amarilla	25.13
9	Lampa - Colina	24.55
10	Claro	20.72
11	Maule - Loncomilla	20.07
12	Azapa aguas abajo de Cabuza	18.91
13	Perquillauquén	18.72
14	Aconcagua entre San Felipe y Tabolango	18.69
15	Copiapó aguas abajo de Tierra Amarilla	18.65
16	Tinguiririca	14.33
17	Azapa aguas arriba de Cabuza	14.06
18	Pan de Azúcar aguas arriba El Peñón	13.16
19	Maipo poniente	13.05
20	Alhué	12.95
21	Limarí aguas abajo del embalse La Paloma	12.07
22	Elqui aguas arriba del embalse Puclaro	12.04
23	Cholqui y Popeta	12.01
24	Longaví	10.89
25	Aconcagua aguas abajo Tabolango	10.34
26	Limarí aguas arriba del embalse La Paloma	10.27
27	Puangue	7.98
28	Elqui aguas abajo del embalse Puclaro	6.96
29	Rapel poniente	6.72
30	Huasco	4.33
31	Chalinga aguas arriba confluencia Choapa	4.16
32	La Ligua	3.99
33	Lluta	3.60
34	Pencahue	3.58
35	Choapa menos subcuenca Chalinga	3.55
36	Petorca	3.17
37	Estero Limache	3.13
38	Tiltil	0.00

Tabla 12: Índice de recarga compuesto (0 a 100)

Una vez establecido el ranking de los sectores acuíferos, se eligieron los 15 sectores mejor evaluados para identificar en cada uno de ellos las zonas con mayor potencial para recarga artificial de acuíferos. Para cada uno de los 15 sectores seleccionados se delimitaron las áreas más aptas para admitir recarga artificial. El criterio de delimitación consistió en identificar las zonas más permeables y con niveles más profundos en cada subcuenca. Estos sectores corresponden a áreas prioritarias a tener en consideración para futuros proyectos de recarga artificial de acuíferos.

N°	Cuenca	Índice
1	Putauendo - Quebrada Seca	100.00
2	Aconcagua hasta San Felipe	66.43
3	Mapocho y subcuenca norte del Maipo	54.41
4	Chacabuco - Polpaico	32.52
5	Pan de Azúcar aguas abajo de El Peñón	31.46
6	Maipo hasta confluencia con Mapocho (subcuenca sur)	30.01
7	Cachapoal	28.75
8	Copiapó aguas arriba de Tierra Amarilla	25.13
9	Lampa - Colina	24.55
10	Claro	20.72
11	Maule - Loncomilla	20.07
12	Azapa aguas abajo de Cabuza	18.91
13	Perquillauquén	18.72
14	Aconcagua entre San Felipe y Tabolango	18.69
15	Copiapó aguas abajo de Tierra Amarilla	18.65

Tabla 13:15 sectores mejor evaluados

Según las bases técnicas del estudio, se debía seleccionar tres sectores para desarrollar en ellos perfiles de costos de las obras de recarga. En principio, los tres sectores serían los tres primeros en el ranking, pero se descartó el sector Putaendo Quebrada Seca ya que corresponde a un sector muy particular que dispone de pocos sondajes, en general muy profundos, destinados al agua potable o al riego de predios de sociedades agrícolas. Para la recarga se requeriría sondajes de 130 a 150 m, ya que los niveles estáticos llegan a profundidades de ese orden; paralelamente, para la extracción, se requeriría pozos similares, que son de muy alto costo. También se descartó el sector Aconcagua hasta San Felipe ya que, a la fecha de realización de este estudio, estaba siendo analizada en un estudio en ejecución de la DOH. Así, Las subcuencas seleccionadas fueron:

- Mapocho y subcuenca Norte del Maipo (Región Metropolitana)
- Chacabuco-Polpaico (Región Metropolitana)
- Pan de Azúcar, aguas abajo de El Peñón (IV Región)

Estos tres sectores presentan un buen potencial para proyectos de recarga artificial, además no han sido incluidos en estudios previos o simultáneos y no corresponden a cuencas subexplotadas. Por otro lado, de acuerdo con los antecedentes revisados y los reconocimientos en terreno, en todos estos casos la recarga consistirá en pozos profundos de infiltración, aprovechando que los niveles de napa están bastante deprimidos y los acuíferos poseen valores de permeabilidad también bastante altos.

Proyecto de recarga artificial del acuífero Mapocho y subcuenca Norte del Maipo

El área donde se ubicarían los proyectos corresponde al sector sur de Santiago, al norte del río Maipo. La fuente de agua para ellos deben ser, necesariamente, los sobrantes de invierno del río Maipo, que al ser conducidos por canales de regadío hasta las obras de recarga artificial, permitirían materializar estos proyectos. En cuanto a la ubicación de las obras de recarga, se estima que en tramos de 3 derivados del canal San Francisco (L=1.700 m, 1.600 m y 3.200 m), en terrenos del INIA y del campus Antumapu de la Universidad de Chile, se podría construir pozos de infiltración. Del

mismo modo, a lo largo del canal Eyzaguirre y su derivado el canal San Bernardo, se podría hacer algo semejante en una longitud de 7.200 m.

Los pozos de infiltración que se propone considerar en este proyecto, deben ser de 120 m de profundidad, habilitados en 12" y con cribas a todo su largo a partir de los 30 m de profundidad, para permitir una infiltración hasta la napa de 30 l/s. Estos pozos se ubicarían a todo lo largo de los tramos de los canales de la Figura 12, espaciados 200 metros uno de otro.



Figura 12: Canales de Santiago Sur que serían usados en Recarga Artificial

El número de pozos de infiltración a perforar es el siguiente:

- Canal San Francisco
 - L= 1.700 m 9 pozos
 - L= 1.600 m 8 pozos
 - L= 3.200 m 16 pozos
- Canal Eyzaguirre y San Bernardo L= 7.200 m 37 pozos

Cada pozo se estima que podría infiltrar un caudal de 30 l/s, lo que para los 70 pozos totalizaría 2100 l/s, que en un período de 4 meses representa un volumen de 21.7 millones de m³ que podría aprovecharse en la época de estiaje, cuando el riego se intensifica.

Se hizo una estimación de costos del proyecto y se presenta en la siguiente tabla.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNID.	CANT.	P. UNIT. (\$)	P. TOTAL (\$)
	A. INSTALACIÓN Y LEVANTE DE FAENAS				1.200.000
1	Instalación y levante de faenas.	gl	1	1.200.000	1.200.000
	B. CONSTRUCCIÓN DEL SONDAJE				60.839.000
2	Perforación $D_{min} = 16''$.	m	120	280.000	33.600.000
3	Entubación cañería acero $D = 12''$, $e = 6,3$ mm.	m	36	80.000	2.880.000
4	Cribas acero al carbono, Slot 40, $D = 12''$	m	84	220.000	18.480.000
5	Suministro y colocación de filtro granular.	m	120	46.700	5.604.000
6	Sello y brocal de hormigón.	gl	1	225.000	225.000
7	Tapa del pozo según plano de proyecto.	gl	1	50.000	50.000
	C. OBRA DE CAPTACIÓN Y FILTRO, Y CASETA				5.000.000
8	Obra de captación, bomba y obra de arte para tratamiento	gl	1	2.000.000	2.000.000
9	Recinto sólido y seguro de 3x6 m, metálico.	gl	1	3.000.000	3.000.000
	D. INTERRUPCIÓN DE FAENAS				960.000
10	Interrupción de faenas	hr	24	40.000	960.000
	F. PLANO DE CONSTRUCCIÓN E INFORME FINAL				300.000
11	Plano de construcción e informe final	gl	1	300.000	300.000
	Subtotal por Pozo			\$	68.299.000
	Gastos gries., imprevistos y utilidades (45%)			\$	30.734.550
	Total neto			\$	99.033.550
	I.V.A. (19%)			\$	18.816.375
	TOTAL			\$	117.849.925
	Subtotal por el Proyecto (70 pozos)			\$	4.780.930.000
	Gastos gries., imprevistos y utilidades (45%)			\$	2.151.418.500
	Total neto			\$	6.932.348.500
	I.V.A. (19%)			\$	1.317.146.215
	TOTAL			\$	8.249.494.715

Tabla 14: Cubicaciones y Estimación de Costos, Obra de Recarga Artificial del Sector Mapocho y subcuenca Norte del Maipo

Proyecto de recarga artificial del acuífero Chacabuco-Polpaico

Se ha determinado que los pozos de infiltración son una buena alternativa para la recarga de la napa en este sector. Se considera la perforación de un total de 6 sondajes con una profundidad promedio de 50 m, a lo largo del tramo de un derivado del canal Chacabuco-Polpaico, el que se muestra en la Figura 13, los que se ubicarían a una distancia media cercana a los 300 m uno de otro. Para facilitar la recarga se contempla que los pozos queden habilitados con cribas en gran parte de su extensión, desde los 7 m hasta los 45 m (36 m de cribas y 2 tramos de 1 m de tubo ciego intercalados para dar estabilidad estructural al sondaje) los 5 m finales se dejan con tubo ciego, como trampa de arena. Cada pozo permitiría infiltrar un caudal estimado de 40 l/s, con lo que se totalizaría un total de recarga de 240 l/s durante los meses de invierno. Ese volumen, en un lapso de 4 meses representa cerca de 2.5 millones de m³, que podrían aprovecharse en la época de estiaje, cuando el riego se intensifica. Las aguas de recarga necesariamente deberán provenir de los sobrantes de invierno del río Aconcagua, trasladados por el canal Chacabuco-Polpaico hasta el sector de proyecto.



Figura 13: Tramo del estero Santa Margarita para efectuar recarga artificial

Se hizo una estimación de costos del proyecto y se presenta en la siguiente tabla.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNID.	CANT.	P. UNIT. (\$)	P. TOTAL (\$)
	A. INSTALACIÓN Y LEVANTE DE FAENAS				1.200.000
1	Instalación y levante de faenas.	gl	1	1.200.000	1.200.000
	B. CONSTRUCCIÓN DEL SONDAJE				25.650.000
2	Perforación $D_{min} = 16''$.	m	50	280.000	14.000.000
3	Entubación cañería acero $D = 12''$, $e = 6,3$ mm.	m	14	80.000	1.120.000
4	Cribas acero al carbono, Slot 40, $D = 12''$	m	36	220.000	7.920.000
5	Suministro y colocación de filtro granular.	m	50	46.700	2.335.000
6	Sello y brocal de hormigón.	gl	1	225.000	225.000
7	Tapa del pozo según plano de proyecto.	gl	1	50.000	50.000
	C. OBRA DE CAPTACIÓN Y FILTRO, Y CASETA				5.000.000
8	Obra de captación, bomba y obra de arte para tratamiento	gl	1	2.000.000	2.000.000
9	Recinto sólido y seguro de 3x6 m, metálico.	gl	1	3.000.000	3.000.000
	D. INTERRUPCIÓN DE FAENAS				960.000
10	Interrupción de faenas	hr	24	40.000	960.000
	F. PLANO DE CONSTRUCCIÓN E INFORME FINAL				230.000
11	Plano de construcción e informe final	gl	1	230.000	230.000
	Subtotal por Pozo			\$	33.040.000
	Gastos gries., imprevistos y utilidades (45%)			\$	14.868.000
	Total neto			\$	47.908.000
	I.V.A. (19%)			\$	9.102.520
	TOTAL			\$	57.010.520
	Subtotal por el Proyecto (6 pozos)			\$	198.240.000
	Gastos gries., imprevistos y utilidades (45%)			\$	89.208.000
	Total neto			\$	287.448.000
	I.V.A. (19%)			\$	54.615.120
	TOTAL			\$	342.063.120

Tabla 15: Cubicaciones y Estimación de Costos, Obra de Recarga Artificial del Sector Chacabuco - Polpaico

Proyecto de recarga artificial del acuífero Sector Pan de Azúcar, Región de Coquimbo

Del análisis realizado se determinó que el sector más favorable para aprovechar los caudales de invierno que lleva el canal Bellavista, corresponde a un tramo de aproximadamente 10 km, que se indica en la Figura 14.

De acuerdo a los antecedentes disponibles, la capacidad del canal Bellavista es de aproximadamente 3,0 m³/s, por lo que se ha estimado que en los meses de invierno, cuando las demandas de riego se reducen, se podría disponer de un caudal del orden de los 0.5 m³/s o superior, si los regantes que usan el embalse Puclaro y los propios del canal lo autorizan.

Se ha determinado que los pozos de infiltración son la alternativa que se utilizará para la recarga de la napa en este sector. Esto considera la perforación de 34 sondajes con una profundidad promedio de 50 m a lo largo del tramo del canal señalado en la Figura 14, los que se ubicarían a una distancia media de 300 m uno de otro. Para facilitar la

recarga se contempla que los pozos queden habilitados con cribas en gran parte de su extensión, desde los 7 m hasta los 45 m (tres tramos de 12 m de cribas unidos por dos tramos de tubo ciego de 1 m de longitud cada uno, para dar estabilidad estructural al sondaje) los 5 m finales se dejan con tubo ciego, como trampa de arena. Cada pozo permitiría infiltrar un caudal estimado, por ahora, de 15 l/s, con lo que se totalizaría un total de recarga de 510 l/s durante 4 meses de invierno (Mayo a Agosto). Ese volumen, en un lapso de 4 meses representa cerca de 5.3 millones de m³, que podrían aprovecharse en la época de estiaje, cuando el riego se intensifica.



Figura 14: Tramo de Canal Bellavista considerado para realizar recarga artificial del acuífero

Se hizo una estimación de costos del proyecto y se presenta en la siguiente tabla.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	UNID.	CANT.	P. UNIT. (\$)	P. TOTAL (\$)
	A. INSTALACIÓN Y LEVANTE DE FAENAS				1.200.000
1	Instalación y levante de faenas.	gl	1	1.200.000	1.200.000
	B. CONSTRUCCIÓN DEL SONDAJE				25.650.000
2	Perforación $D_{\min} = 16''$.	m	50	280.000	14.000.000
3	Entubación cañería acero $D = 12''$, $e = 6,3$ mm.	m	14	80.000	1.120.000
4	Cribas acero al carbono, Slot 40, $D = 12''$	m	36	220.000	7.920.000
5	Suministro y colocación de filtro granular.	m	50	46.700	2.335.000
6	Sello y brocal de hormigón.	gl	1	225.000	225.000
7	Tapa del pozo según plano de proyecto.	gl	1	50.000	50.000
	C. OBRA DE CAPTACIÓN Y FILTRO, Y CASETA				5.000.000
8	Obra de captación, bomba y obra de arte para tratamiento	gl	1	2.000.000	2.000.000
9	Recinto sólido y seguro de 3x6 m, metálico.	gl	1	3.000.000	3.000.000
	D. INTERRUPCIÓN DE FAENAS				960.000
10	Interrupción de faenas	hr	24	40.000	960.000
	F. PLANO DE CONSTRUCCIÓN E INFORME FINAL				230.000
11	Plano de construcción e informe final	gl	1	230.000	230.000
	Subtotal por Pozo			\$	33.040.000
	Gastos grles., imprevistos y utilidades (45%)			\$	14.868.000
	Total neto			\$	47.908.000
	I.V.A. (19%)			\$	9.102.520
	TOTAL			\$	57.010.520
	Subtotal por el Proyecto (34 pozos)			\$	1.123.360.000
	Gastos grles., imprevistos y utilidades (45%)			\$	505.512.000
	Total neto			\$	1.628.872.000
	I.V.A. (19%)			\$	309.485.680
	TOTAL			\$	1.938.357.680

Tabla 16: Cubicaciones y Estimación de Costos, Obra de Recarga Artificial del Sector Pan de Azúcar

4.2.5. Iniciativas en estudio

De acuerdo a lo señalado por el Jefe de la División de Estudios y Desarrollo, la CNR tiene en cartera para el tercer trimestre de 2013 el estudio de proyectos piloto de recarga artificial en las localidades de Lontué (Región del Maule), Polpaico (Región Metropolitana), Popeta, Marchigüe (ambas en la Región de O'Higgins) y Aconcagua (Región de Valparaíso).

4.3. DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS (DOH)

4.3.1. Estudio Recarga Artificial de Acuíferos en el Valle del Aconcagua Usando Derechos Eventuales del Fisco; DOH, Ernesto Brown F.; Enero 2012.

Este informe final tiene por objeto relatar el avance del proyecto de recarga artificial (o recarga inducida) en la cuenca del río Aconcagua, a lo largo del segundo semestre de 2011, y entregar 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.

En el Capítulo 2 de este informe se detallan las alternativas conceptuales de proyectos de recarga inducida, y se comenta las posibilidades que podrían resultar más convenientes para el caso particular de la cuenca del río Aconcagua.

En el Capítulo 3 del informe se desarrollan los análisis hidrológicos para determinar las series de caudales medios mensuales superficiales disponibles para hacer recargas inducidas al acuífero de la primera sección del Aconcagua. Lo anterior, considerando el uso de los derechos eventuales del Fisco en la Primera Sección, y también derechos de los propios regantes, en períodos del año con bajas necesidades de riego. Estas series de caudales están orientadas a generar escenarios de recarga inducida, que puedan ser probados en el modelo integrado de aguas superficiales y subterráneas existentes para la Cuenca del Aconcagua.

En el Capítulo 4, se entrega la justificación y proposición, de iniciar el desarrollo del proyecto, con la construcción y puesta en operación de una instalación piloto en terreno, como primera etapa.

De acuerdo a todos los antecedentes que este Consultor dispone sobre la forma de desarrollar un proyecto de recarga inducida a la napa subterránea, es siempre aconsejable construir y operar primero un proyecto piloto.

A través de la operación de un proyecto piloto, es posible monitorear los distintos parámetros del proceso de recarga, y así tomar medidas correctivas para escalar el proyecto a un nivel operativo y productivo de largo plazo.

El proyecto piloto en la primera sección debería construirse en la zona inmediatamente aguas arriba de la batería de pozos de la D.O.H. ubicada en Curimón. Debería abarcar, una derivación provisoria en el río, un decantador de dimensiones importantes (≈ 2.500 m² de superficie) y dos lagunas en serie de aproximadamente una Há cada una, en superficie.

El equipamiento de monitoreo para hacer el seguimiento de las variables, durante el período de operación de la instalación piloto, debe incluir los siguientes instrumentos e instalaciones:

- Estación fluviométrica en el río, aguas arriba de la captación o derivación. Esta debe estar provista de un sensor tipo piezométrico y un data logger digital.
- Estación fluviométrica en el canal de derivación hacia el decantador. Ésta debe estar construida con una instalación hidráulica, tipo canaleta Venturi o tipo Parshall, para que sea capaz de medir las alturas de agua con un grado de precisión importante, y dotada de una curva de descarga estable.
- Evaporímetro de bandeja dispuesto en una estación hidrometeorológica, con los demás instrumentos de este tipo.
- Termógrafo digital en Caseta Meteorológica.
- Hidrógrafo digital en Caseta Meteorológica
- Pluviógrafo digital en Estación Hidrometeorológica
- Sensor de Niveles de Agua en ambas Lagunas y también en el Decantador. Conectados a Data Logger de registro digital.
- Tensiómetros de lectura directa o digitales conectados a Data Logger. Estos deberían estar ubicados bajo las Lagunas de Recarga, a distintas profundidades. Se sugiere 0,5 m; 1 m; y 2 m.
- Sensores de niveles en profundidad para medir niveles de la napa subterránea, a partir de un nivel de referencia (PR) con altitud determinada por una nivelación cerrada. Las mediciones se harán en sondajes seleccionados de la D.O.H. en la zona de Curimón. Las mediciones deberían hacerse 2 veces al día en cada sondaje y deberán anotarse en planillas confeccionadas para el efecto.

Las mediciones permitirán determinar caudales derivados; tasas de infiltración superficiales; pérdidas por evaporación; ascensos de nivel de la napa subterránea; y en especial, la forma de evolución de estas variables en el tiempo.

Asimismo, las instalaciones deberán permitir determinar la disminución de las tasas de infiltración, para determinar las necesidades y frecuencias de limpieza de los lodos que se acumulen en el fondo de las lagunas. Esto, con el objeto de reponer las tasas de infiltración.

También estas instalaciones piloto podrán ser usadas para determinar la confiabilidad de las estaciones fluviométricas y las posibles necesidades de mejoramiento.

Es posible que estas instalaciones piloto pudieran construirse durante 2012, para operarlas en lo posible con agua de los derechos de aprovechamiento de los regantes durante este invierno. Si eso fuera posible, se podría tener una primera evaluación en la primavera de 2012, y decidir si se escalan las instalaciones con la información disponible, o, se prefiere prolongar el estudio piloto por una temporada adicional.

También, los resultados de la instalación piloto podrán usarse para programar la ampliación del proyecto por etapas, y proyectar un tamaño óptimo final para las instalaciones de recarga inducida. Por supuesto también, este proyecto piloto puede formar parte de la primera etapa del proyecto definitivo.

En todo caso, se recomienda desarrollar en paralelo, una instalación piloto del mismo tipo, en la tercera sección, con efectos demostrativos para los regantes de esta sección, y para determinar los valores de los parámetros de diseño en esta sección. El sitio para el proyecto piloto en la tercera sección, tendría que seleccionarse, en un recorrido de terreno.

Finalmente, en el Capítulo 5, se entregan las principales conclusiones y recomendaciones que surgen del trabajo realizado a la fecha de entrega del informe:

- El proyecto es físicamente factible en la primera sección del río Aconcagua. La capacidad del acuífero de la primera sección, estimamos que existe, y las magnitudes de los volúmenes que pueden recargarse, deben determinarse a través del análisis con el modelo hidrogeológico existente, y luego del proyecto piloto que se propone llevar adelante como primer paso del proyecto. Cabe señalar que esta conclusión quedó plenamente validada por el experto internacional Ingeniero Mario Lluria, con quien se visitó la zona.
- El proyecto debería concebirse como un sistema de recarga inducida distribuida sobre la superficie de la primera sección de riego del Aconcagua. El objetivo de recargar en forma distribuida, es aprovechar mejor la capacidad de almacenamiento del relleno aluvial que conforma el subsuelo en la primera sección.
- Se recomienda como primer paso para llevar adelante el proyecto, construir y operar un proyecto piloto. Esto es también una sugerencia del experto Mario Lluria, y permitirá afinar los parámetros de diseño para las instalaciones definitivas, y para determinar el tamaño máximo del proyecto.
- El proyecto piloto podría ampliarse, y llevarlo a cabo también, en forma concurrente, en la tercera sección. Esto tendría la ventaja de tener un efecto demostrativo para los regantes de esa sección, y serviría para determinar los valores apropiados para los parámetros de diseño en esta zona, si se llegara a decidir que es factible un proyecto de recarga inducida en esta sección.
- Para que la D.O.H. pueda ejercer los derechos de aprovechamiento eventuales que tiene constituidos en las secciones segunda y tercera, es imprescindible perfeccionar esos derechos, para determinar a partir de qué valor de caudal disponible podrían ser ejercidos. Esta es una gestión legal y administrativa que falta por hacer.
- A pesar de que estrictamente no es materia del presente trabajo, se solicitó, por parte de la Inspección Fiscal, que el autor entregase una opinión sobre qué hacer con los pozos existentes que pertenecen a la D.O.H. en las secciones primera y segunda. Al respecto, su opinión es que queden por ahora en la propiedad del Fisco; esto con el objeto que puedan ser usados para extraer agua en situaciones de sequías extremas, como las que han ocurrido en los últimos dos años hidrológicos, para ser entregados a los usuarios más vulnerables. Esto, además, porque el clima en la zona central de Chile, está cambiando, y la rapidez de este cambio se desconoce; y, la tendencia de este cambio en la zona central según los expertos, sería a la baja en los recursos de agua dulce.

4.3.2. Análisis de potencialidad de recarga artificial acuíferos primera y tercera sección valle del Aconcagua; DOH, GeoHidrología Consultores; 2012.

En el marco del estudio "Asesoría Técnica para Plan de Alerta Temprana Pozos DOH Aconcagua y para Análisis de Potencialidad de Recarga Artificial", se realizó un análisis de la factibilidad hidrogeológica de realizar proyectos de recarga artificial en los acuíferos de la primera y tercera sección del río Aconcagua (Tomo II de la asesoría). 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, DICTUC 2009).

Para el análisis del efecto de la recarga artificial en la primera sección se realizó un total de 7 simulaciones considerando distintas zonas de infiltración, caudal de infiltración y caudal de extracciones desde pozos. El primer escenario consideró zonas de infiltración distribuida en el lecho del río próximo a la localidad de Curimón, en el estero Pocuro y en el estero San Francisco (simulaciones 1A). El siguiente consideró zonas de infiltración ubicadas a lo largo del río Aconcagua entre la ciudad de Los Andes hasta Curimón (simulaciones 1B y 1C). Además, para cada zona de infiltración, se consideró caudal de infiltración producto del ejercicio de los derechos eventuales DOH (1A-i, 1B-i y 1C-i) y de dichos derechos más el sobrante de los regantes (1A-ii, 1B-ii y 1C-ii). Finalmente, en las simulaciones de las series 1A y 1B se consideró que sólo operaban pozos con derechos otorgados según el catastro de la DGA 2011, mientras que en las simulaciones 1C se incorporaron además todos los pozos con derechos solicitados de la DOH en la primera y tercera sección, lo que a la fecha se encuentran en trámite y no han sido resueltos por parte de la DGA.

Los resultados muestran que en el acuífero de la primera sección el volumen del almacenamiento crece de manera sostenida, con un aumento que varía entre 125 a 740 millones de m³ en el mejor escenario simulado (Simulación 1B-ii). En cuanto a las simulaciones de la serie 1C, se obtuvo que la recarga artificial logra mantener la satisfacción de la demanda por encima del 90% durante los períodos hidrológicos normales, sin embargo, durante los períodos secos, la recarga artificial no es suficiente para mantener el nivel de bombeo en el acuífero y la satisfacción decae de forma importante, llegando en algunos casos hasta el 50%.

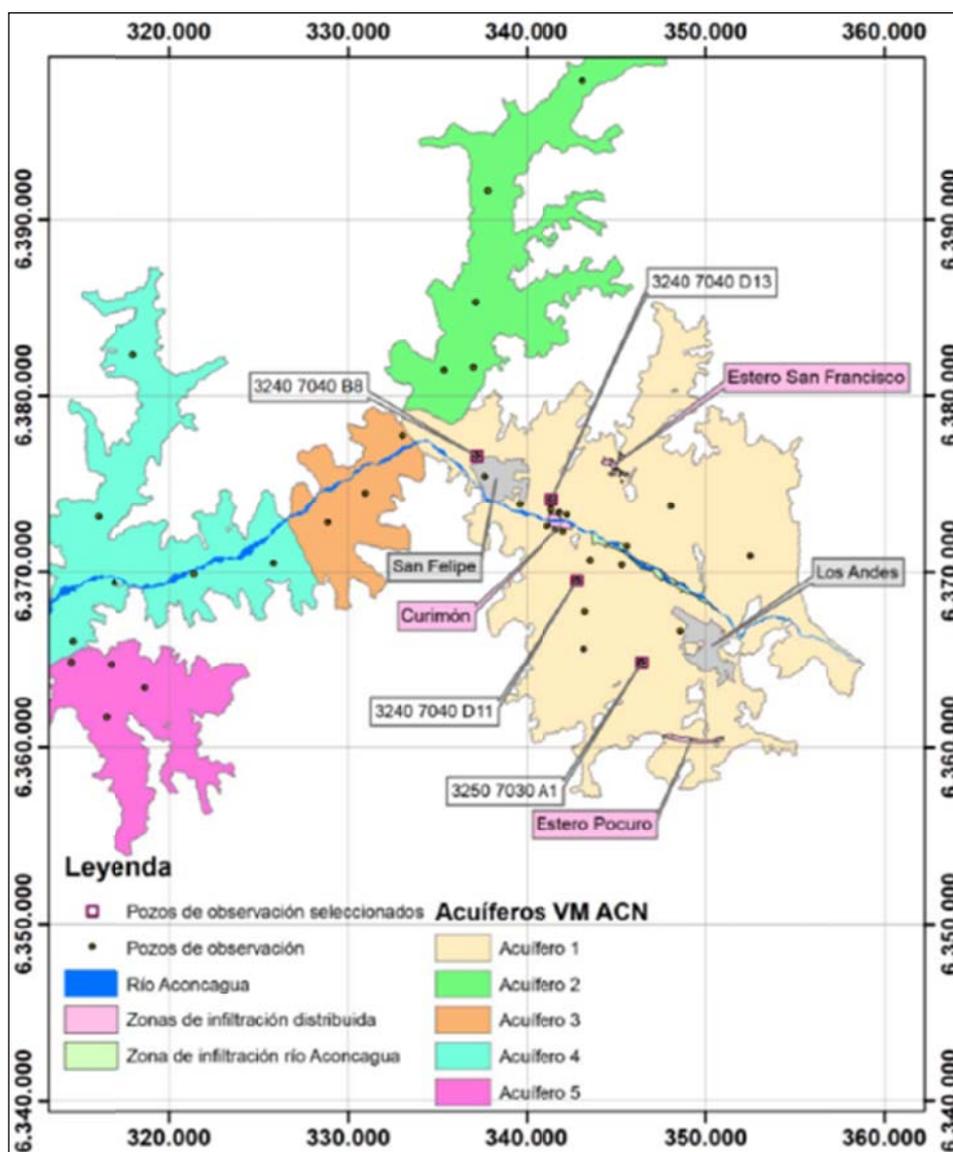


Figura 15: Ubicación de zonas de infiltración y de pozos de observación utilizados, primera sección.

En cuanto a la tercera sección, se realizó una simulación para analizar el comportamiento del acuífero frente a la recarga artificial. En esta sección, gran parte del acuífero en el valle central se encuentra a menos de 5 m de profundidad, lo que restringe la ubicación de zonas adecuadas para la infiltración artificial y sólo en la cercanía de La Cruz (ubicado en el acuífero 7 del modelo numérico), entre las ciudades de La Calera y Quillota, presenta condiciones adecuadas para realizar recarga artificial al acuífero. Los resultados muestran que el acuífero 7 no mantiene un aumento sostenido en su volumen almacenado en el tiempo, en parte debido a que la infiltración se efectúa en forma intermitente y por la poca profundidad del acuífero en esta zona, lo que provoca afloramientos superficiales durante los eventos de infiltración artificial.

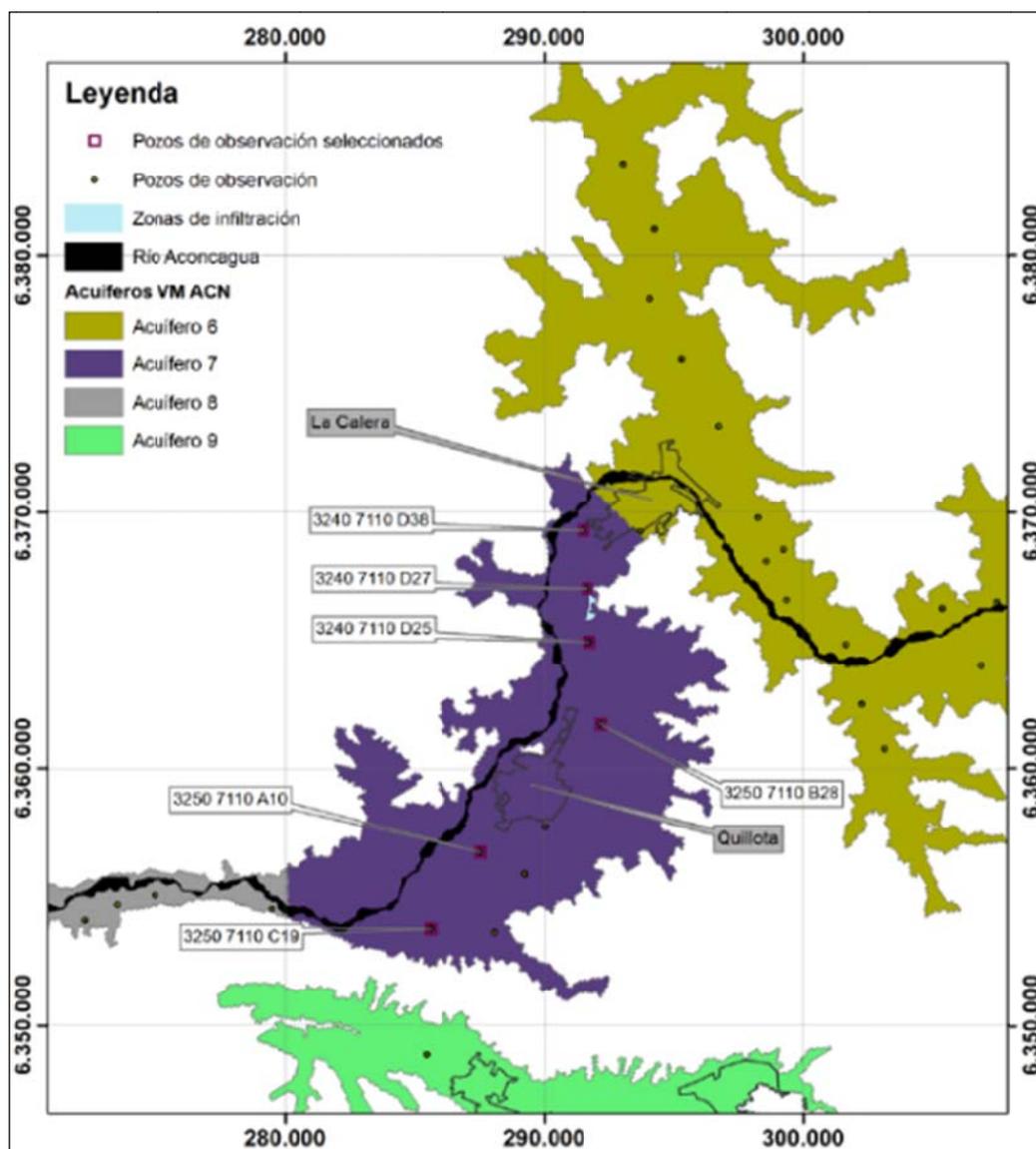


Figura 16: Ubicación de zonas de infiltración y de pozos de observación utilizados, tercera sección.

En base a los resultados obtenidos, se presenta en el informe un diseño conceptual de una prueba piloto para la primera y tercera sección. Para ello se contó con la participación del Sr. Mario Lluria, experto internacional con más de 40 años de experiencia en las áreas de recarga artificial, geología y geofísica; actualmente trabaja en la empresa consultora Hydrosystems Inc. Esta fase tuvo dos objetivos: a) escoger la zona o sector donde se realizarán las pruebas pilotos y b) diseñar conceptualmente la prueba piloto que permita diseñar el sistema de recarga definitivo.

Finalmente, considerando que los resultados son auspiciosos, en particular en la primera sección del río Aconcagua, se realizó un diseño conceptual de las instalaciones requeridas para el desarrollo de una prueba piloto de recarga artificial.

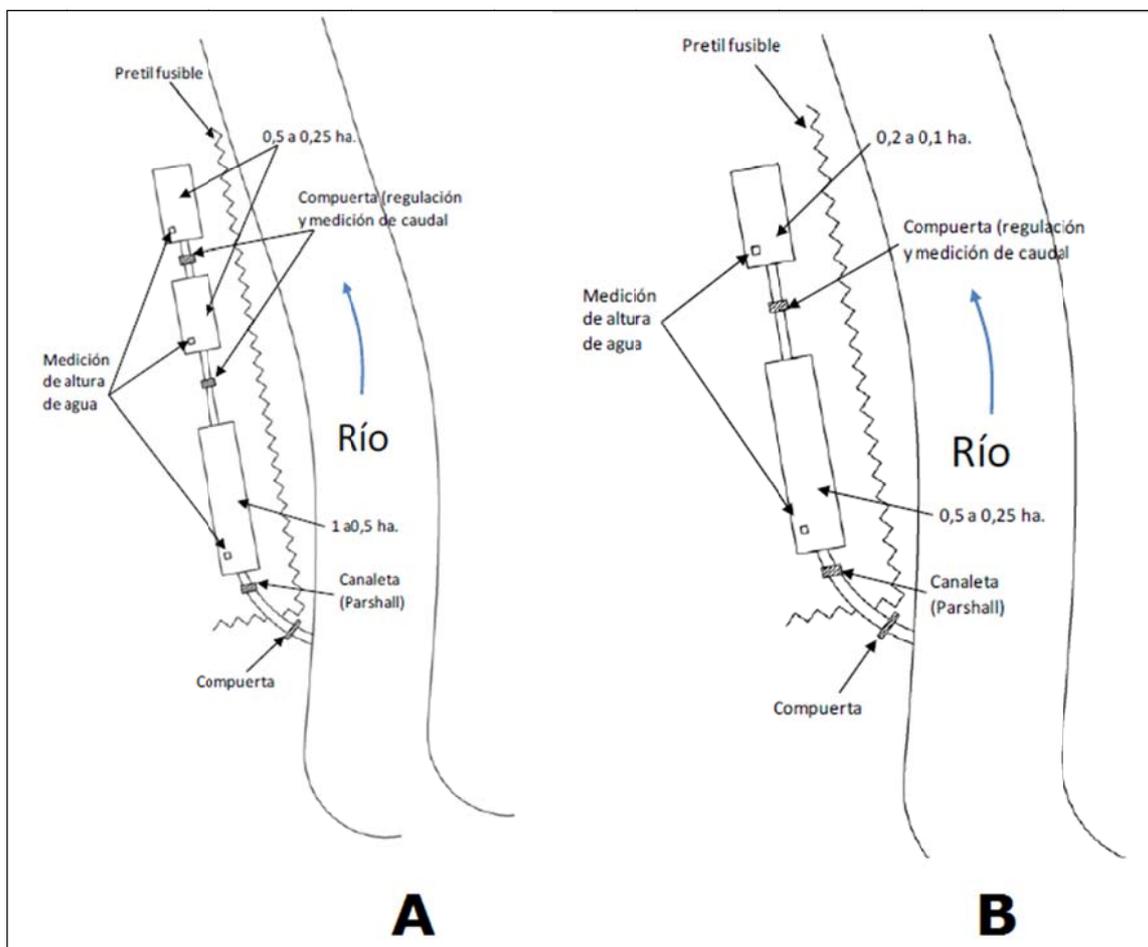


Figura 17: Vista en planta del diseño preliminar de balsas de infiltración para 1ra sección (A) y 2da sección (B)

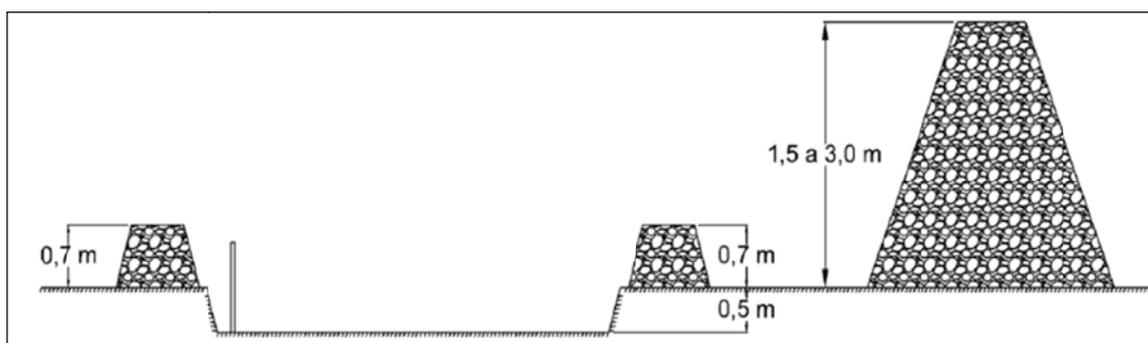


Figura 18: Corte esquemático de la construcción de balsas de infiltración

Así, los resultados más importantes y principales conclusiones del informe son:

- En base a los resultados obtenidos se concluye que en la primera sección es factible la realización de un proyecto de recarga artificial dado que, tanto el volumen del almacenamiento del acuífero, como el afloramiento en el río, aumentan en forma sostenido a través del tiempo de simulación. Sin embargo,

los resultados en la tercera sección no muestran un beneficio importante debido, en parte, por la intermitencia del caudal destinado para la infiltración y también por la poca profundidad del acuífero en esta zona, lo que provoca afloramientos excesivos durante los eventos de infiltración. Sin perjuicio de lo anterior, los resultados obtenidos no son concluyentes respecto de la tercera sección y no se puede descartar la factibilidad de implementar recarga artificial en dicha zona.

- De todas las simulaciones realizadas en la primera sección, los mejores resultados en base a todas las variables evaluadas (flujo subterráneo desde la primera hacia la segunda sección del río Aconcagua, afloramiento en el río Aconcagua entre la primera y segunda sección del río, volumen almacenado en el acuífero 1, niveles en pozos de observación, distribución espacial del ascenso en el nivel de la napa y demanda satisfecha en el acuífero 1) es la simulación 1B-ii, esto es, infiltración a lo largo del lecho del río Aconcagua entre Los Andes y Curimón, infiltrando los derechos eventuales que la DOH posee en la parte alta del río Aconcagua más los derechos no utilizados por la agricultura durante los meses sin riego. En este escenario, el volumen que potencialmente es posible de extraer del acuífero producto de la infiltración artificial varía entre 125 y 740 millones de m³/año, que corresponde al aumento que experimenta el almacenamiento del acuífero sobre la simulación base a lo largo del tiempo de simulación.
- La simulación 1B-ii también es beneficioso desde la perspectiva económica pues no requiere de obras de conducción del agua de infiltración. Además es más eficiente pues la conductividad hidráulica es mayor en el lecho del río Aconcagua, lo que significa que es posible infiltrar más agua en una superficie menor respecto de zonas con conductividad hidráulica más baja.
- El efecto del ejercicio de todos los derechos solicitados por la DOH en la batería de pozos de Curimón es mitigado por la infiltración artificial durante los períodos hidrológicos normales, sin embargo, durante los períodos de sequías, la satisfacción de la demanda disminuye en manera importante, alcanzando niveles de hasta 50% en algunos casos. Cabe señalar que debido a esto, los resultados obtenidos de niveles de la napa y afloramientos en el río de las simulaciones 1C-i y 1C-ii en los años con baja satisfacción de la demanda, están sobreestimados, debido a que en esos tiempos la pérdida de extracciones en el acuífero 1 es mayor al aceptado.
- Los resultados en la tercera sección muestran beneficios limitados de la recarga artificial, con un aumento promedio del volumen almacenado de 5,9 millones de m³/año y de 0,8 m³/s en el afloramiento del río con respecto a la simulación base, en donde se observan varios años sin efecto alguno debido a la intermitencia del caudal de la infiltración artificial.
- Las visitas a terreno realizadas, con la participación del experto internacional Sr. Mario Lluria, permitieron concluir que las características de los suelos son adecuados para la implementación de la metodología de recarga artificial, en particular en la primera sección. Junto a ello, se definió un diseño preliminar para implementar una prueba piloto.

4.3.3. Estudio e Implementación de un Plan Piloto de Recargas Artificiales a los Acuíferos del Valle del Aconcagua; DOH, GeoHidrología Consultores; en ejecución.

Actualmente, la DOH está desarrollando un proyecto de recarga artificial a los acuíferos del valle del Aconcagua, con la finalidad de aprovechar la capacidad de los acuíferos para almacenar volúmenes de agua excedentes que se generan en años normales y húmedos, para luego aprovecharlos en períodos que se requieran.

En este contexto la DOH adjudicó a GeoHidrología Consultores el proyecto "Estudio e Implementación de un Plan Piloto de Recargas Artificiales a los Acuíferos del Valle de Aconcagua", paso siguiente a los variados estudios realizados por la DOH de prefactibilidad técnica y económica para el desarrollo de sistemas de recarga artificial de gran escala.

El desarrollo de este estudio tiene el objetivo de realizar pruebas físicas que permitan validar o mejorar los parámetros y variables teóricas, de modo de contar con el conocimiento necesario para diseñar, construir y operar sistemas de recarga artificial de acuíferos a escala industrial, en el valle del Aconcagua.

Las actividades del proyecto se han dividido en cinco etapas enumeradas a continuación:

- Etapa I: Recopilación de Antecedentes, Evaluación y Diseño Trabajos Terreno
- Etapa II: Trabajos de Terreno y Diseño de Ingeniería del Plan Piloto
- Etapa III: Implementación y Puesta en Marcha
- Etapa IV: Monitoreo, Control, Medición y Evaluación de Variables
- Etapa V: Análisis, Conclusiones, Recomendaciones e Informe Final

A la fecha de redacción del presente informe de recopilación de iniciativas, se han concluido con éxito las etapas I y II del proyecto. Está considerado que este proyecto finalice en marzo de 2014.

4.3.4. Iniciativas en estudio

De acuerdo a la recopilación de información realizada, actualmente la DOH no tiene iniciativas de recarga artificial en estudio.

4.4. OTRAS INSTITUCIONES PÚBLICAS

4.4.1. Instituto Nacional de Hidráulica (INH)

Actualmente, el INH está desarrollando el estudio "Caracterización de la cuenca del río San José para la implementación de un programa de recarga artificial de acuíferos", cuyos aspectos generales se detallan a continuación:

Nombre	Caracterización de la cuenca del río San José para la implementación de un programa de recarga artificial de acuíferos
Valor del Estudio	\$168.066.000.-
Fecha de Inicio	Agosto 2012
Fecha Estimada de Término	Agosto 2014
Financiamiento	Innova Chile Corfo
Mandante	Gobierno Regional de Arica y Parinacota
Ejecutor	Instituto Nacional de Hidráulica
Coejecutor	DGA Regional

Tabla 17: Detalles del estudio

Este estudio tiene como objetivo general caracterizar la cuenca del Río San José para la implementación de un programa de Recarga Artificial de Acuíferos.

Los objetivos específicos del estudio son los siguientes:

- Generar información técnica respecto a la calidad y disponibilidad del recurso hídrico factible de recargar, metodologías de recarga aplicables e identificación de potenciales zonas de infiltración.
- Desarrollar un modelo Hidrogeológico que permita una mejor conceptualización del comportamiento del acuífero en el largo plazo bajo un escenario de recarga artificial
- Proponer un diseño a nivel de perfil de Planta Piloto de Recarga artificial a implementar

Las etapas consideradas en el desarrollo del estudio y su estado de avance a noviembre de 2013 son:

- ETAPA I: DESARROLLO DEL BIEN
 - Diagnóstico de la situación actual: completa.
 - Análisis de los aspectos legales: en ejecución.
 - Caracterización del agua a infiltrar: en ejecución (modelo de recarga, caracterización de la calidad).
 - Caracterización del acuífero receptor: completa.

- Plan de Monitoreo de Niveles y Calidad de aguas: en ejecución, 70% de avance.
- Modelo Conceptual de funcionamiento: en ejecución, 90% de avance.
- Identificación de Potenciales Zonas de Infiltración y metodologías de Recarga: en ejecución, 60% de avance.
- Modelo Hidrogeológico Numérico: en ejecución.
- Evaluación Técnico-económica: en ejecución.
- Diseño perfil planta piloto: en ejecución.
- ETAPA II: TRANSFERENCIA DE RESULTADOS
- ETAPA III: DIFUSION A LOS BENEFICIARIOS
 - Lanzamiento: realizado.
 - Seminarios, Talleres de Difusión
 - Sitio WEB: en diseño, pronto a publicar.

Como se mencionó, este estudio está actualmente en desarrollo y se espera que a Agosto de 2014 se cuente con el informe final publicado.

4.4.2. Universidad Católica del Norte

Actualmente, la Universidad Católica del Norte, a través del Centro de Estudios en Derecho de Recursos Naturales, está desarrollando el estudio "Evaluación técnica, económica, ambiental y jurídica, para la recarga artificial de acuíferos. Análisis específico para la provincia de Elqui, Región de Coquimbo".

El objetivo general de este estudio es generación de una herramienta de apoyo, a través de una herramienta SIG, para la toma de decisiones desde el punto vista, técnico, jurídico, económico y ambiental; sobre la recarga artificial de acuíferos en la provincia de Elqui, región de Coquimbo.

Los objetivos específicos del estudio son los siguientes:

- Establecer propuestas y soluciones técnicas tipo para la recarga artificial de acuíferos de la región de Coquimbo, de acuerdo a sus características hidrogeológicas.
- Realizar análisis jurídico –fundamentalmente comparado- y elaborar recomendaciones en este ámbito de las propuestas tipos desarrolladas.
- Realizar análisis económico y elaborar recomendaciones en este ámbito de las propuestas desarrolladas.
- Realizar análisis medioambiental y elaborar recomendaciones en este ámbito de las propuestas desarrolladas.
- Elaborar, transferir y difundir una herramienta de apoyo (SIG) para la toma de decisiones relativas a la alternativa de recarga artificial de acuíferos.

Al momento de la redacción de este informe se estaba a la espera de envío de más detalles por parte del equipo que desarrolla el estudio.

4.5. OTRAS INICIATIVAS DE RECARGA ARTIFICIAL

4.5.1. Proyecto de recarga artificial en el acuífero de Colina; Sociedad de Canal del Maipo²².

Introducción

Tras la recopilación de la base de documental, así como de expedientes, libros, literatura y la experiencia adquirida en el extranjero y en Chile, Sociedad de Canal de Maipo (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 condiciones hidrogeográficas a macro escala basadas en expedientes que permitieron generar un modelo de cómo eran los acuíferos.

Tras esto, se realizó una campaña de aguas en la que se observó las fuentes de agua, adónde se debía llegar con el recurso y se estudiaron las soluciones factibles, conceptuales y modeladas, así como las factibilidades técnicas. Posteriormente, se realizó una revisión de la legislación vigente y la valoración de costos como etapa inicial, pues si bien existían condiciones favorables para poder inyectar, muchas veces el valor económico mostró que el sitio a infiltrar implicaba una inversión muy alta de acuerdo a los montos que solicitaba el dueño del predio para su arriendo.

Tras esta fase, se definieron dos zonas primarias y secundarias de recargas, en las cuales estaba el sector de Rinconada de Maipú y Lipangue, decidiéndose trabajar finalmente en la zona de Colina.

Disponibilidad de Recursos

A través del sistema de recarga mediante infiltración gravitacional en pozos, el rango de recarga a infiltrar fue de 20 litros por segundo como plan piloto.

Existen derechos que se conducen por el canal Batuco que podrían ser utilizados a lo largo de todo el año, con la idea de capturar estos recursos en un embalse subterráneo de manera de generar, de acuerdo a la legislación vigente, un derecho de aprovechamiento provisorio de aguas subterráneas.

En torno a las condiciones hidrogeológicas se catastraron la totalidad de los expedientes disponibles de aguas subterráneas de la zona, de manera de generar un mapa geológico adhoc para la modelación. Se utilizó el software Groundwater Modeling System (GMS), el cual incorpora la creación del perfil hidrogeológico y además posee Modflow para la solución de flujo.

²² http://alhsudchile.files.wordpress.com/2012/12/revista-vertiente_edicic3b3n-2012.pdf

En la Figura 19 pueden observarse las curvas de altura del acuífero, paso previo a la construcción del catastro de 4 pozos identificados con numeración de la inscripción de la Dirección General de Aguas (DGA).

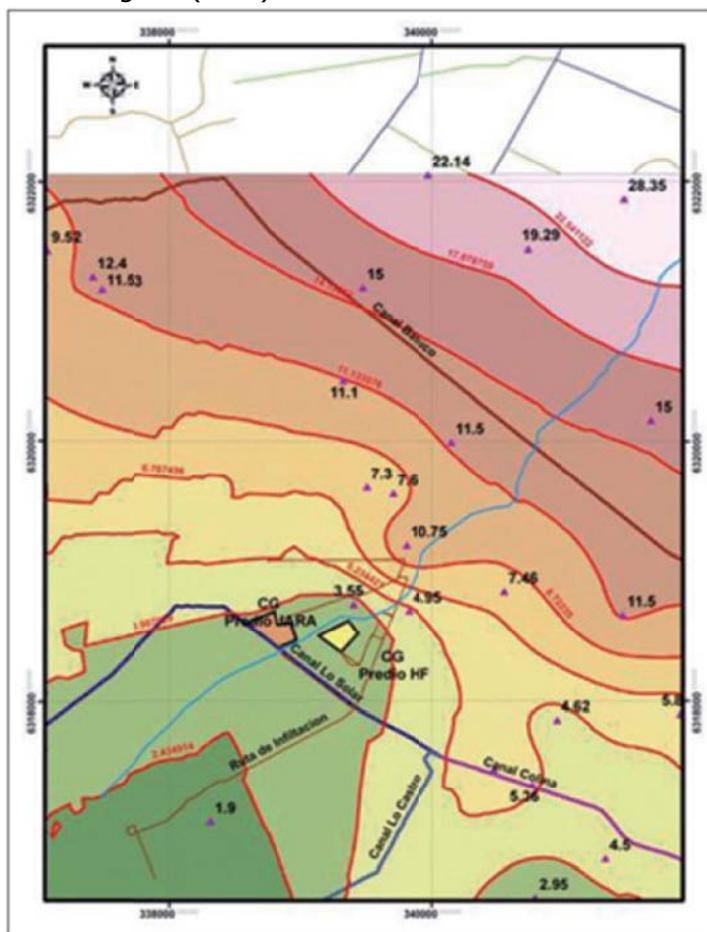


Figura 19: Curvas de Altura del Acuífero

En la Figura 20 se ve el perfil del pozo y el perfil geológico de terreno, en el cual se interpolan los pozos y se genera una maqueta tridimensional en la que el arcilla se ve color rojo y la arena o grava en celeste. Una vez estimado el lugar más adecuado de la inyección, el segundo paso fue calcular la disponibilidad o cantidad del caudal susceptible de ser infiltrado y modelar una carga constante sobre el pozo (ver Figura 21).

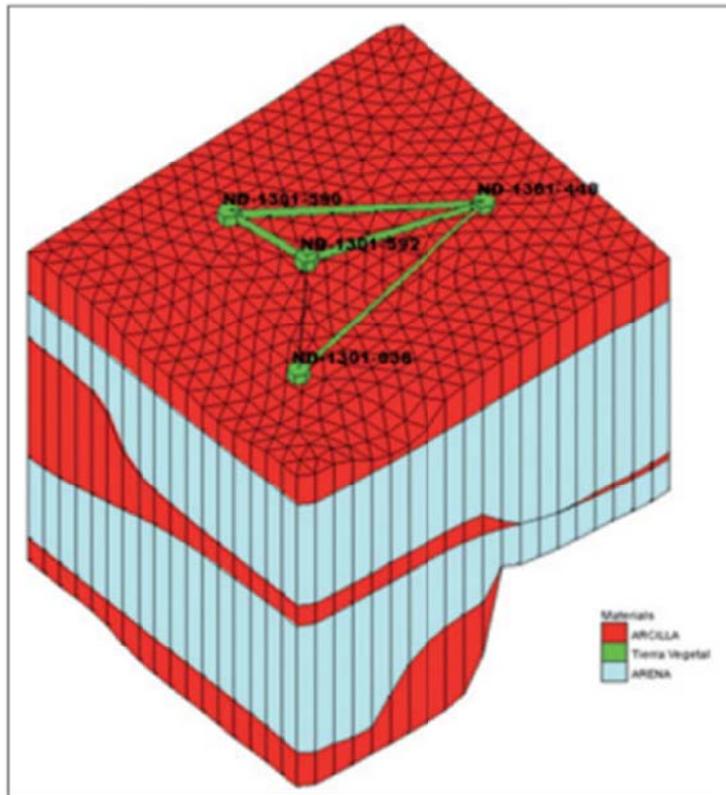


Figura 20: Perfil pozo y perfil geológico del terreno

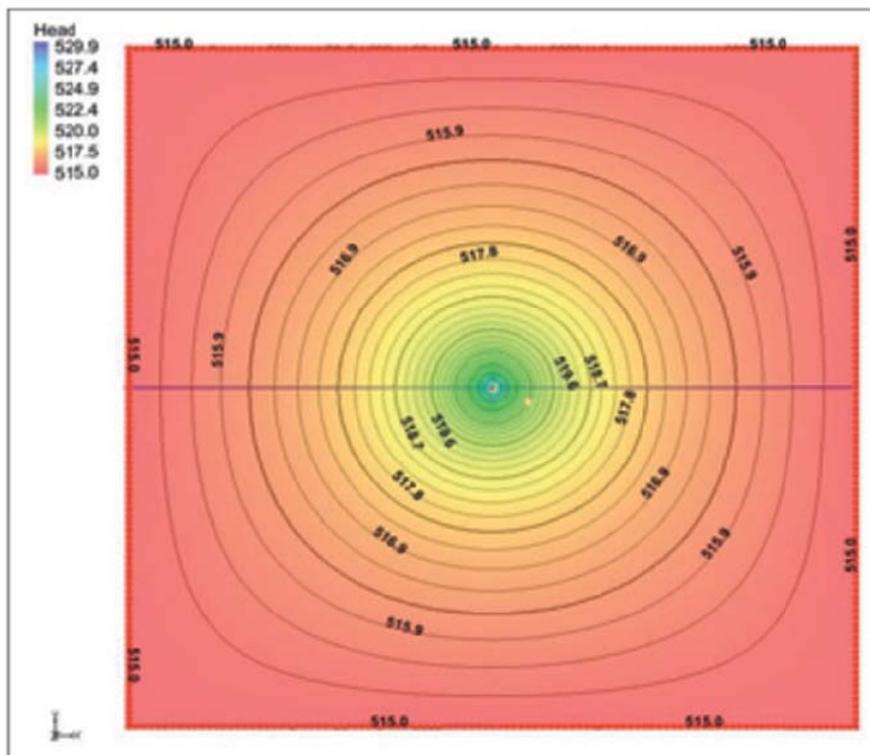


Figura 21: Modelación en GMS

Calidad de Aguas

El Decreto Supremo 46 de 2002 señala en su artículo 7 que “el contenido natural de la zona saturada del acuífero excede al límite máximo permitido en este decreto, el límite máximo de la descarga será igual a dicho contenido natural”, sin embargo, la condición se complica en referencia a lo citado en el artículo 8, el cual establece que “no se podrá emitir directamente a la zona saturada del acuífero, salvo que la emisión sea de igual o mejor calidad que la del contenido natural”.

Ante la interrogante en torno a la calidad del agua de la fuente y del acuífero, la **Tabla 18: Calidad de Aguas** entrega valores promedio basados en un muestreo de agua de 2009, 2010 y 2011.

Elementos	Max. Permitido DS. 46, vulnerabilidad Media	Canal Batuco	Pozo Fundo Santa Inés
Aluminio (mg/l)	5	7,36	<0,01
Boro (mg/l)	0,75	0,17	<0,01
Coliformes Totales (NMP/ 100 l)	-----	160000	<2
Cr Hexavalente (mg/l)	0,05	0,02	<0,01
DBO5 (mg/l)	-----	3,75	3,34
Fluoruro (mg/l)	1,5	0,1	<0,1
Hierro (mg/l)	5	10,1	<0,03
Fósforo (mg/l)	-----	0,36	<0,01
Manganeso (mg/l)	0,3	0,15	<0,01
pH	6 – 8,5	7,96	7,25
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	-----	250	6
Sulfatos (mg/l)	250	181,7	47,7

Tabla 18: Calidad de Aguas

Es necesario un sistema de tratamiento convencional, es decir, un costo de inversión en una planta de tratamiento de agua con todas sus etapas: Floculación, Decantación, Filtración y Desinfección. Y además, trabajar para la generación de una campaña de monitoreo de aguas de pozos para diseño y operación de la planta piloto.

Dificultades y desafíos

El precio de la tierra en la zona ha imposibilitado compatibilizar el criterio técnico con el económico para lagunas de infiltración en el acuífero de Santiago. Además, la definición administrativa del acuífero muchas veces no tiene una razón física y los acuíferos tienen como límite en común una carretera, lo que no condice con una separación geológica o física. Las Áreas De Restricción Como Mecanismo De Protección De Los Recursos Hídricos Subterráneos

Sumado a lo anterior, se debe considerar que recargar directamente a la napa involucra un costo no menor de tratamiento de las aguas, siendo esto una limitante importante por el tiempo de construcción y porque aumenta los costos de mantenimiento y operación de una planta de recarga convencional, por ejemplo, en base a lagunas de infiltración en donde el suelo hace la remediación.

Ante el escenario anterior, la interrogante que queda pendiente es cómo garantizar el uso en diferentes puntos administrativos del acuífero. Y en torno a los desafíos a futuro, las tareas presentes son las de refinar el análisis de calidad de agua para discriminar elementos asociados a material suspendido de aquellos disueltos, la evaluación de alternativas técnicas de tratamiento y la continuación del modelamiento para caracterizar la evolución posible de domo de infiltración y estrategias de recuperación-monitoreo.

Conclusiones Finales

Resulta necesario trabajar en torno a la mejoría en la obtención de la información teniendo mayor disponibilidad de los expedientes de pozos e información bibliográfica, tanto del mundo público como privado. Además, legislar sobre las condiciones de calidades de agua, específicamente referidas a las infiltraciones artificiales.

Además, se debe fomentar el desarrollo de estudios de acuíferos y generar cierta flexibilidad en el traslado de derechos. Finalmente, legislar respecto de la explotación de las aguas infiltradas, volumen infiltrado y volumen extraído, es decir, utilizar el acuífero como un verdadero embalse.

Finalmente, lo que se busca lograr con esta experiencia es poder extender las superficies de riego y a su vez disminuir la estacionalidad de este recurso. Es necesario realizar infiltración artificial y natural y no trabajar en ello recién cuando un acuífero comienza a secarse y se intenta recuperarlo.

Referencia

Se presentan mayores detalles de este proyecto en la memoria de título "Recarga Artificial de Acuíferos Mediante Pozos de Infiltración" (U de Chile, 2012), cuyo autor es Freddy Javier Cortez Salvo y está disponible para consulta en <http://www.tesis.uchile.cl/handle/2250/112265>.

4.5.2. Proyecto de recarga artificial en el acuífero de Santiago; Sociedad de Canal del Maipo.

En la Tercera Jornada Técnica De ALHSUD Chile, denominada "Recarga artificial y derechos de aprovechamiento de aguas" y realizada el día 24 de Septiembre de 2013, fueron presentados los alcances del Proyecto de Recarga Artificial en el Acuífero de

Santiago, que actualmente desarrolla la Sociedad de Canal del Maipo (SCM)²³. A continuación, se presentan los principales aspectos tratados en dicha presentación.

Este proyecto ha sido encargado por la SCM a Geohidrología Consultores y los objetivos del proyecto son:

- Realizar una experiencia piloto de recarga artificial en el acuífero de Santiago.
- Establecer los requerimientos operacionales para el desarrollo de proyectos a mayor escala.
- Estudiar el impacto de la recarga sobre el acuífero.

En términos generales, se señaló en la presentación que corresponde a un proyecto piloto de recarga artificial que utilizará aguas de la red de la SCM (río Maipo). Como sistemas de recarga contempla balsas de infiltración y pozos de infiltración en la zona no saturada. Además, será diseñado para recargar hasta 70 l/s de manera continua y contempla una planta de tratamiento de las aguas infiltrar.

El proyecto piloto está ubicado en el Fundo La Platina, que está emplazado en terrenos correspondiente al Campus Antumapu de la Universidad de Chile.



Figura 22: Ubicación proyecto de recarga artificial Fundo La Platina

Respecto del acuífero, este corresponde a la zona suroriente del acuífero de Santiago y sus principales características se presentan a continuación:

- Acuífero libre dominado por depósitos aluviales de granulometría gruesa en matriz areno-arcillosa.

²³ http://alhsudchile.files.wordpress.com/2013/10/cristian-ortiz_recarga-artificial-de-acuc3adferos-en-chile-proyectos-en-ejecucic3b3n-en-acuc3adferos-de-aconcaqua-doh-y-santiago-scm.pdf

- Nivel freático se ubica entre 140 y 150 m de profundidad.
- Geofísica evidencia la presencia de dos capas de material menos resistivo a 40 y 100 m de profundidad (arcillas?).



Figura 23: Imagen de terreno donde se emplaza el proyecto piloto

Previos a la determinación del terreno de emplazamiento de las obras se realizaron los siguientes trabajos previos:

- Prospecciones geofísicas utilizando TEM y Nano TEM
- Ensayos de infiltración utilizando infiltrómetro de doble anillo
- Modelación hidrogeológica de la zona no saturada y del acuífero
- Muestras de suelo de cantera de ripios y sondajes
 - Análisis granulométrico

- Curva de succión

En cuanto al estado actual del proyecto piloto, se señaló que se han realizado los trabajos de terreno, que incluyen las prospecciones geofísicas, ensayos de infiltración, curva de succión y análisis granulométrico.

Luego, los pasos a seguir en el desarrollo del proyecto se considera la realización de perforación de sondajes, realizar la modelación del sistema y posteriormente su construcción.

Las conclusiones finales de lo presentado fueron:

- Se están desarrollando proyectos piloto a escala adecuada para evaluar el potencial de recarga artificial.
- El diseño a escala industrial requiere realizar pruebas piloto para determinar principalmente los caudales de recarga y los parámetros de operación.
- Pruebas pilotos requieren de una serie de trabajos y mediciones especiales:
 - Red de medición del agua subterránea
 - Determinación de tasas de infiltración superficial
 - Estudio hidrogeológico local
 - Modelación No Saturado y Saturado
 - Medición de caudales, evaporación y precipitación

4.6. OTRAS REFERENCIAS

En este apartado se presentan otros trabajos, principalmente tesis o memorias de título, relacionados en mayor o menor medida con la recarga artificial de acuíferos. Se presenta un resumen de ellas y el vínculo al texto completo cuando está disponible.

- **“Recarga Artificial de Acuíferos en el Sector alto de la Cuenca del Río Mapocho”.** Walter Wilmans Cifuentes. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. Santiago, 2001.

Resumen: En las últimas décadas, la tendencia al aumento de consumo de agua potable indica que la dotación crecería del orden del 10% al año 2025. Para compensar ese efecto, las empresas sanitarias deberán tomar resguardos, en cuanto a la cantidad y seguridad del abastecimiento. Teniendo en cuenta que el recurso agua es un bien cuya disponibilidad va a ser cada vez más escasa, la recarga artificial de acuíferos se presenta como una alternativa muy importante e innovadora a nivel nacional, desde la perspectiva del manejo de los recursos hídricos. Un sistema de recarga artificial en la zona alta del río Mapocho, presenta una serie de factores favorables para su ejecución, tales como: la existencia de caudales superficiales posibles de ser inyectados (500 [l/s] con una probabilidad de excedencia del 60 %), factores hidrogeológicos y morfológicos. El estudio tiene por finalidad determinar el cambio que experimentaría el acuífero al largo plazo con una obra de recarga, determinando caudales seguros de explotación y evaluar la posible contaminación del acuífero.

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

Resumen: Uno de los métodos para estimar la recarga de un acuífero se realiza por medio de aforos diferenciales. La validez de este procedimiento depende de la exactitud de las estimaciones de los caudales, ya que en muchos casos los errores producidos son comparables con las estimaciones de la recarga, lo que invalida los resultados. El objetivo más importante de este Trabajo de Título 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 que se pretende evaluar es el Cloruro de Sodio, el cual presenta ventajas económicas, de manejo, almacenamiento, etc.

Existen distintos instrumentos que permiten medir el caudal pasante en un cauce, los cuales presentan distintos niveles de exactitud y condiciones de operación. Entre ellos encontramos sistemas convencionales, como: molinetes y tubos de Pitot, sistemas donde se interviene el cauce, como: vertederos y canaletas, sistemas modernos como los ADP y metodologías de aforo químico.

Se hizo un análisis breve de cada uno de estos sistemas de medición, identificando los posibles factores de error.

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 estas experiencias se midió el caudal con diferentes condiciones escurrimiento. Además se analizaron temas como mezcla a lo largo y ancho del cauce, influencia de compuertas y resaltos en la mezcla, efecto de inyectar el trazador en puntos con regímenes de escurrimiento distintos, entre otros. En los resultados se pudo ver que no se logra la mezcla completa en el canal, debido a que el largo de éste no es suficiente. Por otro lado se obtuvieron diferencias importantes en los valores de caudal con los dos métodos de medición, producidas posiblemente por un problema en el sistema de adquisición de datos.

En terreno se trabajó en un canal de bajo caudal y de dimensiones pequeñas, de forma de poder aplicar fácilmente distintos métodos de medición. Las experiencias realizadas fueron principalmente aforos químicos con inyección instantánea y se compararon los resultados con mediciones hechas con un molinete. Se pudo apreciar una diferencia entre estos caudales, producidas por un problema en la estimación de la velocidad media del flujo. Además se pudo apreciar una baja influencia de la vegetación en el transporte del trazador.

Se pudo concluir que el método de aforo químico presenta problemas de aplicabilidad para cauces y caudales grandes, debido a los equipos y personal necesario. Se pudieron analizar temas de mezcla, donde se vió la conveniencia de inyectar el trazador en zonas de escurrimiento de torrente y en lo posible en lugares con resaltos que favorezcan la mezcla. No fue posible validar las metodologías aplicadas para la estimación de la recarga de un acuífero, debido a problemas con los equipos. Se recomienda la experimentación con otros equipos y trazadores, así como la realización de experiencias en cauces con mayores caudales y dimensiones.

Disponible en: <http://tesis.uchile.cl/handle/2250/104656>

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

Resumen: El objetivo general del presente trabajo de título es modelar y analizar el efecto que tiene la recarga artificial sobre el funcionamiento y la operación del dren Las Vegas. Se entiende por recarga artificial la acción de ejecutar obras que generen un transporte de agua desde la superficie hasta la napa subterránea, en condiciones en que sin intervención directa dicho transporte nunca hubiera ocurrido.

Se estudia 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 corresponde 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. El dren Las Vegas aprovecha el angostamiento del valle para establecerse como una barrera que intenta captar el mayor caudal posible. Para aumentar el caudal captado por el dren existen las llamadas lagunas de infiltración, que tienen por misión aprovechar el agua sobrante de la bocatoma e infiltrarla al acuífero.

La experiencia de recarga artificial en la Planta de Tratamiento de Agua Potable Las Vegas es una de las pocas que está en funcionamiento pleno en Chile, pero aun así tiene mucho por donde mejorar su gestión. En el mundo la recarga artificial es utilizada ampliamente para administrar los recursos hídricos, desde zonas áridas como el medio oriente hasta zonas costeras y con ríos abundantes como Ámsterdam y París.

Se recopilaron los antecedentes pertinentes para poder construir un modelo hidrogeológico utilizando Visual MODFLOW, entre ellos, topografía del recinto, estudios hidrogeológicos y datos hidrológicos. Las fuentes principales de información fueron estudios de terreno realizados en el momento de construcción del dren y modelos hidrogeológicos de la cuenca del río Aconcagua encargados por la Dirección General de Aguas. El modelo resultante fue ajustado para que representara fielmente lo observado en terreno entre los meses de enero de 2008 y marzo de 2009.

El modelo ajustado fue utilizado para establecer la tasa de recarga para cada sector del recinto donde podrían emplazarse nuevas lagunas de infiltración. Posteriormente se calcula la superficie necesaria para construir dichas lagunas, teniendo en cuenta consideraciones de acceso y mantención. Además, se calcula la cantidad de lagunas necesarias para distintos escenarios de demanda al dren.

Asumiendo un valor deseable de caudal captado por el dren de 1.250 l/s se estima que se necesita inundar 17 [Há], equivalente aproximadamente a 50 lagunas pequeñas.

Se concluye que puntos interesantes de estudiar serían: la calidad del agua infiltrada y como afecta al acuífero, la precisión de los datos con los que se trabajó y el grado de influencia de ellos en el resultado, la factibilidad de realmente establecer un régimen de mantención serio y sus posibles implicancias económicas.

Disponible en: <http://tesis.uchile.cl/handle/2250/103531>

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

Resumen: El sostenido aumento de la población y de las áreas residenciales e industriales está creando una reducción en la recarga y un aumento en las extracciones de aguas subterráneas en la Región Metropolitana. Esto ha motivado un creciente interés en la recarga artificial de acuíferos como una forma de paliar los descensos de niveles observados en los acuíferos de la zona.

El propósito de este trabajo de título es estudiar el potencial de 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.

Como primera parte de este estudio se recopilan antecedentes bibliográficos para conocer los distintos criterios de diseño de los métodos de infiltración existentes y los resultados que se esperarían con su aplicación. Luego, se selecciona un sitio que cumpla con dichos criterios y se recolecta toda la información necesaria para la construcción de un modelo hidrogeológico.

Finalmente, se desarrolla un modelo numérico mediante una modelación “telescópica” desde el modelo hidrogeológico Maipo-Mapocho del año 2000. Con ese modelo se calculan las tasas de recarga tentativas para el sector mediante un sistema de pozos de infiltración gravitacional.

Los resultados del modelo son tasas de infiltración gravitacional de aproximadamente 20 l/s cuando los pozos se llenan de aproximadamente de 10 metros de agua. Estas tasas son muy sensibles a la conductividad hidráulica aledaña a los pozos por lo cual es importante poder determinar el valor real de dicho parámetro efectuando pruebas de bombeo adecuadas para la zona.

Por último, se hace hincapié en la importancia de la calidad del agua usada para la recarga, debido a que puede ser una limitante para el éxito de cualquier tipo de proyecto que recargue directamente a la zona saturada, por lo que se recomienda en el futuro ahondar más en este tema y en la legislación vigente para este tipo de proyectos.

Disponible en: <http://www.tesis.uchile.cl/handle/2250/112265>.

- **“Modelación de la Recarga Artificial de Agua Subterránea en el Acuífero de Santiago Oriente”**. María José Ocariz V. Memoria para optar al grado de Ingeniero Civil, con diploma en Ingeniería Ambiental. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería. Santiago. Marzo 2001.

5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

En el presente informe se han revisado los estudios e iniciativas realizadas a la fecha por la DGA, CNR, DOH, INH, entre otros, respecto a la recarga artificial de acuíferos en Chile.

En particular, se puede señalar que a pesar que en 2005 se puso sobre la mesa el tema de la recarga artificial con la modificación del Código de Aguas, es muy poco lo que se ha avanzado en estos 8 años.

Si bien los estudios revisados corresponden a iniciativas muy interesantes, que incluso se han concretado algunas en proyectos pilotos de recarga, el avance que se presenta en la materia no es mayor. Se destaca eso sí que en todos los estudios revisados se presenta una metodología para determinar sectores acuíferos donde es posible realizar recarga artificial por diferentes métodos. Se considera que a partir de esto se puede generalizar una metodología aplicable, al menos a escala de cuenca, para todo el país.

Finalmente, se considera fundamental para la agilización de la aplicación de esta técnica la pronta publicación del "Reglamento de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas", que actualmente se encuentra en revisión por parte de la Contraloría General de la República.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Comisión Nacional de Riego, Aqualogy Medioambiente Chile S.A. Análisis alternativas piloto recarga artificial Ligua – Petorca, V Región. Agosto 2013.
- Comisión Nacional de Riego, GCF Ingenieros Ltda. Estudio Diagnóstico de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos en las Regiones de Arica y Parinacota a la Región Del Maule. Marzo 2013.
- Comisión Nacional de Riego, GCF Ingenieros Ltda. Mejoramiento de Agua Subterránea para Riego Ligua y Petorca. Enero 2013.
- 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.
- Cortez Salvo, Freddy Javier. Recarga Artificial de Acuíferos Mediante Pozos de Infiltración. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2012.
- Dirección de Obras Hidráulicas, Ernesto Brown F. Estudio Recarga Artificial de Acuíferos en el Valle del Aconcagua Usando Derechos Eventuales del Fisco. Enero 2012.
- Dirección de Obras Hidráulicas, GeoHidrología Consultores. Análisis de potencialidad de recarga artificial acuíferos primera y tercera sección valle del Aconcagua. 2012.
- 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.
- 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.
- Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, AC Ingenieros Consultores Ltda. Investigación Recarga Artificial Acuíferos Cuencas del Río Choapa y Quilimarí, Región de Coquimbo, SIT N° 292. Diciembre 2012.
- 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.
- Ocariz V., María José. Modelación de la Recarga Artificial de Agua Subterránea en el Acuífero de Santiago Oriente. Memoria para optar al grado de Ingeniero Civil, con diploma en Ingeniería Ambiental. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería. Marzo 2001.

- Revista Vertiente, Edición N° 13. Proyecto de recarga artificial en el acuífero Colina; Jose Luis Fuentes, Sociedad de Canal del Maipo. Septiembre 2013.
- Tobar Espinoza, Eugenio. Modelación del Efecto de la Recarga Artificial Sobre la Operación del Dren Las Vegas. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2009.
- Wilmans C., Walter. Recarga Artificial de Acuíferos en el Sector alto de la Cuenca del Río Mapocho. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile. 2001.