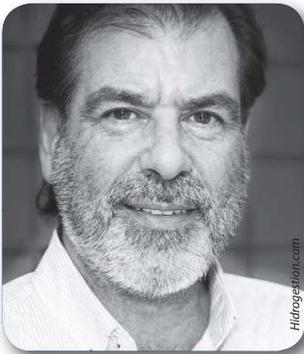


Los acuíferos como embalse regulador natural para épocas de sequía



Eugenio Celedón Cariola

Ingeniero civil hidráulico por la Pontificia Universidad Católica de Chile, cuenta con 40 años de experiencia en desarrollo de proyectos y consultorías en áreas de la ingeniería hidráulica e hidrogeología. Es socio y gerente general de Hidrogestión y fue presidente de Alhsud Chile durante tres períodos consecutivos.

Los acuíferos son volúmenes de agua que se forman y mantienen bajo el terreno natural, utilizando los espacios e intersticios entre las partículas del relleno sedimentario o el suelo que compone la estructura de un valle en una cuenca. En ellos, el agua que se acumula escurre a una velocidad significativamente lenta y su volumen almacenado se repone a partir de la percolación o infiltración natural que ocurre de las lluvias, el riego y/o los escurrimientos superficiales.

Dicho de otra forma, la recarga de los acuíferos depende del agua que escurre sobre la superficie del terreno y que es capaz de introducirse por los espacios libres que existen entre las partículas, rellenando el vacío en el volumen de suelo que constituye el relleno sobre la roca. Su recarga natural corresponde a un porcentaje variable —entre un 5% a un 25% de la

lluvia se infiltra en los suelos—, según las características de formación geológica de los valles. El resto de la lluvia escurre en forma superficial, formando los cauces y principales ríos, que de forma natural en Chile van de la cordillera hacia el océano.

Embalses subterráneos

La lentitud de escurrimiento que presentan las aguas subterráneas se debe a que sus velocidades de flujo resultan tortuosas entremedio de las partículas del suelo (apenas de metros por día, metros por mes o metros por año), ya que la facilidad de escurrimiento depende del tipo de suelo, lo que se denomina permeabilidad del material del relleno acuífero. De esta forma, se constituyen en una suerte de embalses subterráneos, es decir, grandes volúmenes de agua casi detenidas y cuyo escurrimiento —dada la

geografía del suelo local— se produce mayoritariamente de cordillera a mar, con una descarga hacia el océano que resulta de caudales muy pequeños, producto de la depositación de materiales finos en la desembocadura de los cauces.

Este fenómeno se produce debido al encuentro entre los flujos de crecidas con la masa de agua de mar detenida en los océanos y la disminución de las pendientes, por lo que la velocidad de los escurrimientos superficiales disminuye significativamente la velocidad del flujo y deposita los materiales más finos, generando una suerte de bloqueo del escurrimiento desde el valle hacia el mar. En esos sectores la permeabilidad es muy baja, a veces casi nula, generando una descarga al mar de caudales más pequeños, los que en general no superan los 100 litros por segundo (l/s).

La estructura geológica

ca de la geografía de Chile está constituida por valles transversales que nacen en la cordillera y van hasta el mar en su desembocadura. Estos valles, a su vez, están organizados por cordones de cerros que los encauzan y que en muchos lugares tienden a juntarse, formando “gargantas” o estrechamientos laterales del cauce, que generan un levantamiento del basamento rocoso. Esta formación, aguas arriba de estos, produce una zona de mayor profundidad que se constituye en un embalse natural dentro del acuífero, el cual es capaz de acumular el agua subterránea de forma tal que prácticamente inmoviliza esos volúmenes, haciéndolos disponibles para poder ser extraídos en épocas de sequía, donde al disminuir las precipitaciones, los flujos superficiales son menos significativos o simplemente desaparecen.

El aprovechamiento de estos recursos subterráneos como compensación a la falta de aguas superficiales en épocas de sequía no es una novedad en el país. Se ha utilizado principalmente como solución para suplir la demanda agrícola que se requiere en épocas críticas. El Estado, a través de la Corporación de Fomento de la Producción (Corfo) —fundadora de la especialidad de agua subterránea en Chile en la década de 1950— impulsó la campaña de aprovechamiento de aguas subterráneas para utilización agrícola

“

La inversión en el uso intensivo de las aguas subterráneas como recurso alternativo para compensar la falta de agua superficial en épocas de crisis por sequía, resulta una solución muy efectiva, de gran valor, sostenible, segura y significativa.

”

durante la profunda sequía de 1968 y 1969. Construyó pozos a orilla de trazados de los canales de riego para descargar agua subterránea en aquellos canales que no contaban con disponibilidad de recursos superficiales, dada la disminución significativa de las lluvias, iniciativa que se denominó Plan Sequía.

Actualmente, el desarrollo tecnológico y la disponibilidad de mayores herramientas de conocimiento permiten maximizar el aprovechamiento de estos recursos. A través de métodos de geofísica, modelación numérica predictiva, nuevas tecnologías y mecanismos de construcción de pozos —que han logrado significativos aumentos de velocidades de perforación y que alcanzan con mayor facilidad grandes profundidades y diámetros de habilitación—, uso de materiales con mayores resistencias y más desarrollados (cribas de ranura continua y bombas de pozo profundo de motores su-

mergidos), desde la superficie, permiten determinar la topología, geometría y características de la formación de los rellenos sedimentarios en una cuenca, así como su espesor y la profundidad de los diferentes estratos

Esta información proporciona la capacidad de precisar los sectores más productivos de un valle, evaluar y determinar con anticipación su volumen y estimar dónde se ubican las mejores condiciones de permeabilidad para disminuir el valor total de la inversión necesaria en obras de captación, maximizando la obtención de caudales de extracción de aguas subterráneas.

De esta forma, diseñar un sistema productivo de aguas subterráneas de extracción masiva —mediante la construcción de baterías de pozos colectivos en una cuenca— constituye una forma de lograr importantes caudales disponibles del acuífero para que en épocas de sequía se puedan reem-

plazar los recursos de caudales superficiales faltantes de escurrimientos superficiales.

Para beneficio de todos los usuarios, estos recursos pueden o deben ser administrados por organizaciones de usuarios como lo son las juntas de vigilancia o las asociaciones de canalistas, o eventualmente, por organismos del Estado encargados de resolver los problemas hídricos, como la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), la Dirección General de Aguas (DGA), la Comisión Nacional de Riego (CNR) u otros, que con una inversión menor respecto de otras formas de infraestructura, pueden generar soluciones de abastecimiento que resuelvan los momentos críticos de los períodos más exigentes en una época de sequía.

Experiencia del valle del Aconcagua

Un ejemplo contemporáneo sobre el aprovechamiento de embalses subterráneos en épocas de sequía es la experiencia del valle del Aconcagua, desarrollada en la década de 2001 a 2010 por la DOH a través de la Mesa Técnica. La iniciativa, de carácter público-privada, tuvo por objetivo brindar una solución al proyecto de riego integral del valle y buscó reemplazar la construcción del embalse Catemu —impugnado por los usuarios de esa zona— sustituyéndolo por el aprovechamiento del embalse subterráneo de los acuíferos

de la cuenca del Aconcagua.

Para lo anterior, se diseñó la construcción de baterías de pozos de captación que produjeran un caudal equivalente a un flujo de descarga del embalse superficial, buscando las mejores ubicaciones posibles de aprovechamiento del agua subterránea, determinadas en tres zonas distintas: Curimón, Panquehue y Llay-Llay. En estos sectores se construyeron alrededor de 52 pozos, que en total sumaron y produjeron un caudal de 14 metros cúbicos por segundo (m^3/s).

Estos pozos, que inicialmente se pensaron como infraestructura del sistema de riego normal de la cuenca, se transformaron en elementos esenciales para la supervi-

encia del valle en el contexto de la prolongada sequía que golpeó fuertemente el centro-norte del país y que desde 2006 a la fecha —situación que no existe anteriormente en la estadística hidrológica de Chile, de la cual se tiene registros desde 1870— constituye la crisis de mayor duración en la historia hídrica de Chile.

Así, durante el período más grave de sequía para el valle del Aconcagua (2010 a la fecha), se toma la decisión de poner en funcionamiento los sistemas de baterías de pozos colectivos con descarga a los canales de riego y al río Aconcagua. Lo anterior, con el objetivo de compensar los déficits de agua superficial y atender las demandas

de riego mediante el aprovechamiento del embalse subterráneo. De esta forma, con un caudal promedio del orden de los $11 m^3/s$ se logra resolver una situación precaria de riego, fundamentalmente para las zonas altas de la primera y tercera sección del valle, dando también abastecimiento con parte de sus recursos al agua potable de las ciudades de Valparaíso y Viña del Mar, mediante las baterías de pozos existentes en el sector de Llay-Llay.

Experiencia en el Norte Grande

La experiencia del valle del Aconcagua sirvió de referente para la región de Coquimbo y fue replicada con el objetivo de ayudar a resolver los

problemas de abastecimiento en la época de sequía de las cuencas principales de los ríos Choapa, Limarí y Elqui. En efecto, en los momentos más críticos de la sequía que afectó a esta región en 2014, el gobierno regional, a través de los organismos fiscales y canalizando las inversiones mediante el programa de innovación de Corfo Innova, destinó recursos para poder desarrollar iniciativas que ayudaran a resolver los problemas de sequía.

En dicha oportunidad, para las cuencas principales de la región, través de Hidrogestión se propuso llevar adelante un estudio detallado de la morfología, geometría y caracterización de los acuíferos, de forma tal que pudie-

Figura 1: Ubicación de las baterías de pozos en el valle del río Aconcagua.

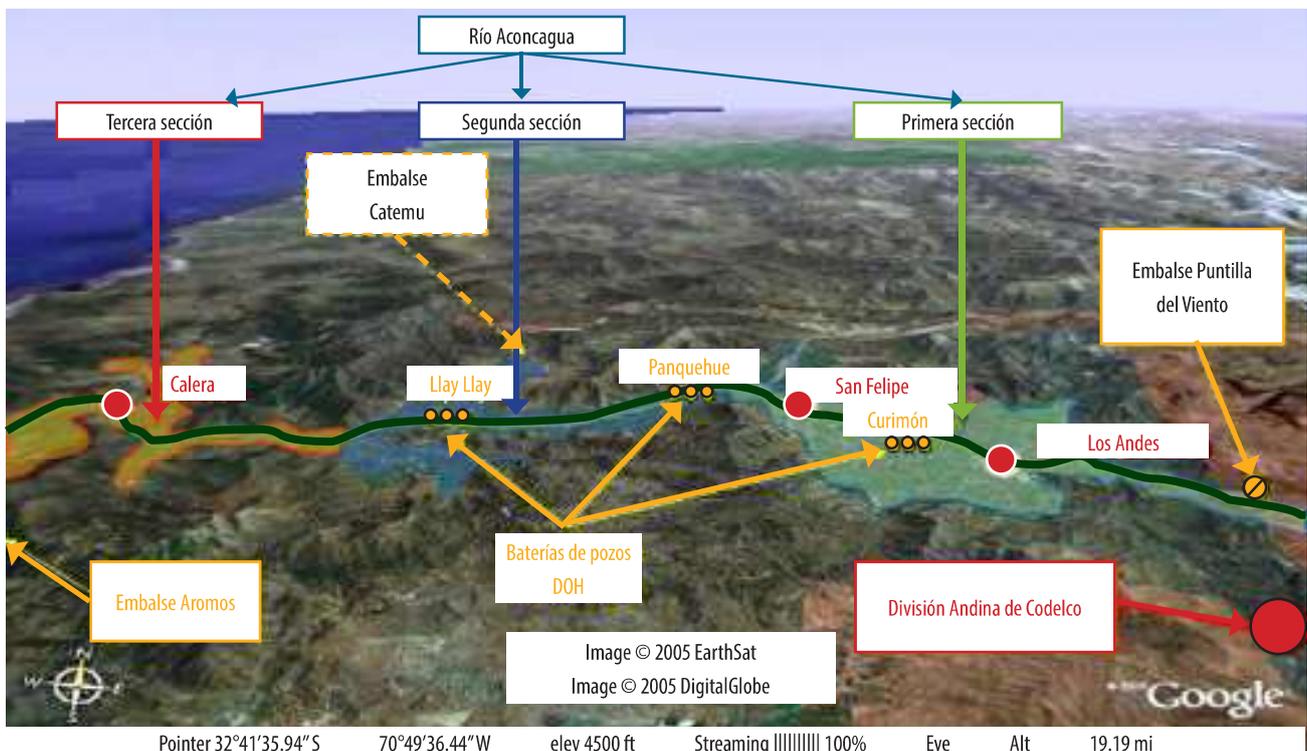
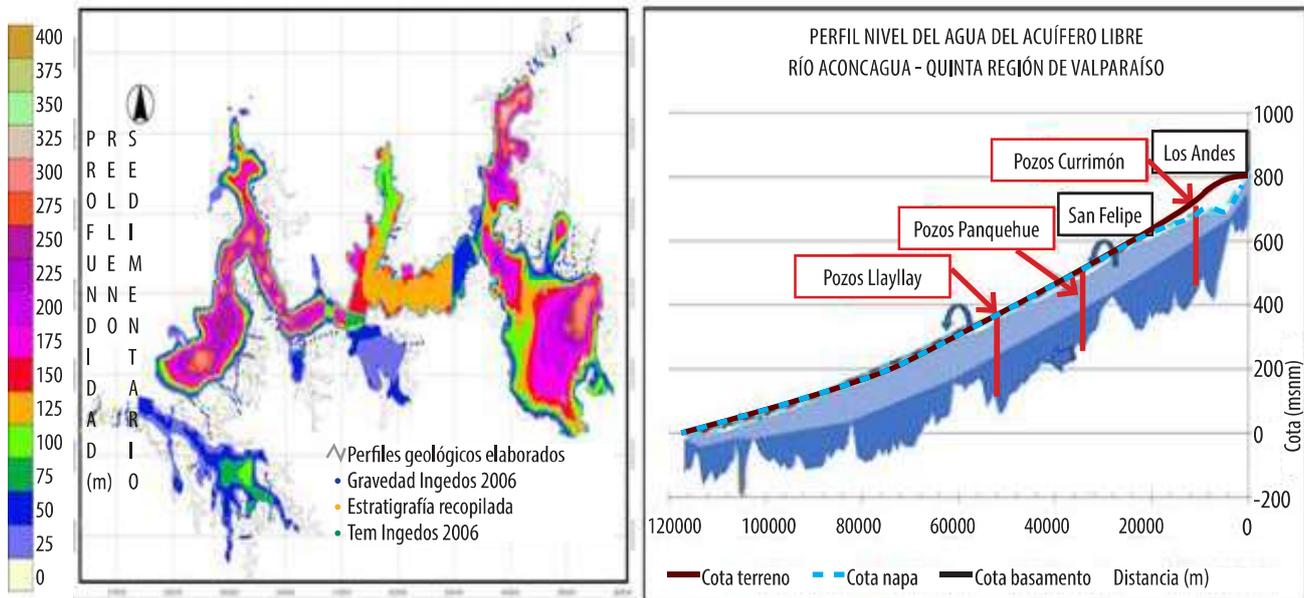


Figura 2: Profundidades del basamento y perfil longitudinal del valle del río Aconcagua.



ra evaluarse la existencia de embalses subterráneos significativos y condiciones de los acuíferos que permitieran la explotación masiva del agua subterránea, como un recurso alternativo a la falta de las aguas superficiales.

La primera cuenca elegida para su evaluación fue la del valle del Choapa, por disponer de una cantidad significativa de agua subterránea y augurar, por tanto, resultados promisorios. La dificultad estuvo dada por su condición de limitación de extracción de aguas subterráneas, proveniente de la resolución de la Dirección General de Aguas (DGA), que declaró área de restricción para sus acuíferos.

La limitación antes descrita tuvo su origen en la alta conectividad existente entre el escurrimiento superficial en el estrecho cauce del río Choapa, respecto de los acuíferos asociados al valle del

mismo río, producto de las altas permeabilidades impregnadas. Esto significaba que, frente a extracciones importantes o masivas del recurso subterráneo, la conexión con el río hacía disminuir los caudales superficiales que portaba el cauce, disminuyendo los recursos de los titulares de derechos de agua superficial en esa zona, razón por la cual se limitó la capacidad de explotación de agua subterránea.

El proyecto consistió en buscar lugares apropiados para extraer masivamente aguas subterráneas de sectores que constituyeran "embalses subterráneos" con importantes volúmenes concentrados, ubicados en zonas asociadas a la existencia de canales matrices de distribución de aguas de riego. Se construyeron baterías de pozos colectivos que descargarán aguas subterráneas a los canales, compensando el

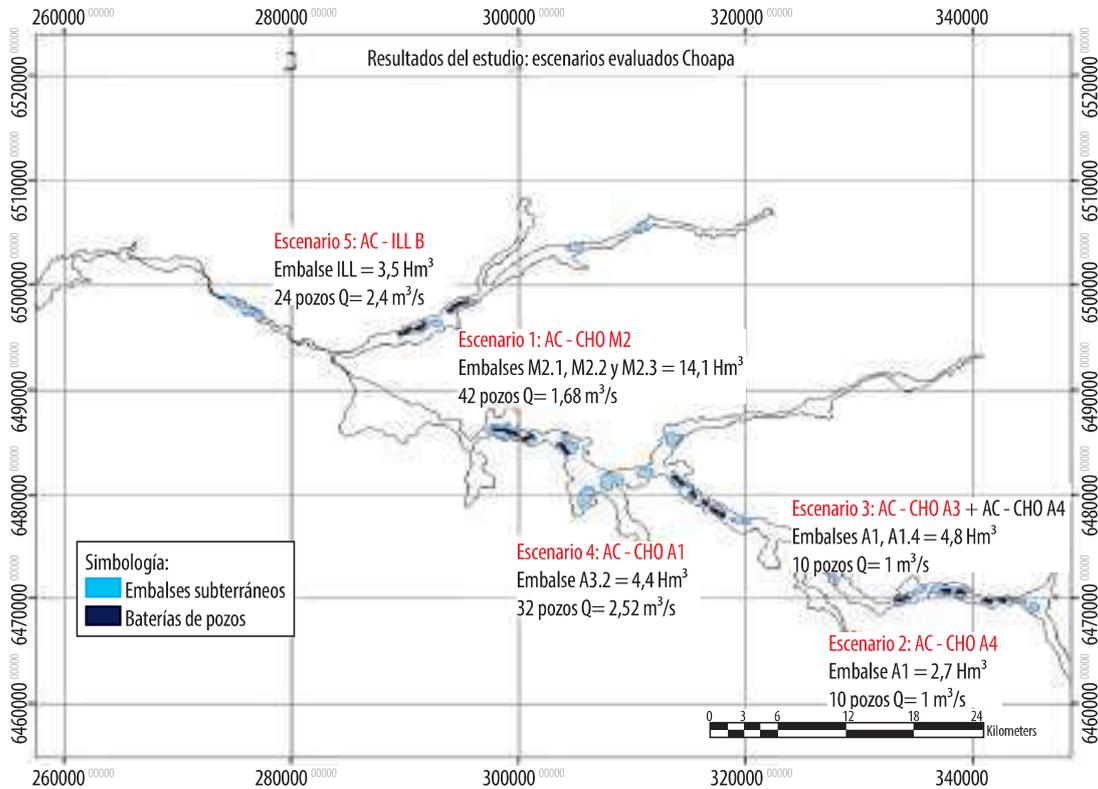
déficit hídrico superficial del período seco, de forma tal que los titulares de derechos superficiales pudiesen disponer de los recursos para el riego de la superficie agrícola con la menor merma posible.

Entre 2014 y 2016, se realizó un estudio geofísico y un levantamiento gravimétrico para determinar la geometría del relleno sedimentario y conocer las profundidades de la roca. Asimismo, se determinaron las permeabilidades de cada zona a partir de las experiencias de bombeo conocidas y obtenidas de los expedientes de pozos que tramitaron derechos de agua y se analizaron también las condiciones de piezometría o profundidad de nivel estático del acuífero a lo largo del valle. Y por último, se determinaron las demandas y zonas de riego, desarrollando un modelo numérico hidrogeológico integral de la cuenca.

Mediante esta herramienta se evaluaron distintos sectores potenciales de ubicación y construcción de baterías de pozos colectivos de explotación masiva de aguas subterráneas, llegando a resultados positivos para 4 o 5 sectores principales que cumplieran con las características necesarias y de forma natural en los acuíferos.

Se estudiaron diversos escenarios para optimizar la inversión en la obra global, optando por sectores ubicados entre la parte alta y la zona media del valle, ya que cumplían con la condición de poder extraer importantes caudales de compensación de los derechos o acciones de agua superficial de los diferentes canales matrices de distribución de riego en el valle. Asimismo, el análisis económico mostraba que la capacidad de riego alterna-

Figura 3: Ubicación de las baterías de pozos en el valle del río Aconcagua.



tiva permitía ingresos por recuperación de superficies que de otra manera no habrían podido ser explotadas agrícolamente. De esta forma, la inversión en infraestructura de las obras se recuperaba en menos de 3 años.

Concluida con éxito esta etapa, se inició una segunda fase —también financiada por Corfo Innova y el gobierno regional— cuyo objetivo fue el diseño de ingeniería de dos baterías de pozos colectivos en el valle del Choapa, las cuales permitieran alimentar y fortalecer los dos principales canales matrices de la zona (el canal Silvano y el canal Breas) para la distribución del agua subterránea como compensación de las aguas

superficiales faltantes. Su funcionamiento y autorización de extracción de aguas subterráneas se acogería a los decretos de emergencia hídrica generados por la DGA, frente a la situación crítica de sequía existente en la cuenca, con el beneficio adicional de generar trabajo en los sectores agrícolas de la región y de evitar al máximo los problemas de tipo social.

De la mano de la Junta de Vigilancia del Río Choapa, el inicio de esta segunda etapa, en 2018, coincide con el periodo más crítico de sequía para el valle (2010–2018), época en que los recursos superficiales alcanzaron la condición mínima de reparto de un 30% sobre la disponibilidad de un

caudal normal y que para inicios del verano 2019–2020, el reparto o desmarque del río era de solo un 15%.

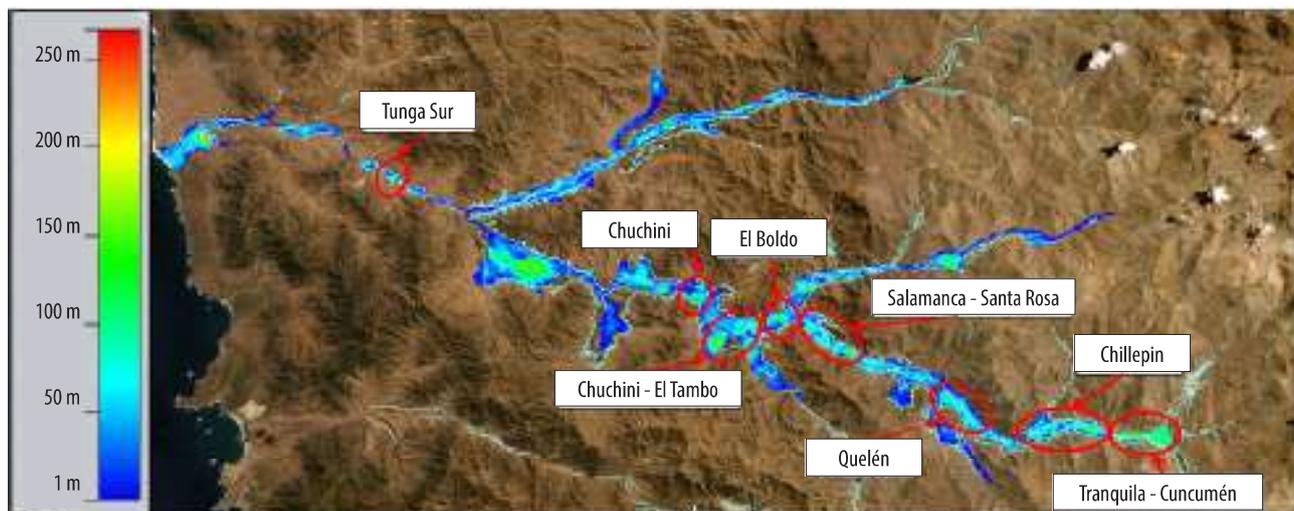
Frente a la crítica realidad de la cuenca, se propuso iniciar parte del desarrollo del proyecto con obras ejecutadas paralelamente al diseño, seleccionando un conjunto de canales matrices que pudieran ser fortalecidos con 12 pozos de producción de aguas subterráneas a lo largo del valle. Los dos sectores principales, definidos para las baterías de pozos colectivos del Choapa, se sumarían descargando con 6 pozos adicionales al canal Silvano y otros con 3 pozos al canal Breas.

Ejecutadas las obras de Emergencia Sequía durante

2020, se construyeron 4 pozos: 2 en el sector de Breas y 2 en el sector de Silvano, todos con excelentes resultados y producciones individuales de entre 70 y 100 litros por segundo, confirmando el diagnóstico del estudio y haciendo efectiva la puesta en marcha de un piloto de las baterías de pozos proyectadas. Todos los pozos fueron implementados con sistemas de control y telemetría.

A partir del éxito de los análisis técnicos realizados en el valle del Choapa y la experiencia práctica obtenida en el valle del Aconcagua respecto de la resolución de problemas de sequía mediante la explotación de baterías de pozos colectivos,

Figura 4: Profundidades de basamento y principales embalses subterráneos en Choapa.



se continuó con un análisis similar para la cuenca principal del Limarí, con sus cauces más importantes entre la cordillera y el mar, y para el valle del río Elqui, bajo el Embalse Puclaro y el sector aledaño de Pan de Azúcar. El primero como un estudio terminado y en el Elqui con un estudio aún en desarrollo.

Baterías de pozos colectivos para la cuenca del Limarí

El estudio de la cuenca del Limarí —que se analizó replicando las condiciones de sequía del periodo de 1995 a 2016— también ha dado resultados favorables con la existencia de baterías de pozos colectivos de aguas subterráneas de compensación hasta el 80% del caudal normal. Se demuestra que, a lo menos, existen siete lugares donde pueden explotarse masivamente los recursos de agua subterránea, para un caudal del orden de 7

m³/s, producto de la existencia de embalses de regulación natural en el acuífero.

En cuatro de los siete casos asociados a la planicie de la meseta central y zona de desembocadura se presentan magnitudes y análisis económicos positivos, que permiten mantener la producción de una superficie agrícola sin merma por baja de superficie de riego. Lo anterior producto de que la disminución del caudal superficial es reemplazada por los recursos de agua subterránea producidos con baterías de pozos colectivos.

Positivos resultados

La evaluación económica de las inversiones, explotadas solo en los periodos de sequía (el 50% del año en un plazo de 30 años), presenta un resultado de valor actualizado neto positivo, a una tasa del 10% de rentabilidad, con resultados de recuperación anual de los acuíferos

y un impacto sobre el volumen embalsado menor al 1% en el periodo total.

El valor de los análisis realizados para las diferentes cuencas —y que se ha podido verificar en la práctica con resultados reales y efectivos de las obras construidas— muestra resultados congruentes con los pronósticos de los estudios realizados. Esto tanto en la bondad de la solución y las ubicaciones definidas para las obras,

como en la producción de un caudal de reemplazo al déficit de las aguas superficiales, lo que en sí mismo significa un gran valor para los usuarios agrícolas y la capacidad productiva de la región.

Los resultados obtenidos en los distintos proyectos se observan como positivos para la población y habitantes de la zona, ya que mantienen su capacidad comercial y sus fuentes de empleo, al mismo tiempo que apor-

Figura 5: Pozo de la batería de Breas.



tan a la caracterización y conocimiento de la formación geométrica, morfológica y del funcionamiento de los acuíferos de la cuenca.

En el caso del Limarí, la caracterización hidrogeológica

de las zonas altas de los valles del Limarí—que resultan más estrechos, con altas pendientes y rellenos sedimentarios de menor potencia que los sectores más planos de la meseta central— justifica

el uso de recursos de menor envergadura en aguas subterráneas que en la zona de la meseta central y las zonas más bajas, donde se ha verificado la existencia de sectores con volúmenes de embalse

subterráneo que permiten el sostenimiento y acumulación del recurso, pese a la disminución de las recargas.

Estos antecedentes, objetivos y valorizados, son muy valiosos para poder desarro-

Figura 6: Esquema de implementación sistema de telemetría y control para las baterías de pozos.

IMPLEMENTACIÓN SISTEMAS DE MEDICIÓN Y CONTROL
SISTEMA DE TELEMETRÍA

Sistema de monitoreo de propiedades físicas y químicas que permite medir de estas propiedades de forma remota y posteriormente enviar esta información a un centro de control.



MEDICIÓN DIRECTA - SCADA

Del inglés "Supervisory Control and DataAcquisition"

Sistema de supervisión, control y adquisición de datos

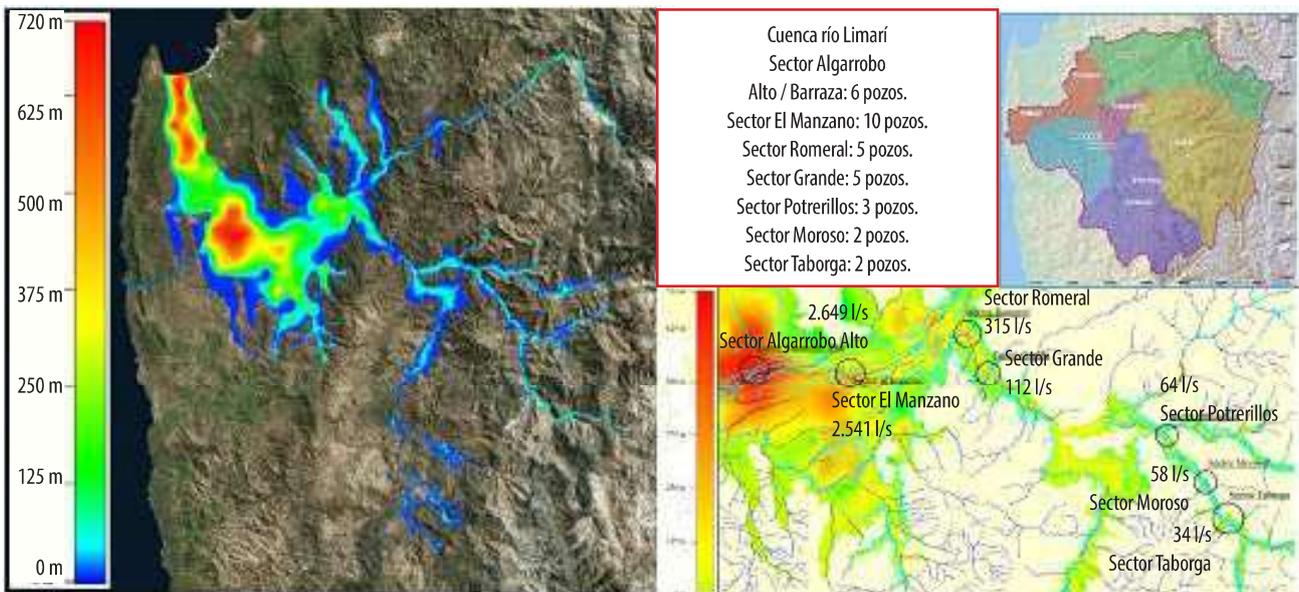
Permite no solo obtener información, sino también tomar acciones (controlar, según las mediciones realizadas de forma remota.

Estas acciones pueden ser determinadas de forma automática (sistema automatizado) o a través de un operador que recibe la información en una central de control



- Sensores
- Ultrasonido (altura)
- Caudalímetro (pozos)
- Presión hidroestática (embalses)
- Clima (evapotranspiración)
- Calidad de aguas
- Otros

Figura 7: Profundidades y productividad de explotación de los embalses subterráneos del valle del Limarí.



llar una buena gestión en el uso combinado de los recursos hídricos de la cuenca, mediante la explotación masiva de aguas subterráneas para soluciones de riego agrícola.

La posibilidad de redistribuir temporalmente los recursos permite lograr un mejor aprovechamiento para una atención más adecuada de todos los usuarios, dejando el mayor uso de las aguas superficiales en las zonas más altas y con menos respaldo hidrogeológico y haciendo más intensiva la explotación del agua subterránea en los sectores de la meseta central, que cuenta con volúmenes disponibles que

permiten una explotación masiva sin afectación, con disponibilidad sostenida y con una seguridad de recuperación de los acuíferos en el tiempo, para no afectar a los titulares de derecho. Asimismo, permite disponer de información sobre la existencia de recursos suficientes para atender el abastecimiento de otras demandas, como las necesidades de los sistemas de agua potable rural y otras formas de atención a las demandas locales.

En consecuencia, los análisis realizados para diferentes valles principales de la zona norte y central de Chile,

entre los que están el valle del Aconcagua, valle del Choapa, valle del Limarí y el valle del Elqui —que en forma periódica y sostenida se han visto afectados por extensos periodos de sequía— muestran que la inversión en el uso intensivo de las aguas subterráneas como recurso alternativo para compensar la falta de agua superficial en épocas de crisis por sequía, resulta una solución muy efectiva, de gran valor, sostenible, segura y significativa para reemplazar la ausencia de los recursos de aguas superficiales.

Si se suma que entre las regiones de Atacama y del

Maule se concentra prácticamente el 60% de la producción del PIB del país, estas soluciones cobran aún más relevancia. Evitan perjudicar en forma significativa la capacidad de producción agrícola y las inversiones que se han realizado en plantaciones y producciones de exportación, siendo mucho más económica (en términos de valores de inversión, capacidad, velocidad constructiva, y magnitud de la construcción) que la solución de embalses superficiales, que requieren de una mayor cantidad de estudios y de la pérdida de importantes áreas productivas. 🌍

Asesoría Estratégica para la Viabilidad Ambiental de Proyectos

Recursos Hídricos de SGA

Aportando al desarrollo y sustentabilidad del país

Somos 20 profesionales de distintas disciplinas trabajando juntos para tus mejores soluciones:

- Geólogos
- Ingenieros Geólogos
- Hidrogeólogos
- Ingenieros Hidráulicos
- Geógrafos
- Ingenieros Ambientales
- Ingenieros Industriales
- Ingenieros Químicos