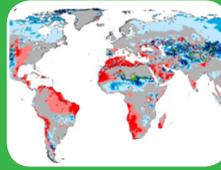


Cambio climático
y recarga artificial
de acuíferos

P. 14



Observaciones,
proyecciones e
incertidumbres en un
clima cambiante

P. 20



Caso de estudio
en el Salar del Huasco

P. 54



VERTIENTE

NOVIEMBRE DE 2018, EDICIÓN N° 19

Cambio climático y aguas subterráneas

Índice

Editorial

1

DOH: Profundizar el conocimiento sobre implicancias del cambio climático en el recurso hídrico

32-35



**Visión de Alhsud Chile:
Cambio climático
y aguas subterráneas**

2-12

CNR: Análisis en gestión de recursos hídricos y mejoramiento de uso y regulación

36-39

Marco normativo de las aguas subterráneas y principales modificaciones propuestas en proyecto de ley de reforma

40-45

Cambio climático
y recarga artificial de acuíferos

14-19

Observaciones, proyecciones e
incertidumbres en un clima cambiante

20-25

Visión de la DGA: Impactos
del cambio climático
sobre los recursos hídricos

26-31



**Cambio climático
y agua subterránea:
Impactos y desafíos
para el futuro**

46-53

Caso de estudio en el Salar del Huasco

54-60



Directorio de ALHSUD Capítulo Chileno:

Presidente: Pablo Rengifo Oyarce. **Vicepresidente:** Francisco Echeverría Ellsworth.

Director-tesorero: Gerardo Díaz del Río. **Director-secretario:** Francisco Suárez Poch.

Directores: Orlando Acosta Lancellotti, Carlos Ciappa Petrescu, José Luis Fuentes Vásquez, Pablo Jaeger Cousiño, Hernán Llona Gajardo, Fernando Peralta Toro e Ignacio Popelka Jiménez.

Past-Presidentes: Eugenio Celedón Cariola, Nelson Pereira Muñoz y Jaime Muñoz Rodríguez.

Comité asesor: José Luis Arumí Ribera, Carmen Copier Mella, José Luis Delgado Escárate, Luis Jorquera Galaz, Gonzalo Lira Canguilhem y Mario Jofré Cortés. **Fundador:** Eugenio Celedón Silva.

Dirección periodística: Pilar Castillo Muñoz.

Diseño y producción: Mónica Maldonado Cea.

Desde 1996, Alhsud Chile publica su revista Vertiente, que aborda los tópicos centrales en torno a la gestión del agua, incorporando en sus contenidos las materias abordadas en las actividades realizadas en el año.

Providencia 2330, oficina 63. Santiago de Chile - comunicaciones@alhsudchile.cl - www.alhsudchile.cl

Editorial



Pablo Rengifo Oyarce

Presidente de Alhsud Chile.

Pablo Rengifo es ingeniero civil y magíster en Ciencias de la Ingeniería por la PUC. Cuenta con más de 20 años de experiencia profesional en consultoría y actualmente lidera la gerencia de Negocio, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de Arcadis.

A partir de 1995, el Capítulo Chileno de Alhsud inicia la aventura de organizar su primer seminario anual, evento especializado en aguas subterráneas que representa la actividad de mayor relevancia de nuestra institución. En esta última década, destacan títulos tales como: “¿Existe sobreexplotación del agua en Chile?”, en 2010; “Recarga y gestión de embalses subterráneos”, en 2012; “El valor del agua”, en 2013; “El Código de Aguas mirando al futuro”, en 2015; y “Explotación dinámica de acuíferos: solución para épocas de sequía”, en 2016.

Prosiguiendo con esta tradición, en 2017 dirigimos el debate de nuestro seminario anual hacia “El Cambio Climático y las Aguas Subterráneas”, dos temas de máximo interés para la vida cotidiana y el desarrollo futuro del país, como lo son los efectos del cambio climático y la importancia que representa el agua subterránea para una gran cantidad de actividades productivas y para el abastecimiento de agua potable de la población.

La visión general del cambio climático ha sido analizada en diversos seminarios y publicaciones, tanto nacionales como internacionales. Y existe consenso, entre los

distintos escenarios evaluados, de que en Chile se experimentarán aumentos de temperaturas, disminución de precipitaciones y un incremento de los eventos extremos. En el caso particular de las temperaturas, se estima que de aquí a la década de 2040 se registrarán aumentos de 0,5 a 1 grado; que entre 2040 y 2070 el ascenso de la temperatura oscilará entre los 2 y 2,5 grados; mientras que para fines de siglo, el incremento alcanzaría los 4 grados.

Las precipitaciones, en tanto, disminuirían en la zona central, desde los valores actuales –que oscilan entre 500 y 600 milímetros– hasta valores en torno a los 300 y 400 milímetros para el período 2040 - 2070. Asimismo, se espera una disminución en los caudales superficiales de ríos debido a una menor acumulación de nieve –efecto provocado por el alza de la línea de nieves en el Chile Central– la que está ascendiendo y que durante este siglo debería remontar en alrededor de 300 metros. Lo anterior, finalmente se traduce en que se dispondrá de menos agua en una serie de valles de la zona central del país.

En este escenario, el uso eficiente, eficaz y sustentable del agua subterránea cobrará cada vez mayor importancia. Y es precisamente en este contexto que el

seminario 2017 de Alhsud Chile buscó visualizar perspectivas y entregar luces sobre una interrogante poco abordada y difundida hasta ahora: ¿cómo afectarán al agua subterránea los cambios en el clima? Esta pregunta, si bien parece arrojar una respuesta sencilla –bajo el supuesto de que si contáramos con menos agua superficial también debiéramos contar con menos agua subterránea– no es del todo evidente, pues también se espera una mayor intensidad y frecuencia de eventos extremos, los que con gran probabilidad, propiciarán una mayor recarga de los acuíferos.

Esta edición número 19 de revista Vertiente da cuenta de éste y otros aspectos tratados durante el seminario 2017 de Alhsud Chile. A través de las páginas de esta edición los invitamos a leer y a conocer nuestra visión y las perspectivas académicas y de la autoridad en la materia. Sin duda, esta iniciativa es fruto del trabajo anónimo de muchos colaboradores que han visto en Alhsud Chile una plataforma de difusión del conocimiento científico y aplicado, así como una instancia de discusión e intercambio de opiniones en torno a políticas públicas y a la gestión del recurso hídrico. ☺

Visión de Alhsud Chile: Cambio climático y aguas sub



Orlando Acosta*

Ponencia realizada durante el Seminario 2017 "Cambio Climático y Aguas Subterráneas" de Alhsud Chile.

Orlando Acosta es ingeniero agrónomo por la PUC, máster en Hidrología Subterránea por la U. Politécnica de Cataluña y magíster en Gestión del Negocio Minero por la U. Adolfo Ibáñez. Acosta es director de Alhsud Chile y es Socio Gerente de Gestinore Consultores, firma que desde 2014 ha asesorado a instituciones públicas, asociaciones gremiales y empresas privadas.

En la actualidad se cuenta con suficiente evidencia para demostrar que el agua subterránea es la fuente hídrica basal que contribuye a la adaptación humana a la variabilidad y cambio climático. Esto, probablemente ha sido así desde tiempos preteritos, pero a escala global se ha dado especialmente desde mediados del siglo pasado (1950, aproximadamente).

Existen varios consensos a nivel mundial sobre esta materia. Primeramente, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPPC) de las Naciones Unidas establece que los recursos de agua y las sociedades humanas son vulnerables al cambio climático, que esas consecuencias son de diversa índole y que, en algunos casos, pueden acarrear consecuencias graves para los países que las sufren.

En segundo lugar, también es incontrarrestable la evidencia que muestra que el agua subterránea es la mayor fuente de agua

dulce aprovechable y que a futuro representará la mayor reserva global de agua potable. De acuerdo a datos de la Unesco, ya en la actualidad, cerca de la mitad de la producción agrícola del mundo se basa en el uso de las aguas subterráneas, siendo parte importante del suministro de muchos consumos estratégicos del planeta.

Como tercer consenso, se puede afirmar que los recursos de agua subterránea son estratégicos para adaptarse al cambio climático, punto en el cual la Unesco ha ratificado su resiliencia como fuente esencial para adaptarse a los eventos climáticos del pasado.

Finalmente, un cuarto punto de acuerdo dice relación con el hecho de que actualmente no se le otorga la debida atención al agua subterránea, resultando necesario invertir más en esta fuente (Unesco), ya sea en obras públicas, investigación básica y aplicada, en las agencias estatales a cargo de dictar reglas y favorecer la gestión sostenible o en el fortalecimiento de las

administraciones de cuenca, entre otros aspectos.

La trascendencia del cambio climático

Es fundamental comprender que el cambio climático es trascendental para el curso de la humanidad y que requiere ser analizado en profundidad y desde una perspectiva adecuada.

En este sentido, como mencionó Leonardo da Vinci: "Cuando trates con el agua, consulta primero la

Figura 1: Lluvia en Aconcagua. El primer gráfico muestra la m



terráneas

práctica y luego da paso a la teoría", cuando se trata con la hidrología y el clima se deben consultar primero los hechos y las evidencias, para posteriormente teorizar y generar modelos y simulaciones predictivas, entre otros análisis.

Así, para analizar el cambio climático se requiere de una perspectiva histórica de la variabilidad natural del clima, de largo plazo, aspecto muy relevante para evitar cometer errores inter-

pretativos basados en evidencia parcial.

Por ejemplo, en el primer gráfico de la *Figura 1* se muestra la precipitación del valle Aconcagua, representada por la media móvil de cinco años de las últimas dos décadas de registros; se observa que al final de la década de los 90, en esa zona llovían alrededor de 300 mm/año; y que en los últimos diez u ocho años, la lluvia bordeó solo los 200 mm/año. Atendiendo esta

estadística de solo 20 años, insuficiente para esta zona, se podrían estar tomando decisiones de diseños de ingeniería sin la perspectiva adecuada de la variabilidad del clima, y especialmente de la ocurrencia de eventos extremos.

Efectivamente, al analizarse los 65 años de registro que en realidad existen en la cuenca (ver el segundo gráfico de la *Figura 1*), se evidencia que si bien la media móvil de los últimos

años no supera a la mediana por un período prolongado, también ocurrieron sequías similares a la actual entre 1954 y 1962, y entre 1968 y 1969. Entonces, al hablar de cambio climático es relevante mantener la perspectiva adecuada, para observar las cosas de una manera más sistemática y comprensible.

Una perspectiva temporal mayor

Otros ejemplos interesantes se dan al analizar los vínculos que existen entre el clima y algunos hechos notables de la historia del mundo. Por ejemplo, entre el 900 y 1300 d. C. se presentó la denominada *Anomalía Climática del Medioevo*, período en el que se produjo la dramática migración de los mayas (en Yucatán), entre el 900 y 1000 d. C., cuando esta población debió desplazarse desde sus ciudades hacia tierras más bajas del norte para encontrar fuentes permanentes de agua, ya que en sus zonas originales el recurso hídrico comenzó a escasear.

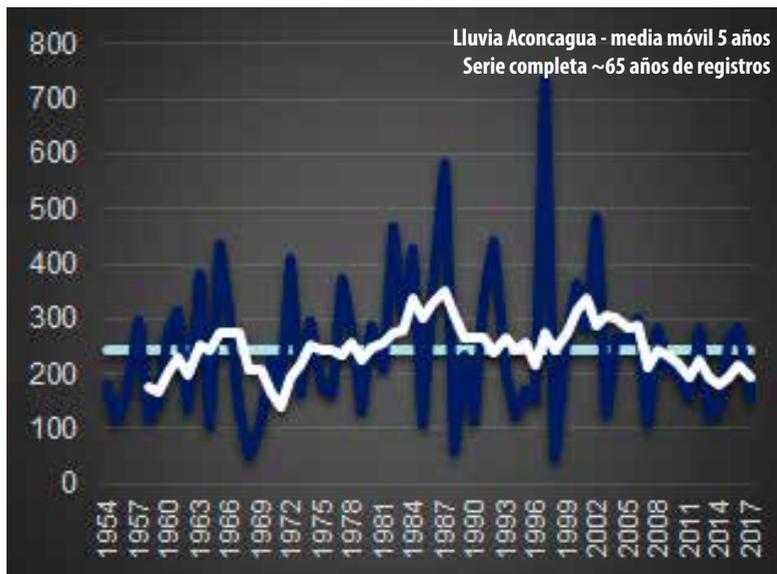
media móvil de 5 años con los registros de los últimos 20 años; el segundo gráfico muestra la media móvil de 5 años de la serie completa de 65 años.

ADECUADA

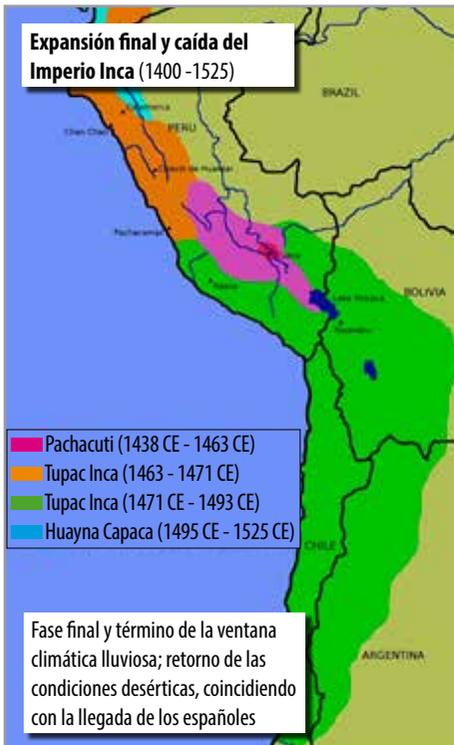
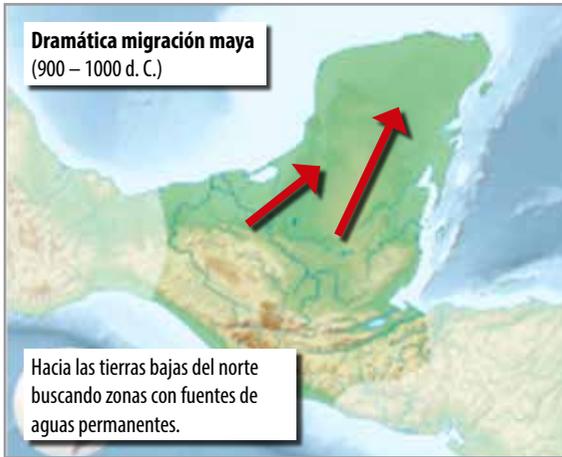
Lluvia Aconcagua - media móvil 5 años últimos ~20 años de registros



GRÁFICO 2: CON LA PERSPECTIVA ADECUADA



Recuadro 1: Las tres primeras imágenes refieren a la *Anomalía Climática del Medioevo* (900 al 1300 d. C.). Las tres imágenes inferiores corresponden a la *Pequeña Edad del Hielo* (1300 al 1850 d. C.).





**VALOR
COMPARTIDO**



En Compañía Minera doña Inés de Collahuasi, la pampa, el desierto y el mar de Iquique nos inspiran para desarrollar una minería que genera valor compartido.

Desde la Región de Tarapacá, porque somos mucho más que cobre, lideramos con pasión un negocio de excelencia para construir una sociedad mejor.

Entre el 1100 y 1300 d. C., en la zona de Ecuador, Perú y norte de Chile se produjo la consolidación y primera expansión del *Imperio Inca* producto de una ventana climática lluviosa de aproximadamente 400 años, que generó una gran cantidad de recursos hídricos y recargó todas las napas, permitiendo el desarrollo agrícola y florecimiento de esta civilización.

Entre los años 900 y 1100 d. C., Europa también vivió una época de clima propicio y estable, con disponibilidad de alimentos y animales, lo cual generó condiciones favorables para “hacer la guerra”, permitiendo el desarrollo de diversas invasiones dentro del continente y reiterados episodios de guerras para ir en búsqueda de riquezas en territorios aledaños.

En un período más próximo, entre el 1300 y 1850 d. C. se produjo la *Pequeña Edad*

del Hielo. Esta merma climática, en la zona del pacífico central de Sudamérica, supuso la caída del *Imperio Inca* (en torno al 1400 – 1525) ocasionando falta de alimentos producto del descenso de las lluvias y del retorno de las condiciones desérticas que, coincidente con la llegada de los españoles, provocó la desestabilización del *Imperio Inca*.

En este período, en la zona de Eurasia se vivieron sequías catastróficas que tuvieron consecuencias políticas sumamente relevantes. Por ejemplo, en China se produjo una sequía de alrededor de 30 años y que en 1330 fue la detonante de la caída de la dinastía Yuan y el ascenso de la dinastía Ming.

Efectivamente, la extensa sequía provocó una marcada tensión social, generando las condiciones que facilitaron a los rebeldes la conquista del poder políti-

co en China. Sin embargo, lo peor vino a continuación. Esa larga sequía fue el origen de la pandemia que afectó a Eurasia durante casi 300 años: la peste negra, que provocó la muerte de entre 75 y 100 millones de personas en todo el continente. Producto de estos cambios climáticos, se generaron las condiciones propicias para la transmisión de una bacteria animal a la especie humana, la que resultó mortífera y devastadora (ver *Recuadro 1*).

Cambios paleoclimáticos en Chile

En Chile también existe evidencia significativa de cómo el cambio climático ha impactado en la ocupación humana. Un ejemplo es la Pampa del Tamarugal, en la región de Tarapacá, que corresponde a una gran cuenca, con un gran acuífero y con alrededor de

26 mil millones de metros cúbicos almacenados subterráneamente.

Actualmente, es una zona hiperárida, donde los recursos de agua que están en ella se alimentan por pequeños cursos de agua superficial, de algunos centenares de litros por segundo, y que bajan desde la precordillera. Al llegar a la pampa, estos cursos se infiltran, desapareciendo como aguas superficiales, salvo cuando se presentan años lluviosos. Así, en esta cuenca actualmente no existe prácticamente ningún tipo de agricultura regada con aguas superficiales, salvo en una muy pequeña superficie, en las altas quebradas.

Los poblados que permanecen habitados en la pampa –como las ciudades de Pozo Almonte, Huara y La Tirana– se abastecen solo de aguas subterráneas (ver *Figura 2*).

Figura 2: Actualmente, la Pampa del Tamarugal es una zona semiárida y los recursos de agua que están en ella representan pequeños cursos de 200 litros por segundo.



Figura 3: En la Pampa del Tamarugal, durante tres períodos climáticos (14.000 - 10.000 a. C.; 2000 - 500 a. C.; y 900 - 1300 d. C.) la situación era muy distinta. Por sus quebradas descendían ríos de gran importancia que formaron grandes lagunas, cuyas riveras permanecen completamente marcadas hasta hoy.



El acuífero, que es somero solo en el depocentro de la cuenca (zona más baja de la cuenca), permite la alimentación de un bosque freatófito en este sector, cuya extensión actual en su gran mayoría fue plantado en los años 60 para su reforestación.

Pero este escenario de aridez no siempre fue así. Durante tres períodos climáticos (14.000 - 10.000 a. C.; 2800 - 500 a. C.; y 900 - 1300 d. C.) la situación era muy distinta. Por las quebradas (ver *Figura 3*) descendían ríos de gran importancia que alcanzaban el depocentro de la cuenca donde existían diferentes lagunas de varios kilómetros cuadrados, con profundidades que seguramente en algunos sectores excedieron los 15 metros. Las riveras de estas lagunas, donde solían haber especies hidrófilas

herbáceas, permanecen completamente marcadas hasta hoy.

Esta condición de abundancia del recurso hídrico superficial permitió el asentamiento de poblados ancestrales (preíncas) colindantes a los cauces que traían agua permanente.

Efectivamente, existe evidencia de que se cultivaron con aguas superficiales alrededor de 3000 hectáreas, en Pampa Iluga, Tamentica y Ramaditas, y que desde el entonces potente río Tarapacá se descolgaban los canales de riego hacia abajo.

Efectos de una inadecuada consideración de variabilidad climática

De esta manera, la incorrecta evaluación de la variabilidad climática produce situaciones inconvenientes para la sociedad actual, como los ejemplos

Figura 4: En el Maule una serie pluviométrica de 44 años tiene significancia climática.

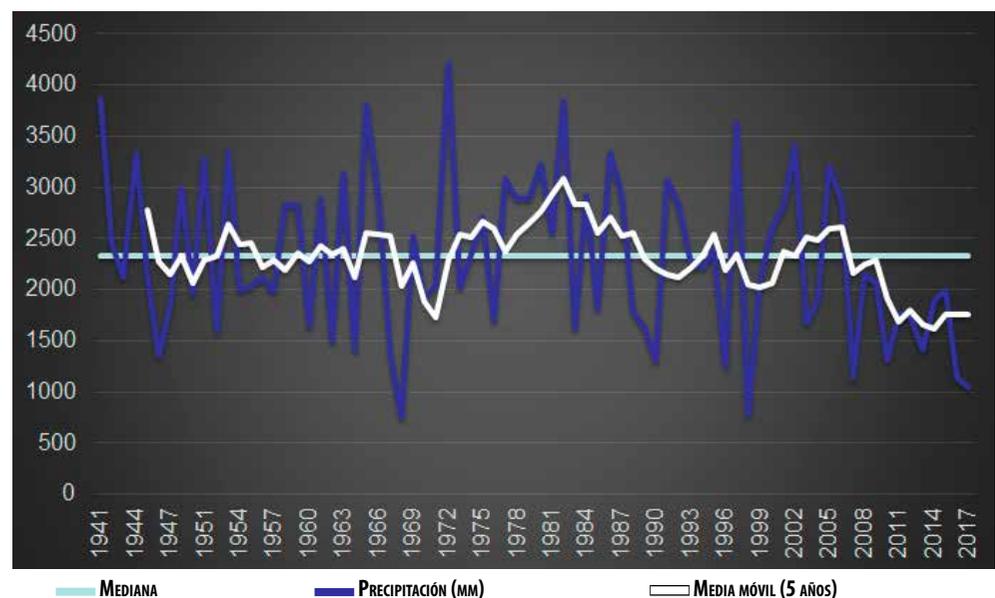
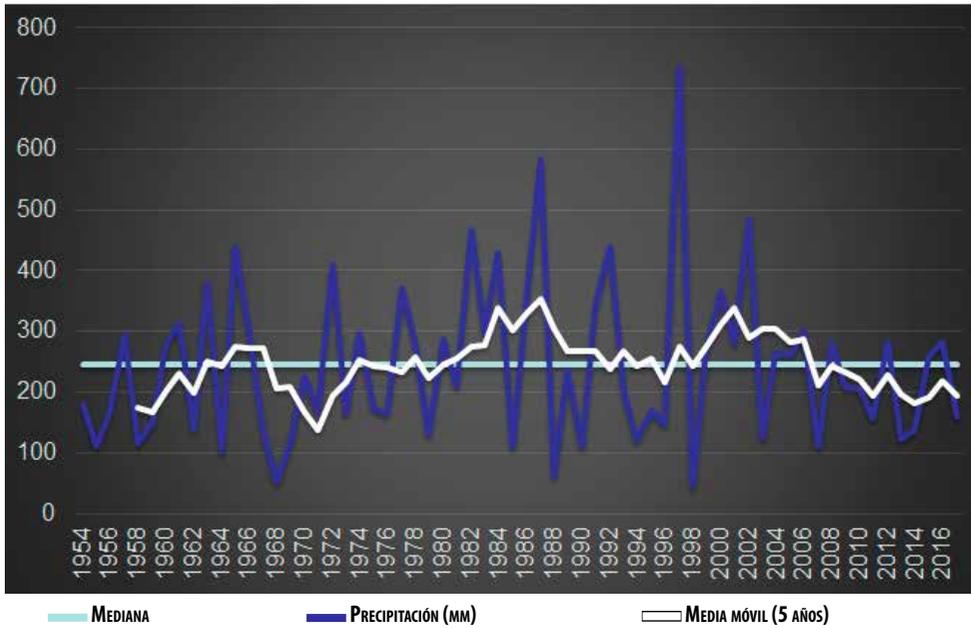


Figura 5: En Aconcagua se debería contar una serie pluviométrica de 114 años para contar con significancia climática.

que se citan a continuación:

- Se edifica en zonas de inundaciones históricas sin las debidas obras de encauzamiento, dejando de considerar que el río algún día reclamará su territorio.
- Se diseñan sistemas de abastecimiento hídrico que fallan en períodos de sequías o aluviones, ya que en la planificación-gestión hidrológica, se utilizan series de datos que carecen de significancia climática utilizando niveles de acuífero y de río medio, lluvias promedio, y diseñando solamente para situaciones hidrológicas medias sin considerar la variabilidad del lugar.
- Se instalan nuevas superficies agrícolas en sectores que carecen de una real seguridad de riego de largo plazo, lo que obliga a la sociedad en su conjunto a adecuarse y asumir ciertos costos económicos duran-

te los períodos de sequía.

- Se construyen obras civiles considerando períodos de retornos que pueden ser demasiado cortos en relación al riesgo involucrado: Por ejemplo, es posible determinar que en el Maule una serie pluviométrica de 44 años ya tiene significancia climática suficiente (ver *Figura 4*), mientras que en Aconcagua la mayor desviación

estándar de su régimen de lluvias determina que se deberían contar con 114 años de datos pluviométricos para contar con significancia climática (ver *Figura 5*).

La importancia del agua subterránea para la humanidad

De toda el agua del planeta, el 97% es agua salada y el 3% es agua dulce. De este

último porcentaje, casi todo el 3% se ubica en los polos, representando un recurso de difícil aprovechamiento actual, al igual que el agua de los glaciares. Así, las aguas subterráneas, que representan un 0,6% del total del agua dulce, se constituyen como casi la única reserva y principal fuente de agua dulce en el planeta (ver *Recuadro 2*).

De acuerdo a datos proporcionados por la Unesco, a nivel mundial el 43% de las aguas que se utilizan para el riego agrícola son de origen subterráneo. En Estados Unidos, el 50% del agua para consumo humano se obtiene también de los acuíferos, mientras que en Chile, entre el 40% y 50% del agua potable que se consume es subterránea.

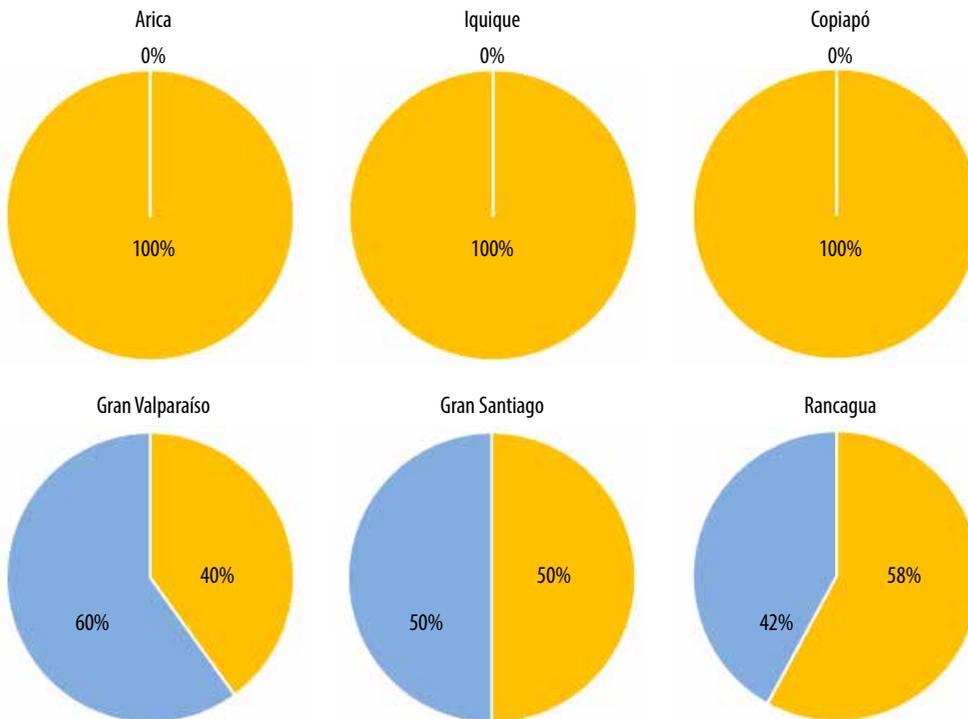
Así, en el país, millones de personas se abastecen del recurso subterráneo. Tal como lo muestra la *Figura 6*, en Arica lo hace el 100% de sus habitantes, al igual que en Iquique y Copiapó. En el Gran Valparaíso, en tanto, un 40% se abastece de agua subterránea; mientras que en Santiago es entre un 40% y 50% y en Rancagua un 58%. Destaca además que en épocas de sequía el grado de dependencia del agua subterránea se intensifica, ya que este recurso es la fuente donde suelen “refugiarse” los usuarios.

De la misma manera, el agua subterránea representa la fuente basal de la seguridad hídrica del sector minero de Chile, tal como se observa en el gráfico de la *Figura 7*, de los derechos de aprovechamiento existentes. Del total de 53 m³/s

Recuadro 2: Distribución del agua en nuestro planeta.

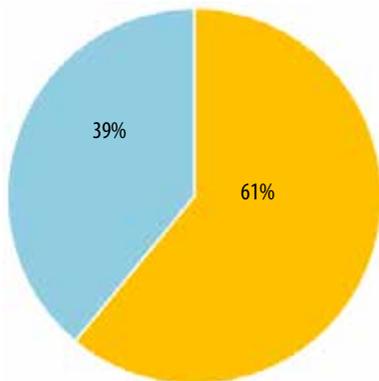
Fuente	Volumen (Km3)	Porcentaje
Océanos y mares	1 320 500 000	97.2000
Capas de hielo	29 000 000	2.1350
Agua subterránea	8 300 000	0.6110
Glaciares	210 000	0.0150
Lagos de agua dulce	125 000	0.0090
Mares internos (salados)	104 000	0.0080
Humedad de suelo	67 000	0.0050
Atmósfera	13 000	0.0010
Ríos	1 250	0.0001
Total	1 358 320 250	100.0000

Figura 6: Proporción del agua potable que proviene de fuentes subterráneas (naranja) versus las fuentes superficiales (azul) en las ciudades de Arica, Iquique, Copiapó, Gran Valparaíso, Gran Santiago y Rancagua.



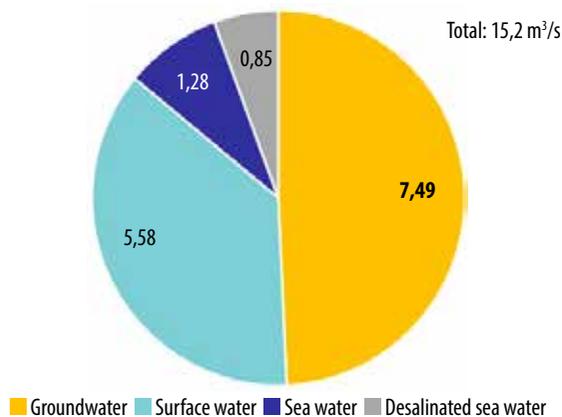
Fuente: Gestionare Consultores.

Figura 7: Derechos de aprovechamiento de aguas del sector minero (consuntivos, permanentes y definitivos) de aguas subterráneas (naranja) versus aguas superficiales (azul).



Fuente: Acosta, O. Chapter Water and Mining. Water Policy in Chile (en edición).

Figura 8: Consumo de agua de la minería del cobre chilena en 2015.



Fuente: Acosta, O. Chapter Water and Mining. Water Policy in Chile (en edición).

usos domésticos; sus características fisicoquímicas son estables estacional e interanualmente; y en zonas áridas es la fuente hídrica más accesible, barata y confiable.

Y ante estas cualidades, cabe preguntarse ¿por qué entonces la opinión pública y algunos tomadores de decisiones han comenzado a asociar su utilización como una práctica intrínsecamente riesgosa y censurable?

Sus enormes beneficios socioeconómicos no han sido lo suficientemente bien difundidos en la opinión pública, como por ejemplo que el agua subterránea permite el acceso a agua potable confiable y de bajo costo a millones de personas; que parte importante del PIB de Chile depende este recurso; que cataliza el desarrollo de comunas extremas al mejorar el acceso a servicios básicos de agua potable y saneamiento; que es el pilar fundamental del agua potable rural en el país; y que permite la preservación de actividades culturales ancestrales, las cuales tienen un gran arraigo a la tierra.

Hidromitos que afectan la gestión

Existen *hidromitos* que lamentablemente están afectando la gestión del agua subterránea en el país. Algunas de estas ideas están asociadas a conceptos erróneos usados con ligereza y aceptados como ciertos para todos los acuíferos del país: colapso del acuífero, situación caótica, sobreexplotación, depredación de acuíferos, agotamiento de la fuente, uso indiscrimina-

como derecho de aprovechamiento en manos de este sector –no como agua extraída–, un 61% corresponde a agua subterránea.

Prácticamente, la mitad de la minería del cobre chileno se abastece de agua subterránea. De acuerdo con las cifras de 2015, del consumo de agua total de 15,2 m³/s, un caudal de 7,49 m³/s correspondieron a agua subterránea, seguido por 5,58 m³/s de agua superficial (ver Figura 8).

Fuente de mayor resiliencia frente al cambio climático

El agua subterránea cuenta con cualidades ampliamente conocidas: está presente en casi todas partes; tiene la capacidad de almacenarse regulando las variaciones interanuales; es de libre acceso para la bebida y otros

do, impactos ambientales descontrolados, sequías y desertificación provocadas.

Todos estos son conceptos más bien de índole emocional, cuyos calificativos impactan en la gestión del agua y crean una percepción que podría no ser cierta. Así, algunas experiencias negativas a menudo son amplificadas y dramatizadas por actores bien intencionados, que sin embargo, no siempre están bien informados. Y al mismo tiempo, no se explica que gran parte de las caras negativas del uso de las aguas subterráneas serían solucionables con una gestión hídrica adaptativa y una adecuada mitigación de impactos.

Si bien la desconfianza frente al uso del agua subterránea está basada en casos concretos en que el descenso del nivel de acuífero, por la explotación y/o variabilidad climática, ha provocado que algunos pozos que se sequen o entren en falla,

Figura 9: La DGA reporta mensualmente el comportamiento de nivel freático en 29 pozos de control piezométrico ubicados en 16 cuencas y sólo 5 pozos muestran un descenso significativo del nivel freático.



o se han producido impactos ambientales en cuencas donde habían humedales asociados a las aguas subterráneas, también es verdad que estos casos particulares no representan la realidad nacional y que la evidencia muestra que en general no se está en presencia de perjuicios generalizados e irreversibles. Además, como el descenso del nivel es inherente a toda explotación de agua subterránea, resulta necesario definir técnica y legalmente conceptos como “rápido descenso”, “descenso sostenido” y “sus-

tentabilidad del acuífero que se encuentra en peligro”, “sustentabilidad del acuífero que ha sido afectada” o “grave riesgo de agotamiento de un acuífero”.

Evaluar la situación caso a caso

La Dirección General de Aguas (DGA) publica mensualmente el documento “Información pluviométrica, fluviométrica, estado de embalses y aguas subterráneas”, que da cuenta de muchos aspectos relativos a las aguas subterráneas, reportando el comporta-

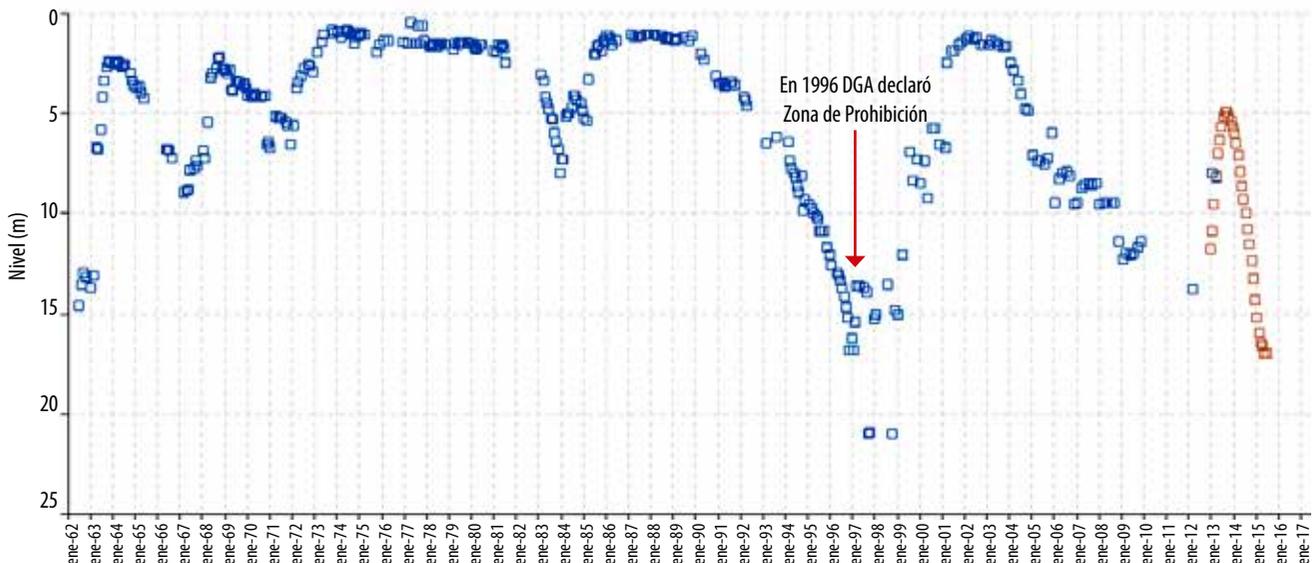
miento de nivel freático mensual de veintinueve pozos de control piezométrico, ubicados en dieciséis cuencas distintas.

Al analizar los niveles de estos pozos, se observa que trece de ellos están estables, seis están subiendo, mientras que los diez restantes presentan niveles piezométricos en descenso. De estos diez que están disminuyendo, hay cinco que lo hacen a una tasa de entre 10 y 50 centímetros anuales, mientras que los otros cinco presentan tasas mayores al medio metro por año (ver Figura 9). Así, de los veintinueve pozos, solo cinco tienen un descenso del nivel freático que podría considerarse significativo, los cuales están ubicados en tres acuíferos: Azapa, Copiapó y Limarí.

Valle de Azapa y Copiapó

En la Figura 10 se muestra la evolución de niveles del pozo Las Riveras del acuífero

Figura 10: Acuífero de Azapa (San José): Nivel del agua subterránea en el pozo de control “Las Riveras” (65 años de registros), el acuífero se vacía y llena una y otra vez.



Fuente: Acosta, Orlando. Elaborada a partir de registros DGA.

de Azapa, el cual ha presentado momentos complejos, como el de 1996, con un abrupto descenso de la napa que llevó a la DGA a declarar la primera zona de prohibición de Chile. No obstante lo anterior, al revisar la serie completa de datos existentes (65 años), puede observarse que el acuífero de Azapa se vacía y se llena a lo largo del tiempo, una y otra vez, con la recuperación de niveles asociada a las crecidas estivales del río San José, que ocurren solo algunos años, y cuando el acuífero se vuelve a rellenar prácticamente hasta su nivel original.

Los 65 años de registro son necesarios para entender este comportamiento y demuestran que la perspectiva histórica debe considerarse frente a cada uno de los acuíferos que se gestionen antes

de apresurarse y tomar medidas de restricción.

Para el acuífero de Copiapó, la *Figura 11* da cuenta de que si bien es real que existe una zona con la mayor tasa de descensos reportada en Chile, otras zonas del mismo acuífero descienden a una tasa menor e, incluso, en la parte baja del mismo, los niveles no presentan cambios, mostrando una pequeña recuperación desde 2000 en adelante. Es decir, incluso dentro de un mismo acuífero se debe analizar por sectores lo que está sucediendo para entender el fenómeno.

No es casualidad que acuíferos como Azapa, Copiapó y Limarí presenten estos desafíos de gestión: todos ellos tienen un reducido volumen de almacenamiento y baja capacidad de regulación interanual del

embalse subterráneo, presentan una alta variabilidad en su recarga producto de la irregularidad de las escorrentías superficiales y, por último, existe una excesiva concentración de las extracciones en algunos sectores.

Un asunto estratégico para Chile

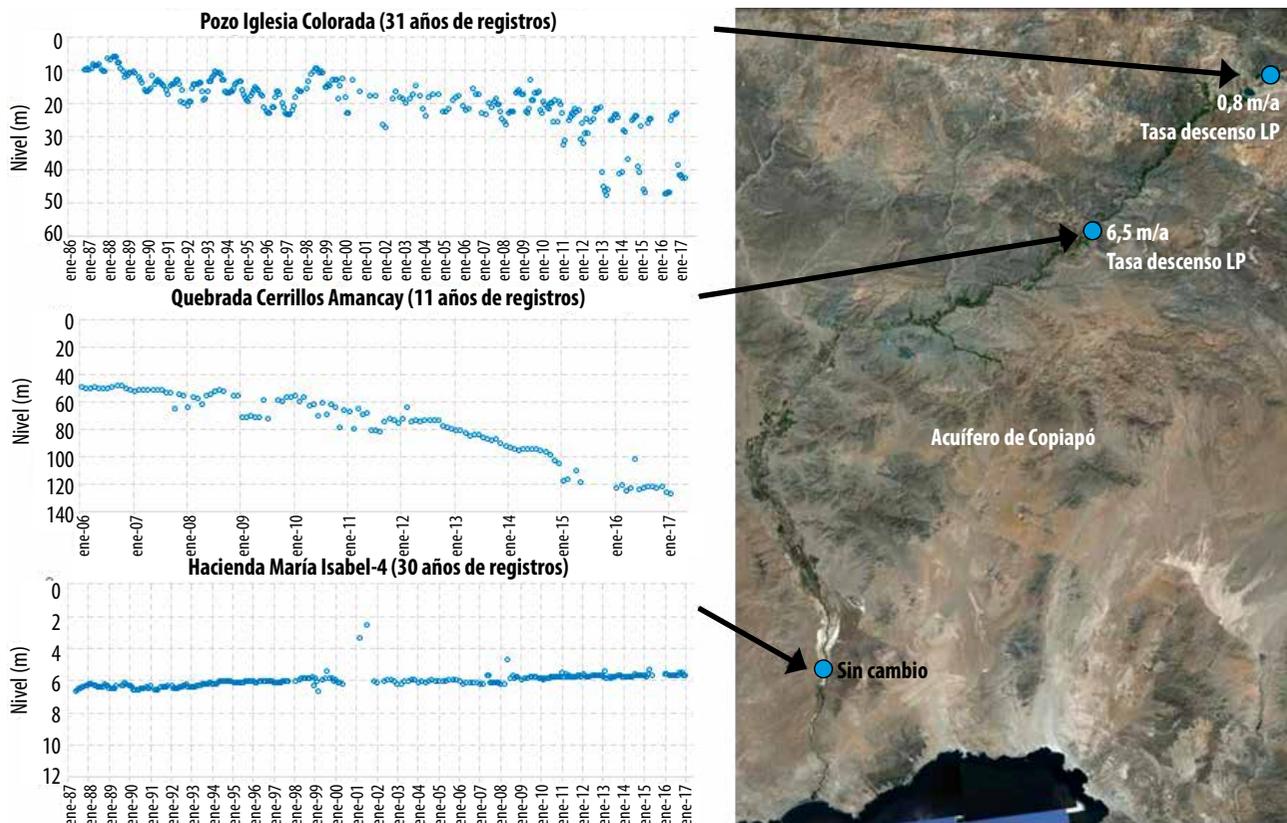
La correcta explotación del agua subterránea en el contexto de cambio climático del siglo XXI debe ser un asunto estratégico para el país. El World Resources Institute (WRI) señala que actualmente Chile presenta una condición de estrés hídrico bajo-medio, el que, sin embargo, hacia 2030 variará, pasando a una condición de estrés hídrico extremadamente alto (ver *Figura 12*) y ya que se proyecta una

mayor demanda y menor disponibilidad del recurso.

Chile, durante la década de 1980 y 1990 tenía un PIB que bordeaba los US\$2.500 por habitante; posteriormente, desde 2000 se experimentó un abrupto crecimiento que en veinte años multiplicó por diez el PIB per cápita. Paralelamente, la población fue aumentando consistentemente, pasando de ser un país con casi 11 millones de habitantes a uno con alrededor de 18 millones. Y las expectativas expresan que hacia el 2030 el PIB debería bordear los US\$30.000 per cápita, con mayor desarrollo, actividad económica, demanda de agua y con alrededor de 20 millones de habitantes.

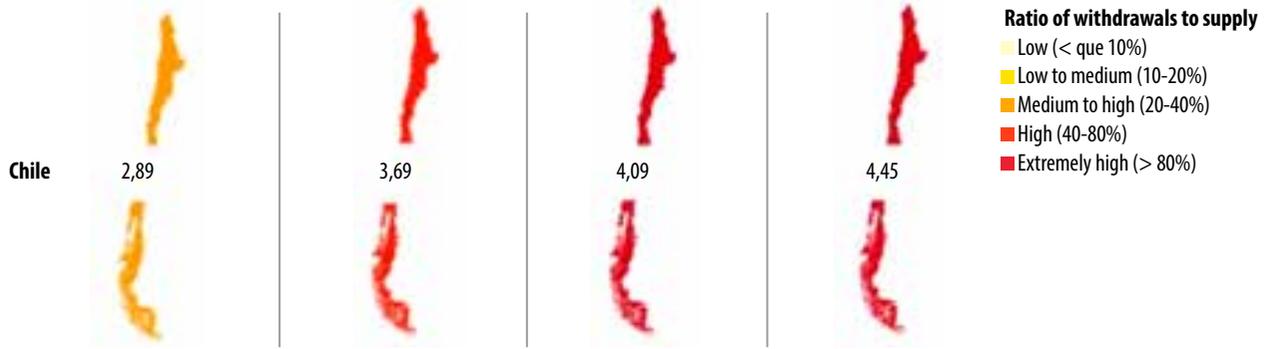
No obstante, la hidrología evidencia que en los últimos años la disponibilidad hídrica superficial ha des-

Figura 11: Tasas de descenso del acuífero de Copiapó (pozo Iglesia Colorada, Quebrada Cerrillos Amancay y Hacienda María Isabel -4).



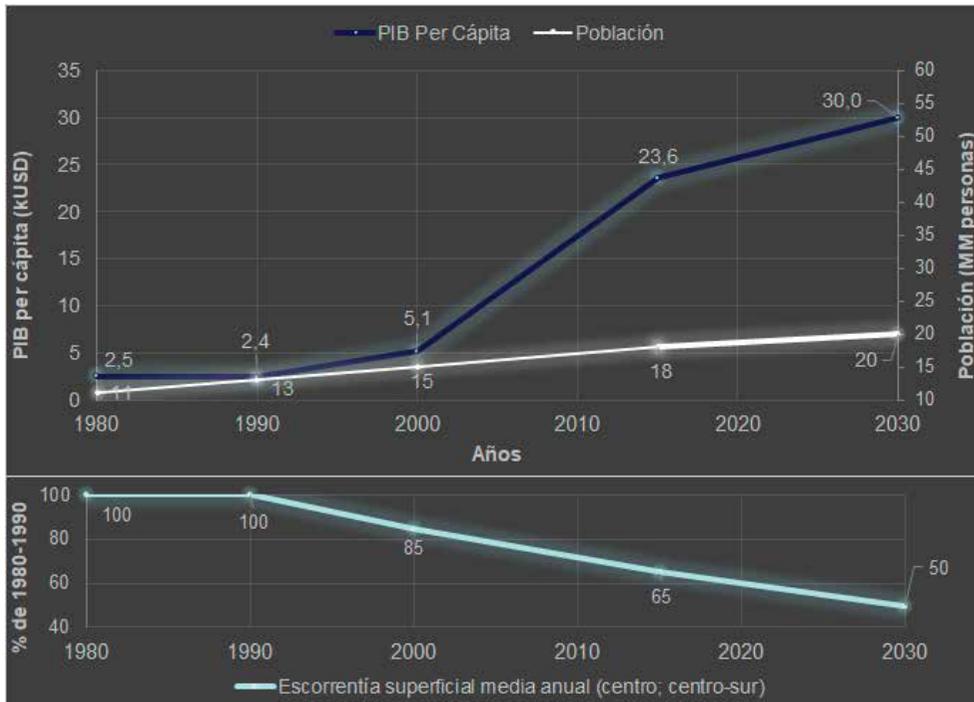
Fuente: Gestinare Consultores, elaboración a partir de registros de la DGA.

Figura 12: Estrés del agua desde 2010 a 2040.



Fuente: World Resources Institute.

Figura 13: De aquí a 2030 se proyecta mayor demanda y menor disponibilidad del agua.



Fuente: Gestionare Consultores. Elaboración desde registros DGA.

cendido y las proyecciones anuncian que hacia el 2030 debería caer aún más, por lo que, de acuerdo al gráfico de la Figura 13, resulta evidente que la brecha y desafío que se presenta a futuro es sumamente importante.

El cambio climático desafía la seguridad hídrica

El agua subterránea será una pieza fundamental frente al cambio climático y una parte central de la solución, pues aumenta la capacidad

humana de adaptarse a la variabilidad climática al ser una fuente accesible, confiable y de bajo costo.

En Chile, recientemente se ha probado que el agua subterránea es una excelente fuente basal que permite dar resiliencia a los usos potables y agrícolas ante sequías extremas. Y no existe duda de que su rol estratégico –que otorga seguridad hídrica y alimentaria– se intensificará en la próxima década en todo el mundo, lo que impone un desafío en su gestión.

Y aunque otras fuentes hídricas de alto consumo energético (depuración y desalación) también serán parte de la solución, aún su costo las hace inviables para muchos usos, como por ejemplo, para la agricultura.

Conclusiones

Se requiere que todos quienes tienen poder de decisión sobre fondos públicos y privados visualicen el riesgo involucrado y que inviertan desde ya en este recurso estratégico, pues al agua sub-

terránea se le debe brindar la atención que merece.

Se debe dotar a los organismos públicos y privados de mayores presupuestos, fortaleciendo las capacidades institucionales y creando unidades especializadas de aguas subterráneas enfocadas en investigación y desarrollo.

Otro aspecto relevante es la necesidad de ampliar masivamente la red nacional de control piezométrico, introduciendo tecnologías para monitoreo y reporte público de la data, sin temor a las alianzas público-privadas.

Se debe lograr que las entidades de gobernanza local del agua (organismos de cuenca y unidades de agua, entre otros) funcionen adecuadamente y que asuman roles activos en la gestión dinámica del agua subterránea, ideando para ello incentivos y financiamiento adecuados.

Finalmente, se debe generar una legislación que establezca instrumentos apropiados para permitir una gestión adaptativa del agua subterránea (pozos de sequía, recarga artificial, explotación transitoria de reservas dinámicas, puntos de captación alternos y co-financiamiento público-privado de gestión colectiva). 🌍

Recarga artificial de acuíferos: Un aporte de SCM para enfrentar la escasez hídrica

En 2017 se infiltraron 396.174 m³ de agua, lo que equivale a 159 piscinas olímpicas de capacidad estándar de 2.500 m³.

Entendiendo la importancia del nuevo escenario de cambio climático, con el aumento constante de temperaturas y eventos climatológicos, la Sociedad del Canal de Maipo implementó una “Planta Piloto de Recarga de Acuífero”, con el objetivo de mejorar la gestión de los recursos hídricos y generar un modelo que pueda ser replicado en otros puntos de la región y del país.

La planta se encuentra en el Campus Antumapu de la Universidad de Chile, comuna de La Pintana, y está diseñada para un caudal de 50 l/s de agua provenientes del río Maipo.

Objetivos:

- Prepararse para el escenario hídrico futuro, proponiendo medidas de mitigación de escasez de agua para proteger los intereses de regantes y desarrollo del país.
- Sentar las bases teórico prácticas para la implementación de plantas de recarga artificial y apoyar una política de gestión hídrica permanente y continua, que permita recargar los acuíferos en periodos de abundancia.
- Promover el uso eficiente del recurso superficial y subterráneo, mejorando o promoviendo la sustentabilidad de la gestión del recurso, especialmente en la mediana y pequeña agricultura.

Métodos de infiltración utilizados:

1. Piscinas, balsas o lagunas, que permiten poner el agua en contacto con las primeras capas de suelo, para que esta ingrese por gravedad al subsuelo y genere recarga.
2. Pozos gravitacionales, que infiltran el agua a una profundidad mayor, conduciéndola de manera más directa al acuífero principal.

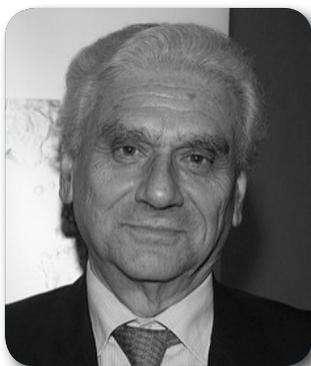
Para más información ingrese a www.scmmaipo.cl/canalistas/recarga-de-acuiferos



*Sociedad del Canal
de Maipo*

Desde 1827 agregando valor a la gestión hídrica del país.

Cambio climático y recarga artificial de acuíferos



Fernando Peralta*

Ponencia realizada durante el Seminario 2017 "Cambio Climático y Aguas Subterráneas" de Alhsud Chile.

Fernando Peralta es director del capítulo chileno de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (Alhsud) y presidente de la Confederación de Canalistas de Chile. Peralta es ingeniero civil, consultor y gerente general en Fernando Peralta y Cía., cuenta con una trayectoria profesional de más de 45 años.

Las consecuencias del cambio climático son conocidas: menor precipitación sólida, menor precipitación en general, aumento de caudales máximos en poco tiempo, mayor desfase temporal entre oferta y demanda, mayor incertidumbre en proyecciones a futuro y aumento de

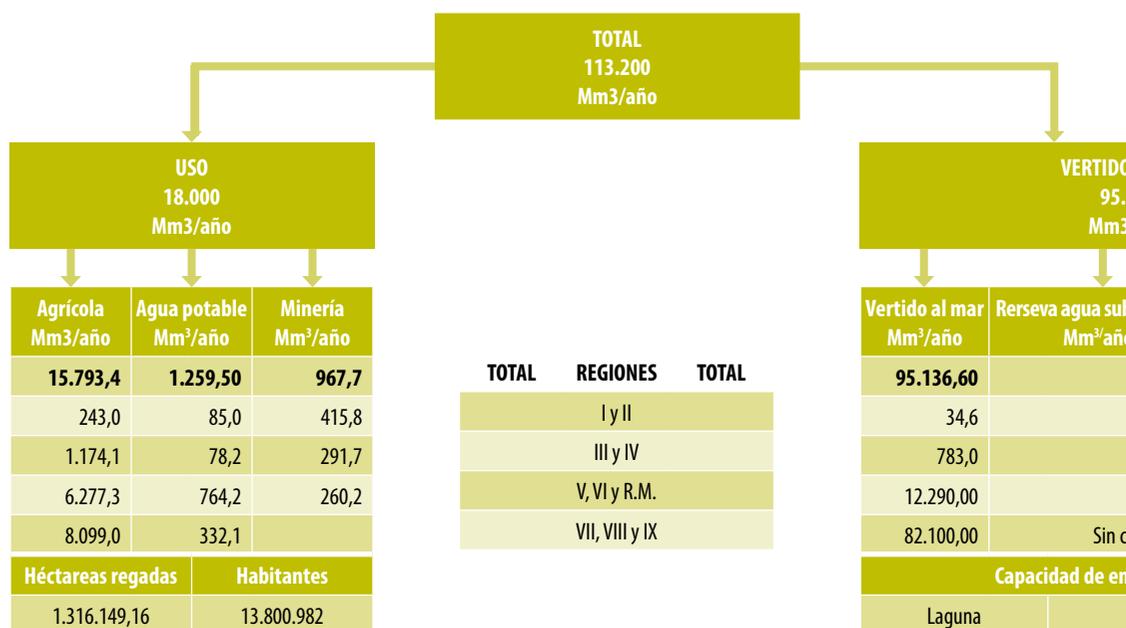
la necesidad de regulación. Estos factores se suman a la obligación de prepararse para un futuro incierto y cambiante, pues se desconocen las condiciones que existirán a largo plazo.

Chile en cifras

La Figura 1 muestra un balance hídrico de Chile (desde la región de Tarapacá hasta

la región de la Araucanía), con datos de 2008. El cuadro cuantifica un total de 113.200 millones de metros cúbicos por año ($m^3/año$), de los cuales, 18.000 $m^3/año$ son utilizados, mientras que los otros 95.200 millones de $m^3/año$ son vertidos en el mar. De los metros cúbicos en uso, 15.793 millones $m^3/año$ se utilizan en la agricul-

Figura 1: Recursos hídricos en Chile, I - IX regiones (2008).



Fuente: Elaborado por Fernando Peralta. Fuentes: Vertido al mar, DGA (2003-2007); Minería, DGA (2008); Embalses Superficiales, CNR (2006); Uso Agrícola, SII (2006); y

tura, seguidos por 1.259 millones de m³/año para agua potable y 967 millones m³/año para la minería.

En cuanto a las aguas vertidas en el mar –que corresponden a 95.200 millones de m³/año–, casi un 100% de estas se vierte directamente allí, seguidas de 465.000 millones de m³/año que se transforman en reserva de

agua subterránea y 5.262 millones de m³/año destinados a embalses superficiales.

Al contabilizar las reservas de aguas subterráneas, desde la región de Tarapacá hasta la Metropolitana, las cifras dan cuenta de que en esa zona hay 65.000 millones de m³/año de reserva de los embalses subterráneos, frente a los embalses superficiales,

que suman alrededor de 5 mil 500 millones de m³/año, que representa apenas un décimo de la capacidad de los embalses subterráneos.

Pozos, volumen sustentable y caudales otorgados

Para realizar la recarga artificial se necesita contar con un lugar para ello y,

posteriormente, con la capacidad para poder extraer el agua subterránea que se haya infiltrado.

En Chile, según cifras proporcionadas por el Atlas del Agua de la Dirección General de Aguas (DGA), existen alrededor de 47 mil 500 pozos (ver Figura 2). Los metros cúbicos otorgados ascienden a los 467,306 m³/seg, que

Figura 2: Número de pozos, caudal otorgado, volumen sustentables y caudal promedio por pozo.

Región	N° pozo	Q/m ³ otorgados	Volumen sustentable Mm ³	Promedio Q/pozo L/S
XV	558	3.527	39,74	6,32
I	877	6.638	73	756
II	562	14,304	271,55	25,45
III	1.026	28,786	300,36	28,03
IV	6.025	27,895	344,47	4,63
V	8.615	66,13	432,42	7,67
RM	6.547	123,51	1.435,98	18,86
VI	6.136	58,381	636,97	9,51
VII	3.240	54,515	2.676,54	16,82
VIII	5.951	29,22	2,528,27	4,91
IX	3.476	18,11	2.676,09	5,2
XIV	1.183	11,59	1.843,46	9,79
X	2.526	23,598	3.085,50	9,34
XI	261	0,465	-	-
XII	390	0,657	-	-
	47.569	467,306	16.074,30	9,82

Fuente: Dirección Genral de Aguas (DGA).

Embalse Mm ³ /año	Embalses superficiales Mm ³ /año
465.000	5.262,2
400.000	64,0
15.000	1.480,0
50.000	1.283,2
cuantificar	2.435,0
Embalse Mm ³ /año	
9.275	

Habitantes I-IX regiones, INE Censo (2002)

Recuadro 1: Gestión del agua en el país: Derechos y disponibilidad hídrica subterránea.**Número de derechos subterráneos distribuido por regiones**

Macrozona	Región	Número de Derechos Subterráneos								
		Definitivo	[N°]	[%]	Provisional	[N°]	[%]	Total	[N°]	[%]
Norte	XV		558	1,2	7	1,2	565	1,2		
	I		877	1,9	9	1,5	886	1,9		
	II		545	1,2	17	2,8	562	1,2		
	III		970	2,1	56	9,2	1.026	2,2		
Centro	IV		6.147	13,1	58	9,6	6.205	13,0		
	V		8.496	18,0	119	19,6	8.615	18,1		
	RM		6.391	13,5	156	25,7	6.547	13,8		
	VI		5.951	12,7	185	30,4	6.136	12,9		
Sur	VII		3.240	6,9	0	0	3.240	6,8		
	VIII		5.951	12,7	0	0	5.951	12,5		
	IX		3.476	7,4	0	0	3.476	7,3		
	XIV		1.183	2,5	0	0	1.183	2,5		
Austral	X		2.526	5,4	0	0	2.526	5,3		
	XI		261	0,6	0	0	261	0,5		
	XII		390	0,8	0	0	390	0,8		
	Total		46.962		Total	607		47.569		

Caudal otorgado de derechos subterráneos distribuido por regiones

Macrozona	Región	Derechos Subterráneos - Caudal Otorgado								
		Definitivo	[l/s]	[%]	Provisional	[l/s]	[%]	Total	[l/s]	[%]
Norte	XV		3.491	0,77	36	0,25	3.527	0,75		
	I		6.426	1,42	212	1,47	6.638	1,42		
	II		14.123	3,12	181	1,25	14.304	3,06		
	III		28.381	6,27	385	2,66	28.766	6,16		
Centro	IV		26.115	5,77	1.780	12,31	27.895	5,97		
	V		65.220	14,40	910	6,29	66.130	14,15		
	RM		116.950	25,82	6.560	45,34	123.510	26,43		
	VI		53.980	11,92	4.401	30,43	58.381	12,49		
Sur	VII		54.515	12,04	0	0	54.515	11,67		
	VIII		29.220	6,45	0	0	29.220	6,25		
	IX		18.110	4,00	0	0	18.110	3,88		
	XIV		11.590	2,56	0	0	11.590	2,48		
Austral	X		23.598	5,21	0	0	23.598	5,05		
	XI		465	0,10	0	0	465	0,10		
	XII		657	0,15	0	0	657	0,14		
	Total		452.841		Total	14.465		467.306		

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA). "Atlas del Agua" (2016).

representan la capacidad de extracción. Y el volumen sustentable en todos estos acuíferos –exceptuando las últimas dos regiones: de Aysén y de Magallanes–, según el criterio de la DGA, suma 16.074 m³/seg, es decir, esa cifra representa lo que se podría extraer con la recarga natural.

Las dos primeras figuras del *Recuadro 1* muestran el caudal otorgado y el número de derechos subterráneos distribuidos por

regiones; mientras que las otras dos figuras restantes expresan los volúmenes de los sectores hidrológicos de aprovechamiento común por regiones y los volúmenes de los sectores hidrológicos de aprovechamiento común por macrozonas.

Chile cuenta con alrededor de 6 mil millones de m³ en embalses superficiales; mientras que para embalses subterráneos la cifra se aproxima a los 15 mil millones de m³ para las regiones

de Tarapacá y Coquimbo; y 50 mil millones de m³, aproximadamente, para las regiones de Valparaíso, O'Higgins y Metropolitana

La infraestructura, en tanto, es de 47.569 pozos distribuidos en el país, con una capacidad de extracción de 467 m³/s.

Condiciones para la recarga artificial

La primera condición que permite la recarga de un acuífero es su existencia y

que esté parcialmente lleno. Luego, que exista disponibilidad de derechos de agua superficial, conocimiento del volumen de regulación y de su variación temporal, monitoreo de niveles estáticos y de caudales extraídos (con análisis periódico de su estado), y por último, que la calidad de agua superficial sea similar a la subterránea.

Los mecanismos de recarga artificial se dividen en lagunas prediales o co-

Volúmenes de los sectores hidrológicos de aprovechamiento común por regiones

Macrozona	Región	Sustentable	[m³/año]	[%]	Disponible	[m³/año]	[%]	Comprometido	[m³/año]	[%]	Solicitado	[m³/año]	[%]
Norte	XV		39.735.360	0,2	56.607.120	0,3		161.126.520	1,3		185.882.911	1,2	
	I		73.006.437	0,5	87.341.914	0,5		238.691.939	1,9		353.256.481	2,3	
	II		271.548.715	1,7	198.661.135	1,0		272.166.527	2,2		103.349.210	0,7	
	III		300.356.811	1,9	336.842.796	1,7		778.802.926	6,4		1.193.028.713	7,6	
	IV		344.470.881	2,1	577.578.687	3,0		735.460.354	6,0		1.012.389.892	6,5	
Centro	V		432.424.786	2,7	663.167.392	3,4		1.648.581.519	13,5		1.376.036.757	8,8	
	RM		1.435.978.534	8,9	2.838.024.159	14,7		3.669.865.445	30,1		5.552.260.009	35,4	
	VI		636.973.588	4,0	1.633.969.405	8,5		1.472.766.281	12,0		1.895.056.322	12,0	
	VII		2.676.544.227	16,7	3.048.716.331	15,8		1.400.266.026	11,4		1.683.986.789	10,8	
Sur	VIII		2.258.269.344	14,0	2.258.269.344	11,7		583.354.705	4,8		828.238.730	5,3	
	IX		2.676.091.811	16,6	2.676.091.811	13,9		433.266.414	3,5		477.590.671	3,1	
	XIV		1.843.465.636	11,5	1.843.465.636	9,5		317.521.244	2,6		388.218.984	2,5	
	X		3.085.499.264	19,2	3.085.499.264	16,0		529.410.498	4,3		592.375.206	3,8	
Austral ⁽¹⁾	XI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	XII	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Total		16.074.365.395		19.304.234.996		12.241.280.398		15.641.670.676					

(1) Acuíferos y SHAC por identificar

Volúmenes de los sectores hidrológicos de aprovechamiento común por macrozonas

Macrozona	Sustentable	[m³/año]	[%]	Disponible	[m³/año]	[%]	Comprometido	[m³/año]	[%]	Solicitado	[m³/año]	[%]
Norte		1.029.118.204	6,4	1.257.031.652	6,5		2.186.248.266	17,9		2.847.907.207	18,2	
Centro		5.181.921.135	32,2	8.183.877.288	42,4		8.191.479.271	66,9		10.507.339.877	67,2	
Sur		9.863.326.056	61,4	9.863.326.056	51,1		1.863.552.861	15,2		2.286.423.592	14,6	
Austral ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Total		16.074.365.395		19.304.234.996		12.241.280.398		15.641.670.676				

(1) Acuíferos y SHAC por identificar

munitarias, pozos profundos para infiltrar, zanjas de infiltración, canales de regadío –que se pueden combinar con revestimientos–, y sobre regadío temporal en invierno.

En cuanto al origen del agua y de los sitios para infiltrar, estos provienen de los caudales superficiales y de los ríos que actualmente no se pueden emplear por la ausencia de un lugar para almacenar. Entre las regiones de Tarapacá y Coquimbo

hay disponibles 13 mil millones de m³ que se vierten al mar; mientras que entre las regiones del Maule y de la Araucanía ascienden a 82 mil millones de m³. En cuanto a los sitios para infiltrar, existen alrededor de 150 mil kilómetros de canales de riego, con 1.200.000 hectáreas regadas y una cantidad no calculada de kilómetros cuadrados de cauces de ríos de propiedad fiscal.

En la *Figura 3* se observa el río Diguillín, que en todas

las líneas azules muestra los cursos de agua superficial, de esteros y de canales donde escurre agua, ya sea naturalmente durante algunos meses del año, como artificialmente en otros períodos. Cada punto rojo en el mapa representa un pozo, que se encuentran distribuidos homogéneamente, al igual que los cursos de agua. Entonces, si el nivel de la napa de uno de estos desciende por bombeo, para elevarlo se debe

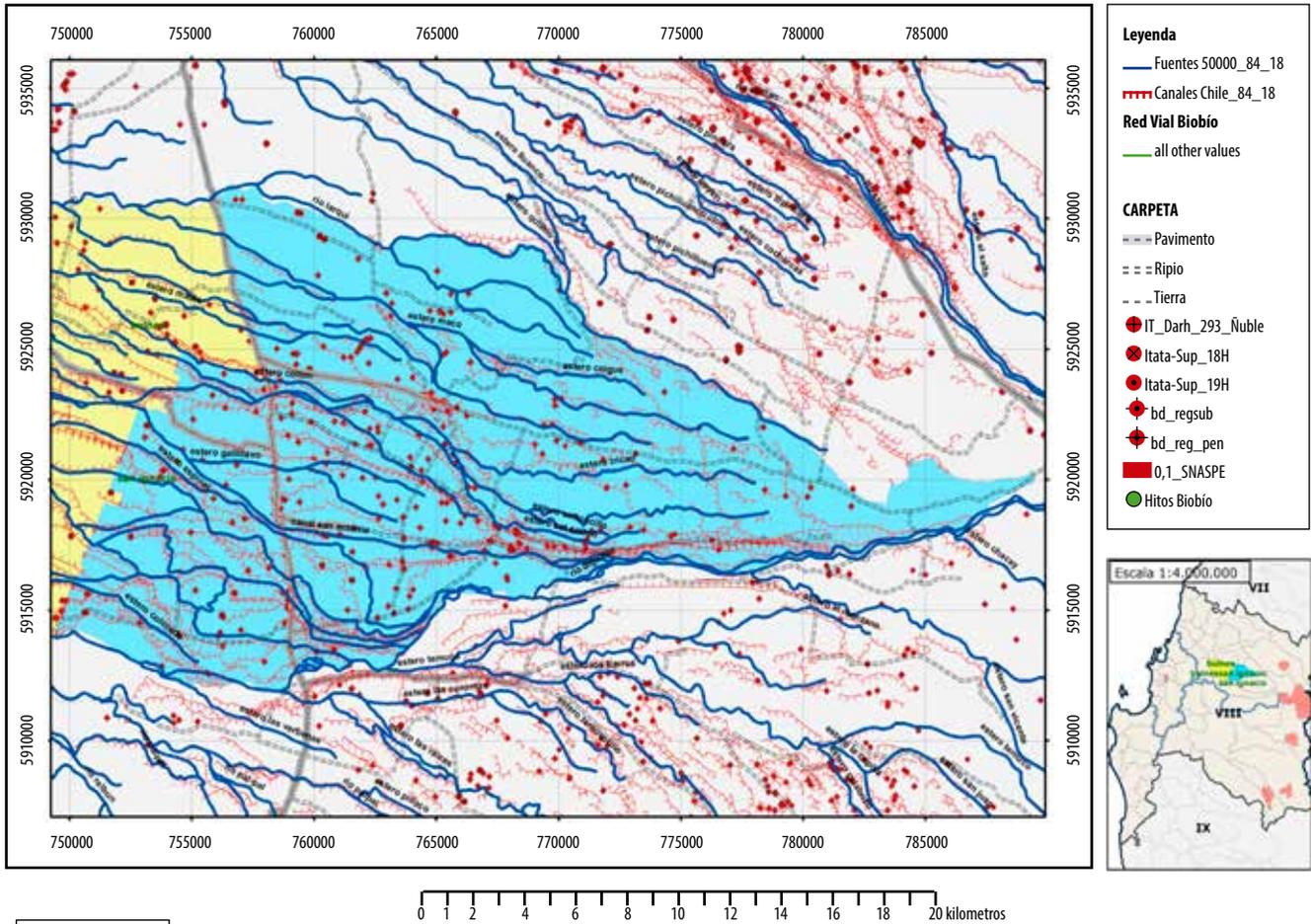
recurrir al agua de los canales. Y para esta tarea, en esta zona desde hace ya siete años existe una junta de vigilancia y varias comunidades de agua, que vienen desarrollando un trabajo que ha tenido resultados muy favorables.

Criterios para permitir la recarga artificial

- Se debe explicitar que en los derechos de aprovechamiento de aguas sub-

Figura 3: Cursos de agua superficial y pozos del río Diguillín.

Comuna San Ignacio



DATU: WGS 84
 ESCALA: 1:180:000
 Fecha: 03/08/2019
 CMMDP

Comuna : San Ignacio
 Fuente : S.H.C. Itata Sup.
 Fuente de datos : DGA /CPA

- terráneos otorgados, sus caudales dependen de la ineficiencia de uso de los derechos de aguas superficiales en un 60% aproximadamente.
- Ponderar los cauces de los ríos y los canales de riego como infraestructura alternativa de infiltración.
- El aumento de eficiencia en marcha del uso del agua reducirá a un 30% los caudales subterráneos disponibles otorgados.
- A medida que progresa la eficiencia de uso del agua superficial se debe implementar la recarga artificial.
- Se deben considerar también las descargas de nivel programadas como un pasivo temporal que se compensa con los compromisos de recarga.
- Integración permanente y progresiva de las aguas subterráneas en las juntas de vigilancia.
- Permitir desarrollar la personalidad de cada cuenca hidrográfica para establecer los acuerdos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.
- Cada cuenca o cada región debe tener su propio criterio enmarcado en un acuerdo amplio.

ASESORÍA ESTRATÉGICA Y ESPECIALIZADA EN RECURSOS HÍDRICOS Y MEDIO AMBIENTE

“*Los embalses superficiales frente a los embalses subterráneos resultan totalmente complementarios entre sí y representan una suerte de seguro ante años muy secos.*”



- Comenzar el proceso con los conocimientos y la infraestructura existente con flexibilidad para perfeccionarse: desburocratizar.

Costo de la recarga artificial

El costo de introducir el agua existente a los acuíferos es alrededor de diez veces menor que el valor de la construcción de los embalses superficiales para un mismo volumen.

El costo de la extracción del agua subterránea, en tanto, representa un costo adicional calculable y conocido en cada cuenca, sabiendo además que la rentabilidad del cultivo no se ve imposibilitado por dicho costo. El agua subterránea, por lo general, se encuentra en el lugar de la demanda y disminuye

drásticamente la necesidad de canales de conducción y elementos de distribución.

Embalses superficiales v/s subterráneos

A la hora de comparar los embalses superficiales frente a los embalses subterráneos, estos resultan totalmente complementarios entre sí y representan una suerte de seguro ante años muy secos.

Dado que el embalse subterráneo ya se encuentra construido, permite adelantar la oferta mientras se edifican los embalses superficiales.

Los embalses subterráneos, finalmente, también poseen la cualidad de ser amigables con el medio ambiente y con el caudal ecológico. 

Disponemos de un equipo técnico multidisciplinario que nos permite colaborar en todas las fases de los proyectos que involucren el recurso hídrico; desde las etapas tempranas de estudios y exploración, pasando por la modelación y el diseño de infraestructura, hasta el monitoreo, seguimiento y operación.

MANEJO Y GESTIÓN SOSTENIBLE Y RESILIENTE A LARGO PLAZO

ESPECIALISTAS EN MODELACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

TRABAJO INTEGRADO ENTRE INGENIERÍA Y MEDIO AMBIENTE

AMPLIA EXPERIENCIA EN CONTROL HIDROGEOLÓGICO DE CAMPO

LÍDERES EN RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS EN CHILE

Observaciones, proyecciones en un clima cambiante



René Garreaud*

Ponencia realizada durante el Seminario 2017 "Cambio Climático y Aguas Subterráneas" de Alhsud Chile.

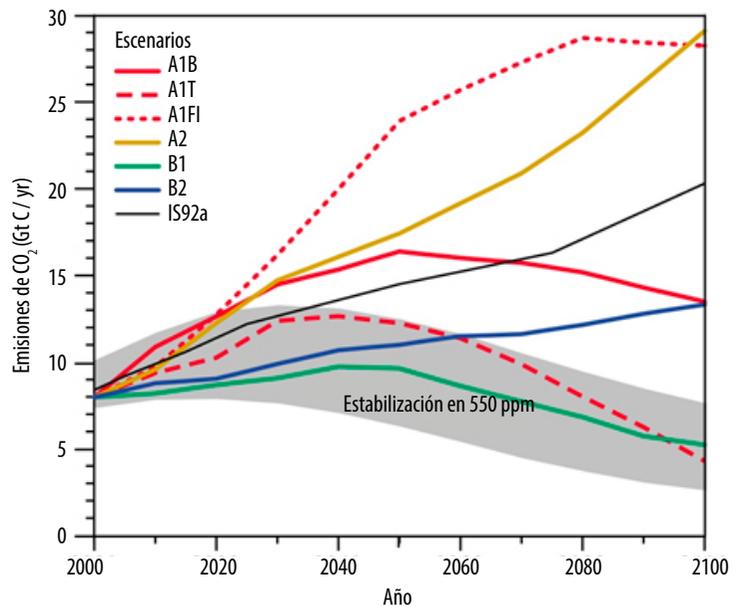
René Garreaud es profesor titular en el departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Garreaud es Ph.D. Atmospheric Sciences por la Universidad de Washington, master of Science en Geofísica e ingeniero civil por la Universidad de Chile. Cuenta con más de 80 publicaciones científicas en ISI journals y otros journals, además de publicaciones de capítulos en libros.

Existe información disponible para afirmar que Chile será más seco y cálido a futuro y que los gases de efecto invernadero en la atmósfera provocarán un aumento de las temperaturas, presentándose un problema que radica en la serie de retroalimentaciones –algunas positivas y otras negativas– que pueden amplificar esta señal y que por tanto, invitan a actuar en función de los modelos de circulación general.

La incertidumbre sobre el futuro no radica en los modelos, sino más bien en conocer cuánto CO₂ se emitirá a la atmósfera y en determinar qué va pasar durante este siglo.

Desde la actualidad –y hasta 2100– se estima que la cantidad de gases de CO₂ equivalentes a lo que se colocaría en la atmósfera aumentará notoriamente. Y aunque existen múltiples escenarios intermedios y todos pueden resultar probables, los climatólogos

Figura 1: Escenarios climáticos futuros. Emisiones de GEI (CO₂, ...) + GCMs



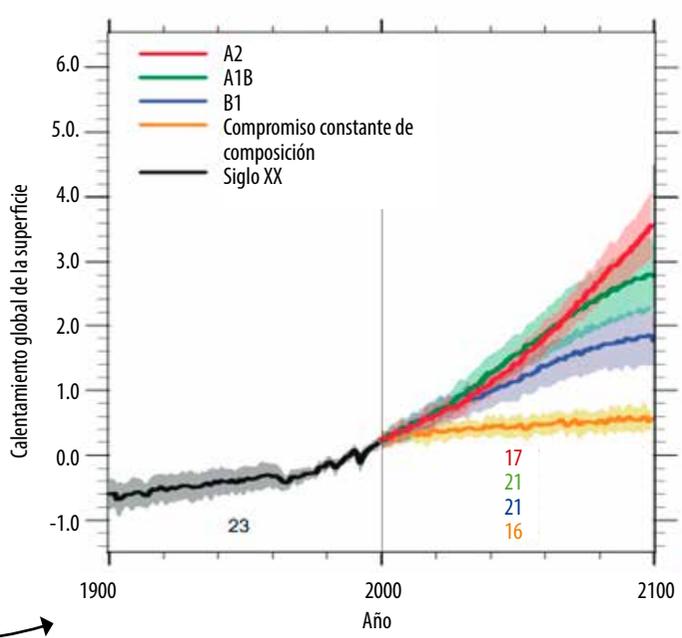
20+ GCMs
CMIP3/IPCC AR4

siempre suelen regirse por el escenario más negativo.

Al utilizar la información disponible en los modelos de circulación general se generan pronósticos y escenarios probables, pudiendo observarse una posible elevación

de la temperatura promedio del planeta, ya que en un contexto en el que se continúan vertiendo altos niveles de contaminantes, se llegará a los 4 o 5 grados de aumento de temperatura durante el siglo XXI (ver Figura 1).

e incertidumbres

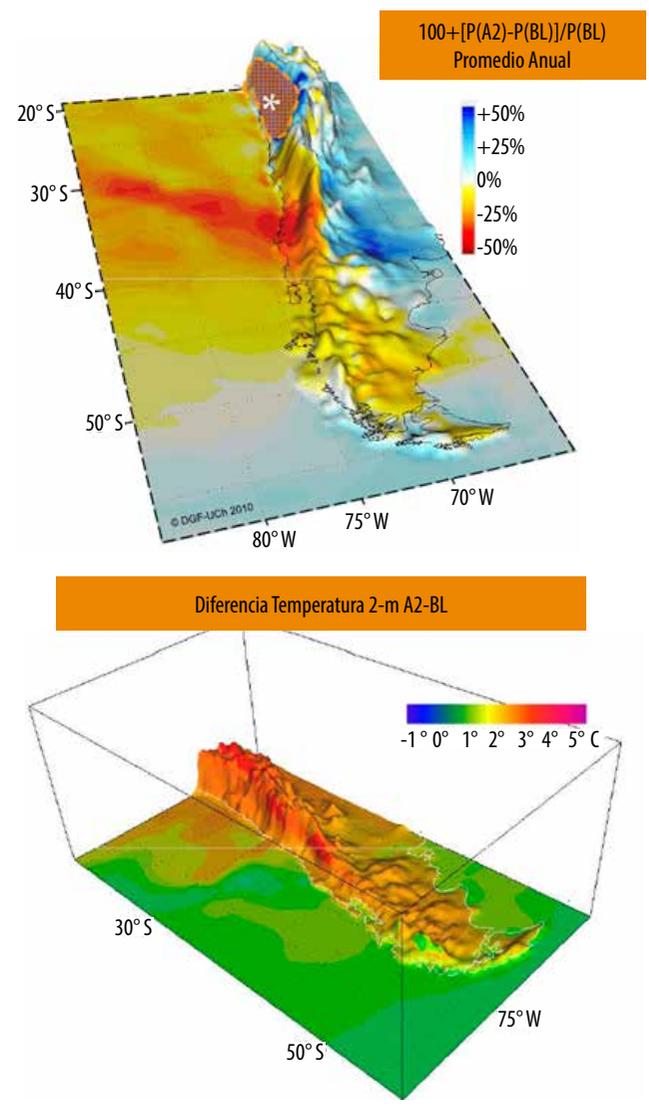


Y si los criterios se apegan al Protocolo del Acuerdo de París, el modelo establece un escenario en el que solo se llegaría a un 1 grado o a 1,5 grado más respecto de la temperatura actual.

Impactos regionales del cambio climático

Para la conformación de escenarios, lo que usualmente se realiza es la observación de la situación regional. En la *Figura 2*, basada en un estudio de 2007, se proyecta

Figura 2: Impactos regionales del cambio climático: Aumento de temperatura 1-2°C, disminución de precipitación 15-25% y proyección a fin de siglo bajo escenario A2.



Fuente: (Estudio DGF/UCh-CONAMA 2007 empleando PRECIS).

para Chile una disminución de la precipitación y temperatura, esperándose un país más seco, con una proyección de fin de siglo que se muestra (en color rojo) la disminución del orden del 30% de precipitaciones entre las regiones de O'higgins y de la Araucanía.

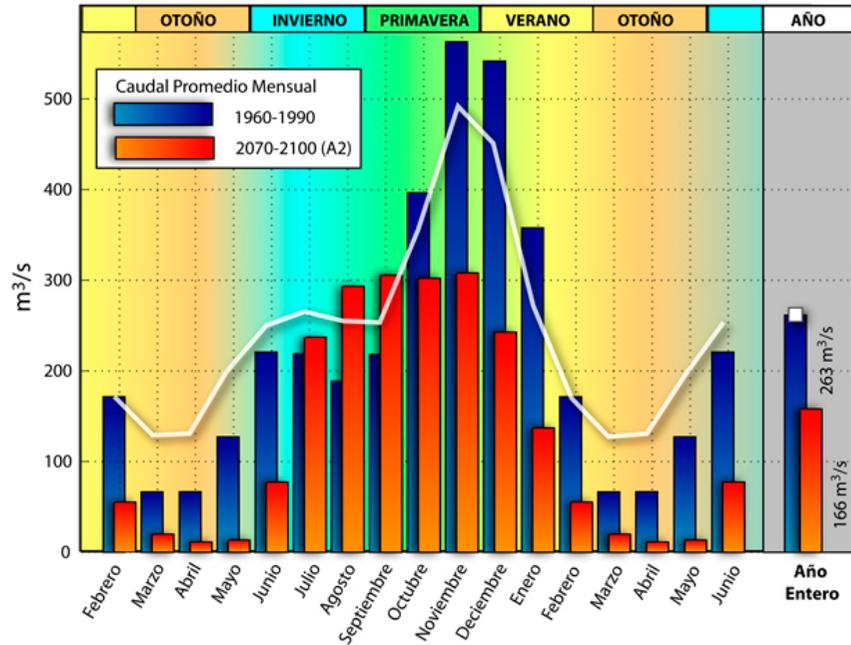
No obstante, esa imagen proyectada es apenas un escenario de lo que puede ocurrir en caso de que la emisión de contaminantes y gases con efecto invernadero se mantenga.

Hidrología superficial en el futuro

El modelo acoplado clima – superficie permite calibrar adecuadamente de acuerdo a los niveles de lluvia y calor y determinar el volumen anual (ver *Figura 3*). Sin embargo, al realizar una proyección de eventos extremos, dada la combinación de factores, resulta aun más incierto determinar las condiciones medias y cuantificar el cambio a futuro.

Un gran aluvión, por ejemplo, suele explicarse como una consecuencia del cambio climático, sin embargo, no existe evidencia de ello ni tampoco es posible aseverar qué va a

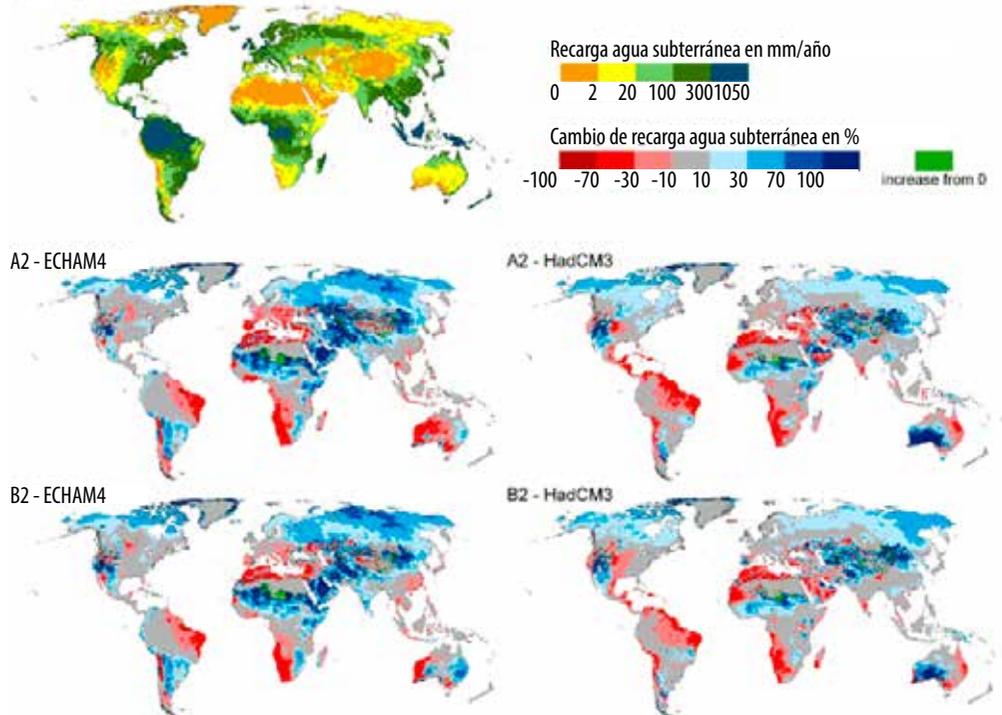
Figura 3: Modelo acoplado Clima-Superficie (e.g., VIC). Caudal simulado de río Maule - Presente y futuro (A2).



Fuente: Vicuña et al. 2010; 2011.

Figura 4: Hidrología subterránea en el futuro.

GWR 1961 - 1990



ocurrir con los eventos extremos y el cambio climático. Aun así, existe cierta tendencia a atribuir todo a este fenómeno.

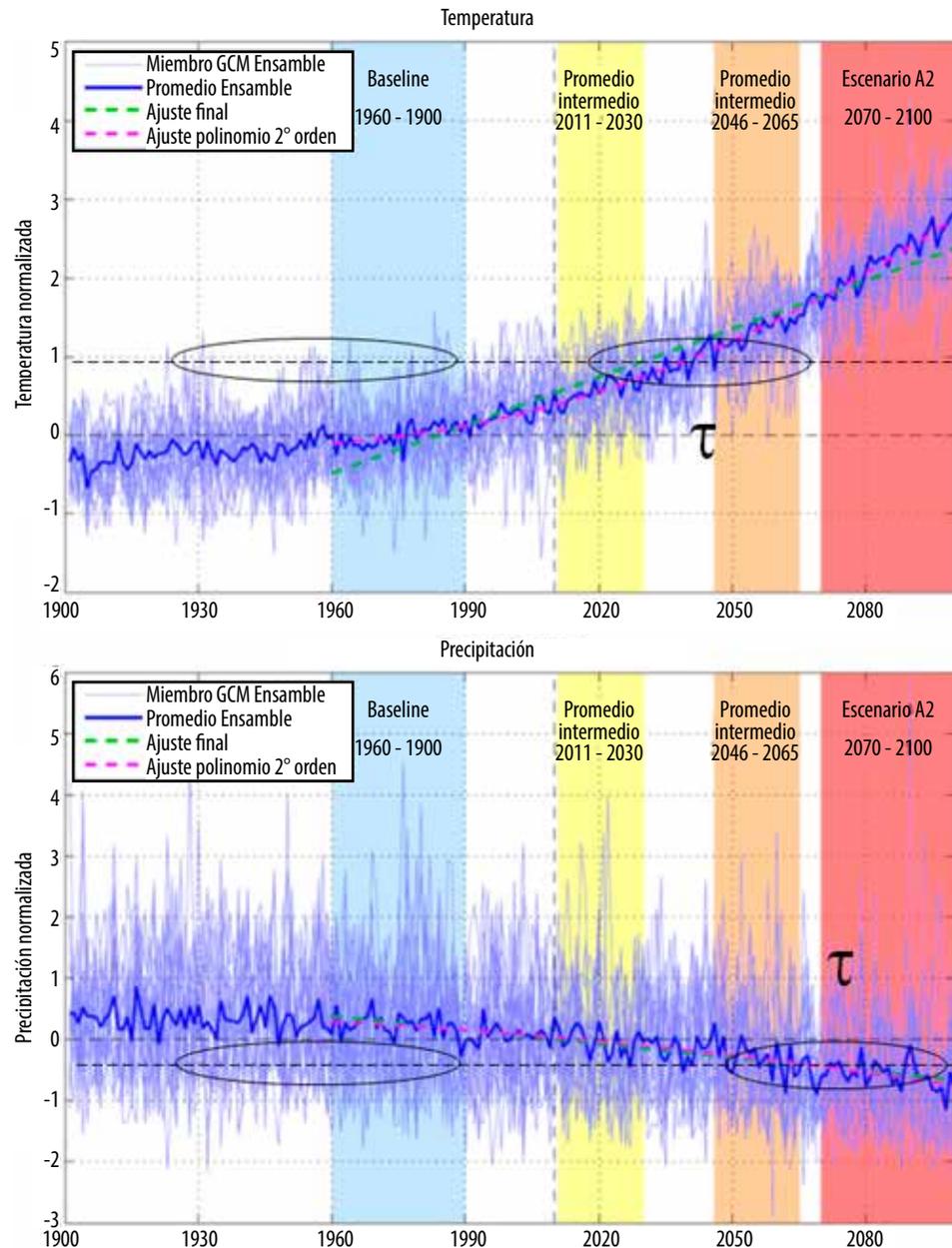
El hecho de que a futuro las tormentas se vuelvan más cálidas, de alguna manera alienta ese escenario, precisamente con una isoterma muy elevada de cero grado y con las respectivas consecuencias en las remociones en masa. No obstante, este tipo de hechos es algo que recién comienza a evidenciarse.

Hidrología subterránea en el futuro

Existen ciertos aspectos globales, como los que se muestran en los mapas de la *Figura 4* que dan cuenta del cambio de la recarga de aguas subterráneas, cuyos pronósticos se visualizan a través de los modelos de precipitación aplicados.

Nuevamente, todas estas predicciones se encuentran bajo la incertidumbre de cuál será el escenario climático. Para el caso de Chile, las simulaciones ciertamente muestran que las precipitaciones disminuirán, observándose mucha variabilidad (ver *Figura 5*).

Figura 5: Proyecciones de TAS y precipitación para Chile central en base a ensemble multi-modelo CMIP3 . Escenario A2. *Time of Emergence* (τ): Período en el cual la condición promedio se supera la condición extrema actual. Depende del lugar, variable y escenario climático.



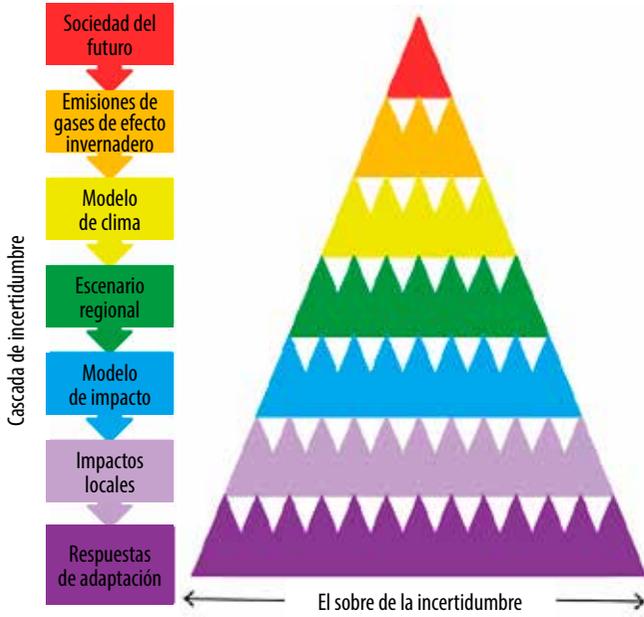
Adicional a la falta de predictibilidad de variabilidad natural, las proyecciones realizadas son inherentemente inciertas y la incertidumbre o "cascada de incertidumbre" (ver *Figura 6*) se inicia con la interrogante

de cómo será la sociedad futura, cuáles serán los protocolos que de aquí a 20 o 30 años se apliquen en términos de emisiones de gases de efecto invernadero y cuáles serán las respuestas de adaptación.

El clima cambiante

Tal como se observa en la *Figura 7*, en la zona central de Chile las temperaturas han aumentado y existe una clara tendencia y señal global de cambio climático. Pero no todas las zonas

Figura 6: Cascada de incertidumbre. Falta de predictibilidad de variabilidad natural y proyecciones inherentemente inciertas.



Fuente: Wilby and Dessai, 2010.

Figura 7: Variabilidad interanual/decadal + Saltos Climáticos + Tendencia

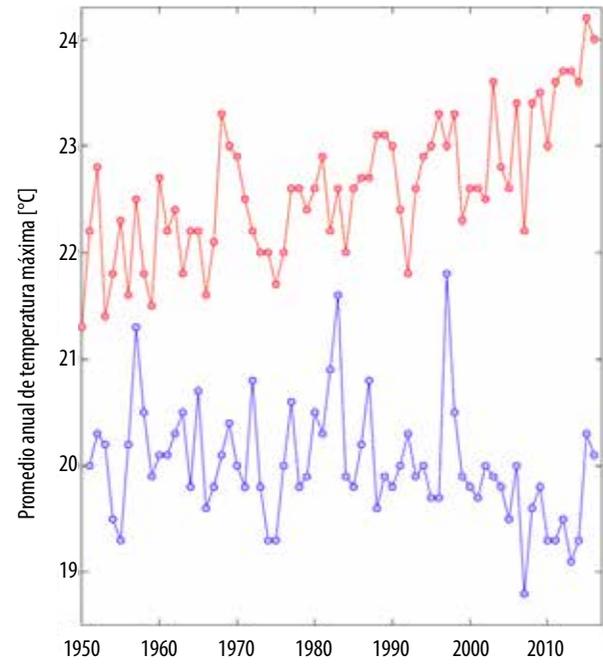
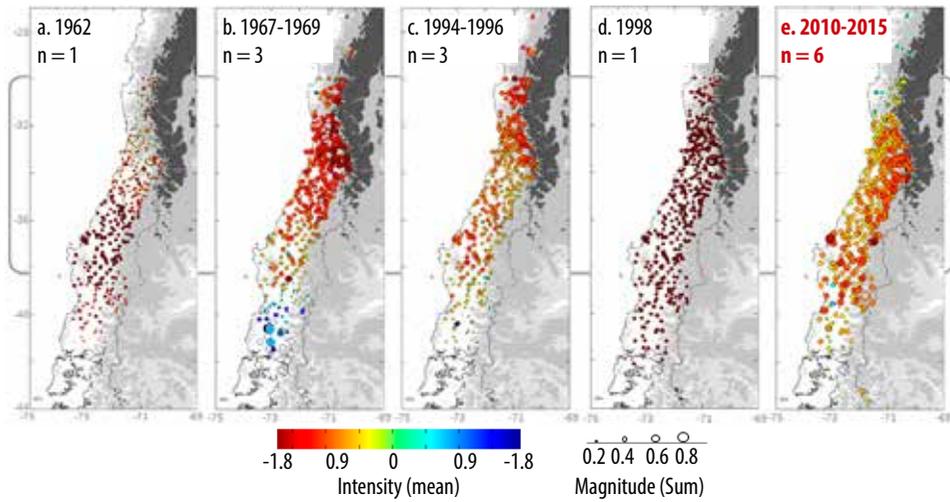


Figura 8: Grandes sequía contemporáneas: Índice estandarizado de precipitación (SPI-12, Dic).



Fuente: Garreaud et al. 2017.

Figura 9: La megasequía 2010 - 2015.

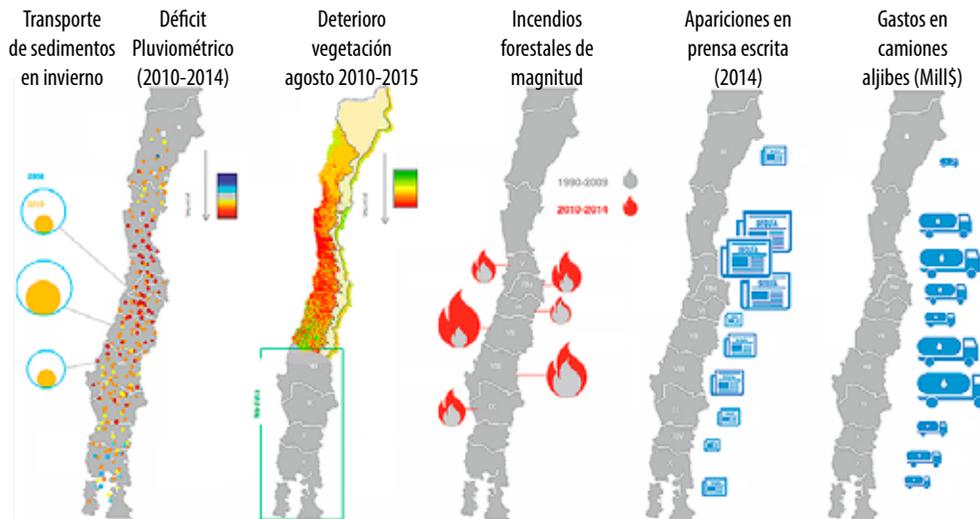
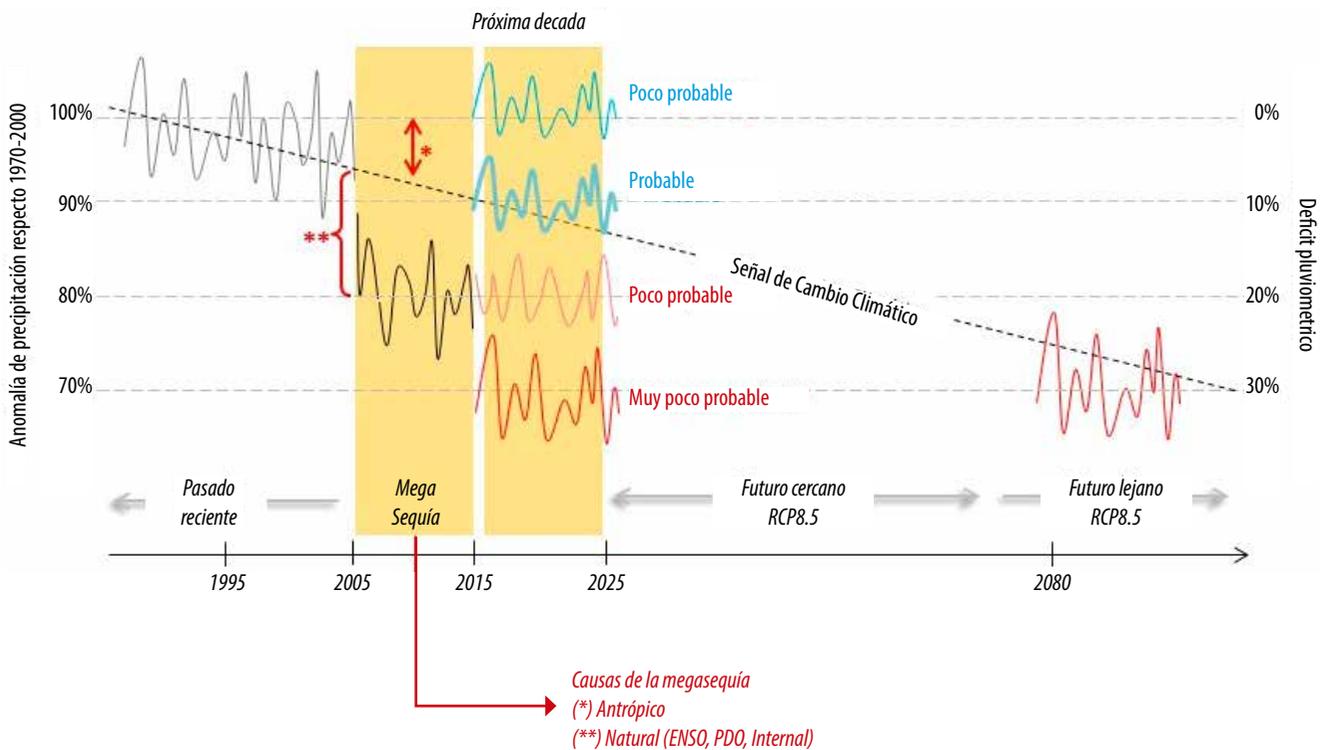


Figura 10: Precipitación en Chile central, el desafío para la próxima década.



del país sufren el mismo calentamiento y por ejemplo, en las zonas costeras (Antofagasta, La Serena, Iquique u otras ciudades) las temperaturas se han mantenido o incluso han disminuido levemente.

En lo que respecta a las precipitaciones, la *Figura 8* muestra series de tiempo desde la década de 1950 en adelante, evidenciándose una gran sequía en 1967, 1968 y 1969, cuyas circunferencias coloridas dan cuen-

ta de la intensidad. En 1998, en tanto, se observa otra período de sequía, y posteriormente, Santiago presenta años secos desde 2008, para luego, desde 2010 vivir una megasequía (ver *Figura 9*), lo que ha significado un déficit actual del orden del 30% al 35% para Santiago.

El desafío de la próxima década

Los modelos proyectan que manteniendo una trayectoria de altas emisiones

de CO₂, hacia fines del siglo disminuirán en un 30% los niveles de precipitación (ver *Figura 10*). Y este déficit, en aproximadamente un tercio correspondería a factores antropogénicos, mientras que los otros dos tercios corresponderían a factores naturales.

A nivel global y local, en las últimas décadas se han presentado manifestaciones del cambio climático asociadas a los gases de efecto invernadero (GI) con

cambios proyectados a futuro similares a los observados en las últimas décadas en magnitud y signos.

En el corto y mediano plazo (1-20 años) los factores naturales (Oscilación del Sur El Niño – ENSO y Oscilación Decadal del Pacífico – PDO) serán los principales factores de alteraciones climáticas. Por ello, dadas las incertidumbres en las proyecciones, será importante considerar las respectivas estrategias de adaptación.

Visión de la DGA:

Impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos



Carlos Estévez*

Ponencia realizada durante el Seminario 2017 "Cambio Climático y Aguas Subterráneas" de Alhsud Chile.

Carlos Estévez se desempeñó como Director General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas hasta principios de 2018, es abogado por la Universidad de Chile y cuenta con estudios de postgrado en sociología política por la Universidad Complutense de Madrid.

Chile es un país muy heterogéneo hídricamente. Cuenta con una diversidad latitudinal de 4 mil 200 kilómetros de largo (de norte a sur); con diversidad orográfica en un territorio promedio de 180 kilómetros, en los que se puede pasar de 0 metros sobre el nivel del mar (msnm) a 5.000 msnm y más; con diversidad en calidad de aguas, que varía entre la zona centro y sur respecto de la zona norte del país; con 101 cuencas, 491 sub cuencas con 1.251 ríos –más bien cortos y torrentosos–; y una escorrentía per cápita (53.000 m³/hab/año) que supera 8 veces la media mundial (6.600 m³/hab/año), pero que varía dramáticamente según cada territorio.

Desde la Región Metropolitana hacia el norte todas las regiones están bajo presión hídrica, abarcando a un 63% de la población del país.

Regulación requiere un nuevo balance

Chile cuenta con un marco regulatorio que requiere de un nuevo balance, ya que éste fue diseñado en un escenario de abundancia y enfocado en una lógica de desarrollo productivo sin un adecuado equilibrio con el derecho humano de acceso al agua potable y de preservación de ecosistemas.

Este marco regulatorio promueve una gestión "pública" del agua más centrada en lo jurídico (entrega de derechos) que en la investigación, planificación, concertación de actores y gobernanza del agua. Esto implica que, en general, no promueva una gestión eficiente, lo que conlleva a una gestión desbalanceada en favor del prorrateo de las aguas (cantidad) versus la calidad. Además, actúa en beneficio de las aguas superficiales frente a las aguas subterráneas.

Habitualmente, regula en favor de las organizaciones de regantes por sobre otros usuarios, sobreponiendo la gestión individual frente a la tutela pública, con una actuación experiencial con escasa planificación y con información disponible solo para unos pocos versus un conocimiento accesible y con base científica.

Institucionalidad fragmentada y conocimiento parcial

La institucionalidad de las aguas se encuentra fragmentada, lo que representa un problema generalizado en la mayoría de las naciones y que en Chile se agudiza con la existencia de más de 40 organismos relacionados con la gestión del agua, sumado a los múltiples gestores privados del agua, que no necesariamente se coordinan entre sí o con la administración del Estado, lo que a su vez impacta en la carencia de una Política Nacional

Recuadro 1: Conocimiento parcial de nuestros sectores hidrogeológicos.

- 423 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) estudiados (81% del total, estimado).
- 157 SHAC declarados áreas de restricción, y de ellos 106 con DAA Provisionales.
- 6 SHAC están declarados zonas de prohibición.

Regiones	XV	I	II	III	IV	RM	V	VI	VII	Total
Área de Restricción	1	4	5	7	30	27	55	26	2	157
Zona de Prohibición	1			4			1			6
Total	2	4	5	11	30	27	56	26	2	163

del Agua y en la posibilidad de contar con un interlocutor válido para la gestión integrada de recursos hídricos por cuenca.

El mercado de aguas nacional, en tanto, carece de una adecuada información y de una apropiada regulación.

A todo lo anterior se suma el hecho de que el conocimiento sobre los sectores

hidrogeológicos locales es parcial, habiéndose estudiado aproximadamente un 81% del total (423 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común – SHAC), de los cuales, 163 han sido declarados áreas de restricción (157 SHAC) y zonas de prohibición (6 SHAC), tal como lo expresa la tabla del *Recuadro 1*.

Disponibilidad en acuíferos estudiados

Por diversas razones, entre otras, debido a las áreas de restricción y zonas de prohibición, el territorio del país se encuentra afectado por limitaciones a la explotación del agua, lo que obliga a establecer una visión global a futuro.

Se registran avances importantes por distintas vías, algunos vinculadas al Código de Aguas y otros al Ministerio del Medio Ambiente. En general, existen distintos estudios sobre la disponibilidad de los acuíferos estudiados y todo indica, por regla general, que desde el Maule hacia el sur hay una interesante disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en estos acuíferos.

Pero, tal como lo demuestra la tabla del *Recuadro 2*, en el caso del Maule, un 16% de estos corresponderían a lo que hoy se denomina como derechos provisionales (en los sectores de Teno, Lontue y Belco Arenal) y un 84 % a derechos definitivos.

Impactos del cambio climático

El esquema de la *Figura 1* demuestra cuáles son los impactos esperados por efecto del cambio climático: un aumento en la frecuencia o intensidad de fenómenos meteorológicos extremos, cambios en la frecuencia o intensidad de las precipitaciones, una tendencia a un leve incremento del nivel del mar y derretimiento de glaciares. Y en general, también

Recuadro 2: Estimación de disponibilidad en acuíferos estudiados.**Disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en acuíferos estudiados (agosto 2017)**

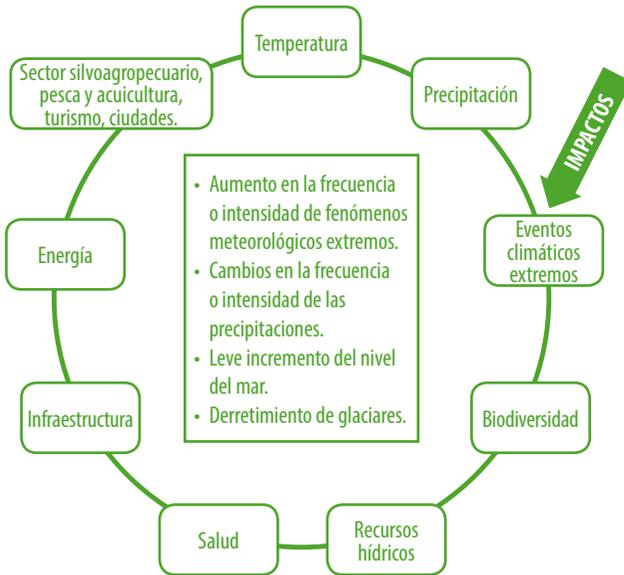
Región	Oferta Total (m3/año)	Demanda (m3/año)	Disponibilidad (*) (m3/año)	% por otorgar
XV	59.760.720	114.318.000	0	0
I	85.049.247	402.304.752	0	0
II	189.573.149	467.174.304	0	0
III	357.623.367	981.368.784	0	0
IV	528.049.333	1.110.729.456	0	0
V	1.570.015.528	3.089.708.064	0	0
RM	3.416.781.518	4.633.142.976	0	0
VI	2.032.121.245	2.047.721.956	0	0
VII	3.048.716.331	2.325.969.216	722.747.115	24
VIII	2.258.269.344	1.315.335.024	942.934.320	42
IX	2.676.091.811	685.214.208	1.990.877.603	74
XIV	1.843.465.636	592.246.080	1.251.219.556	68
X	3.085.499.264	972.412.560	2.113.086.704	68
Total	21.151.016.493	18.737.645.380	7.020.865.298	33

Disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en acuíferos estudiados (agosto 2017)

Región	Oferta Total (l/s)	Demanda (l/s)	Disponibilidad (*) (l/s)	% por otorgar
XV	1.895	3.625	0	0
I	2.697	12.757	0	0
II	6.011	14.814	0	0
III	11.340	31.119	0	0
IV	16.744	35.221	0	0
V	49.785	97.974	0	0
RM	108.345	146.916	0	0
VI	64.438	64.933	0	0
VII	96.674	73.756	22.918	24
VIII	71.609	41.709	29.900	42
IX	84.858	21.728	63.130	74
XIV	58.456	18.780	39.676	68
X	97.841	30.835	67.006	68
Total	670.694	594.167	222.630	33

Notas: (*)

- En la VII región, del total disponible, un 16 % corresponde a derechos provisionales (Teno-Lontue y Belco Arenal) y un 84 % a derechos definitivos.
- En VIII, IX, XIV y X regiones la disponibilidad existente corresponde a derechos definitivos.
- Los datos anteriores corresponden a un balance a nivel regional. Si se mira la realidad local de cada acuífero se puede afirmar que en algunos sectores de la III, IV, V y RM aun es posible otorgar derechos subterráneos en calidad de provisionales principalmente.

Figura 1: Impactos esperados por el cambio climático.

Fuente: Dirección General de Aguas (DGA).

están asociado un conjunto de impactos relacionados con la temperatura, precipitación, eventos climáticos extremos, biodiversidad, recursos hídricos, salud, infraestructura, energía e impactos en los sectores silvoagropecuario, de pesca, acuicultura, del turismo y en las ciudades.

En consecuencia, se espera que el consumo de agua a nivel nacional siga aumentando de manera sostenida en los próximos años, producto de las presiones demográficas y económicas que existen sobre la demanda de los recursos hídricos.

Y también, geográficamente se prevé que entre las regiones de Coquimbo y de Los Lagos se presente una disminución de los caudales disponibles (por efecto de la precipitación) y un cambio en la temporalidad de los caudales (por efecto tanto de la precipitación como de la temperatura).

Para el extremo austral del país, en tanto, si bien se pronostica un posible aumento

en los caudales disponibles y un cambio en la extensión de las masas de hielo, su sentido va a depender de los cambios relativos de radiación, temperatura, precipitación y de otras variables que influyen en la evolución de estos.

Proyecciones para los recursos hídricos

Se espera enfrentar una reducción significativa de caudales medios mensuales entre las regiones de Coquimbo y de Los Lagos; una elevación de la isoterma de 0°C, que provocará la disminución de reserva de agua en la cabecera de cuencas nivales y nivo-pluviales; un aumento del riesgo de inundaciones y aluviones; y un retroceso de glaciares significativo, que afectará los aportes de agua en los períodos secos.

En el extremo austral, en tanto, se proyecta un leve aumento de los caudales; mientras que en el Norte Grande y Norte Chico se espera una mayor recurrencia de períodos de escasez hídrica y de eventos de lluvias extremas.

En lo que respecta al sector silvoagropecuario, ciertas proyecciones estiman que existirá una menor disponibilidad de agua para riego en la zona central, lo que generaría el desplazamiento de los cultivos hacia la zona sur.

También se estiman cambios en la producción y en los ingresos netos, siendo negativos en las zonas norte y centro, y positivos en las zonas sur y austral. Se prevé una disminución en la calidad de los productos agrícolas y, entre las regiones de Valparaíso y del Biobío, una mayor vulnerabilidad para los agricultores de secano interior y costero.

Proyecciones para las aguas subterráneas

Por impacto del cambio climático se pronostica una tendencia hacia mayores variaciones precipitacionales y hacia un mayor estrés hídrico en el futuro. Persistirá el aumento de la demanda por fuentes subterráneas, así como los efectos crecientes sobre escorrentía superficial e infiltraciones.

También aumentará la evapotranspiración (calor), afectando a acuíferos someros y existirá una tendencia a un descenso generalizado del agua subterránea. Por úl-

timo, se estima una creciente pérdida en disponibilidad de recursos hídricos subterráneos, una modificación de su composición físico-química, alteración de la interrelación con los ecosistemas acuáticos y una reducción progresiva de la recarga natural de acuíferos (ver Recuadro 3).

Enfoques primigenios

En política pública siempre conviene diferenciar entre sumar nuevas acciones de modo acumulativo –a las que ordinariamente ya se realizan– o trabajar en función de un nuevo paradigma.

El país ya cuenta con la madurez necesaria para asumir la necesidad de un cambio profundo en materia hídrica. Y la Dirección General de Aguas (DGA) ha contribuido proponiendo modificaciones regulatorias mediante dos proyectos de ley, incorporando un enfoque de riesgo en la política de aguas, mejorando la gestión y transparencia, avanzando en la formulación de una Subsecretaría de Aguas, diseñando una propuesta de un Instituto Tecnológico del Agua y fomentando una gestión sostenible de las aguas subterráneas a través de una política explotación sustentable.

Recuadro 3: Recarga media anual (m³/s) para distintos períodos

Cuenca	Período		Variación (%)
	1960-1988	1986-2014	
Río Loa	2,7	2,0	-24
Río Aconcagua	20,0	18,9	-6
Río Bío-Bío	48,1	45,0	-6
Río Imperial	30,4	30,0	-1
Río Aysén	11,4	10,0	-12

DGA (2016) "Análisis Efecto en el Régimen Hídrico por Cambio en Patrones Meteorológicos", SIT N°400, Dirección General de Aguas (MOP), División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile. Realizado por Hídrica Consultores Spa

Algunos cambios regulatorios en curso

Reforzar el carácter público de las aguas, dar prioridad al derecho humano de acceso al agua potable y saneamiento, preservar el componente ecosistémico e introducir el principio de eficiencia, fortalecer el principio de tutela (policía, fiscalización y sanciones) son parte de algunos de los cambios regulatorios en propuestos.

En lo que respecta a la protección de la sustentabilidad del acuífero, se buscan otorgar nuevas atribuciones para actuar en acuíferos con afectaciones de sustentabilidad, mientras que en acuíferos categorizados como zonas de prohibición y áreas de restricción, se busca implementar un sistema obligatorio de control de extracciones,

imposibilitar la conversión de derechos provisionales en definitivos, condicionar la aprobación de cambio punto de captación en zonas de prohibición y áreas de restricción: riesgo de sustentabilidad, intrusión salina, afectación de derechos de terceros y por último, incentivar la recarga natural y artificial de acuíferos.

Desafíos en la gestión de aguas subterráneas

Es necesario construir una política de gestión de aguas subterráneas que vele por el interés público y que compatibilice las características físicas del recurso con su entorno y exigencias legales, es decir, en función de la explotación sustentable.

La gestión de las aguas subterráneas no debe ge-

nerar menoscabo a derechos de terceros y debe favorecer el aprovechamiento del agua subterránea realmente disponible.

Es necesario que se consideren explotaciones de aguas subterráneas condicionadas al cumplimiento de un "Plan de Alerta Temprana" y que también se evalúe discutir y re-definir los límites para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, en el marco de una explotación intensiva pero sustentable.

La gestión de las aguas subterráneas debe fomentar la toma de decisiones basadas en el conocimiento científico y técnico, puesto que estas disposiciones no pueden basarse en un análisis del comportamiento de los sistemas de acuíferos

frente a diferentes niveles de extracción previsible en el largo plazo.

Se debe propiciar la constitución y funcionamiento de organizaciones de usuarios de aguas subterráneas capaces de gestionar el recurso y posibilitar una plataforma de generación, acceso y difusión de información técnica de primer orden, con el fin de adoptar decisiones oportunas, eficientes y aplicables.

Finalmente, se deben gestionar redes de monitoreo capaces de controlar el comportamiento de los acuíferos frente a diferentes niveles de explotación. Y por último, promover el éxito de una "Asociación Estratégica Gobierno – Organizaciones de Usuarios de Agua – Academia y Centros de Investigación".



Ingeniería al servicio del cliente

Desarrollando proyectos innovadores en hidráulica y aguas subterráneas

- Manejo y Evacuación de Aguas Subterráneas
- Proyectos de Infiltración y Recarga
- Estudios y Modelación Hidrogeológica
- Proyectos Hidráulicos

- Asesorías sobre Derechos de Agua
- Inspección Técnica en Proyectos Hidráulicos
- Proyectos de Generación Hidroeléctrica

REGULACIÓN ACTUAL DE RECARGA ARTIFICIAL DE ACUÍFEROS

Artículo 66 inciso 2°

“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”.

Recarga artificial de acuíferos en la reforma:

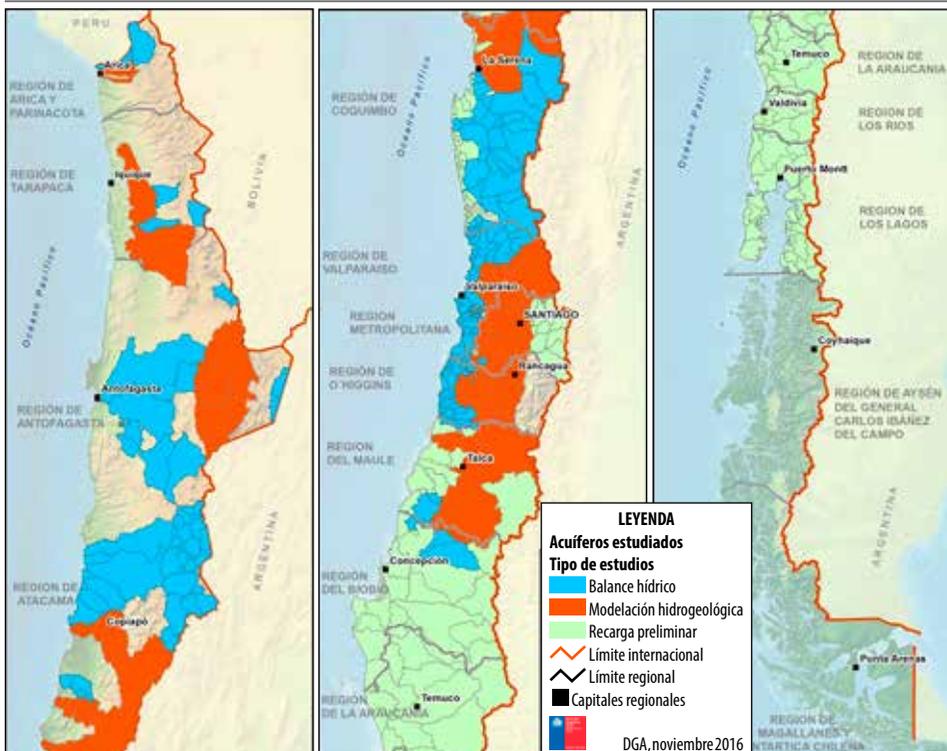
- La legislación vigente solo otorga una preferencia para solicitar un derecho de aprovechamiento provisional a aquel titular de derecho de aprovechamiento que desee extraer las aguas que ha recargado.
- Con la reforma, se modifica esta situación para que el titular del derecho de aprovechamiento no deba solicitar un nuevo derecho, sino que se define como un cambio de fuente y así continuar ejerciendo su mismo derecho.
- Además, se introducen normas de calidad de las aguas y se exceptúa de solicitar permisos a quienes infiltren aguas lluvias, las que se entenderán como una recarga “natural”.

Modificación del Código de Aguas - Recarga Artificial de Acuíferos:

- Sin perjuicio de otros permisos regulados en el Código de Aguas, previo informe favorable de la Dirección General de Aguas sobre la no afectación a extracciones de agua para consumo humano y aspectos relativos a la calidad de las aguas, cualquier persona podrá ejecutar obras para recargar artificialmente un acuífero.

Recuadro 5: Acuíferos estudiados en Chile (a), áreas de restricción y zonas de prohibición (b) y limitaciones a la explotación del agua en Chile: visión global (c).

(a)



(b)

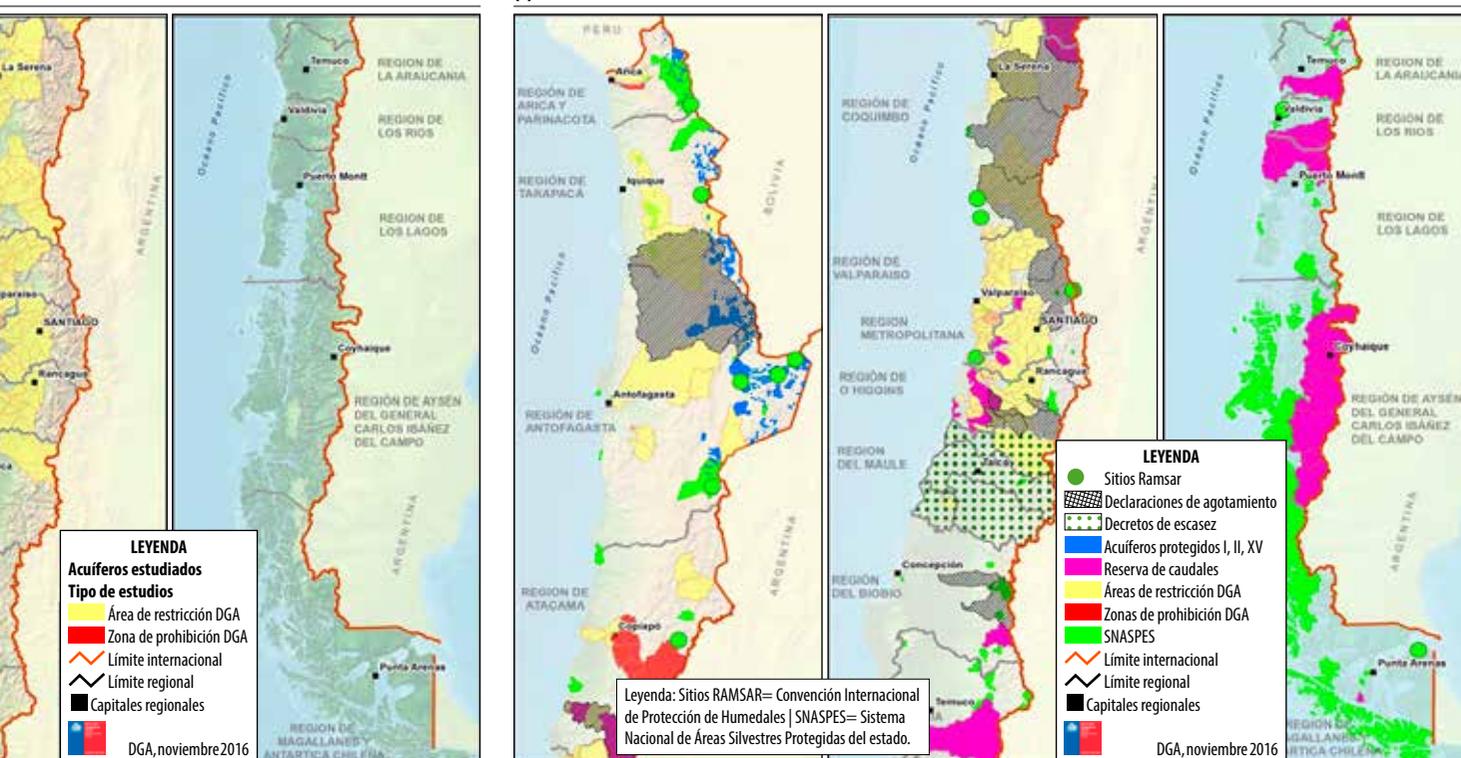


- Se entenderá por recarga natural el flujo o caudal de agua que alimenta un acuífero proveniente de aguas pluviales, corrientes, detenidas o subterráneas, que no sea a consecuencia de la intervención humana.
- No requerirá del informe a que se refiere el inciso primero la obra de recarga de aguas lluvias que, para estos efectos, se considerará recarga natural.
- La recarga artificial de aguas podrá realizarse para distintos fines, tales como resguardar la preservación ecosistémica, incluyendo la mejora o mantención de la sustentabilidad del acuífero; evitar la intrusión salina; aprovechar la capacidad depuradora del subsuelo; infiltrar agua desalinizada o residuos líquidos regulados por la normativa ambiental; o aprovechar la capacidad de almacenamiento y conducción de los acuíferos para posteriormente posibilitar la reutilización de estas aguas.
- El titular de un derecho de aprovechamiento que haya efectuado las obras a que se refiere el inciso primero y que desee reutilizar las aguas infiltradas, sea en el mismo u otro punto del acuífero, podrá solicitar a la Dirección General de Aguas que le autorice a ejercer su derecho sobre la mayor parte de las aguas recargadas que, de acuerdo al análisis técnico de los antecedentes presentados, considere las pérdidas propias del proceso, la sustentabilidad del acuífero y los derechos de terceros.

Artículo 66 bis.-

La solicitud a la que se refiere el inciso anterior contendrá las especificaciones técnicas de la obra; la información sobre el sector hidrogeológico del acuífero, que permita justificar la cantidad de agua que se pretende extraer; los puntos de recarga y aquellos desde los cuales se pretende extraer las aguas; y un sistema de medición y de transmisión de la información en ambos puntos, la que se tramitará de conformidad a lo dispuesto en el Título I del Libro Segundo de este Código”.

(c)



Dirección de Obras Hidráulicas: Profundizar el conocimiento del cambio climático en el rec



Reinaldo Fuentealba*

Ponencia realizada durante el Seminario 2017 "Cambio Climático y Aguas Subterráneas" de Alhsud Chile.

Reinaldo Fuentealba se desempeñó como Director de Obras Hidráulicas (DOH) hasta principios de 2018, es ingeniero civil Sanitario - Hidráulico por la Universidad de Chile y cuenta con más de 25 años de experiencia en gestión, elaboración y desarrollo de proyectos de obras sanitarias. Durante 12 años lideró el Programa de Agua Potable Rural (APR) a nivel nacional y participó en la implementación del Programa de APR al interior de Ministerio de Obras Públicas.

El Índice de Riesgo Climático Global instala a Chile dentro de los diez países más afectados por eventos meteorológicos asociados al cambio climático, amenazando el futuro con efectos como un clima más seco, elevación de la temperatura, disminución de la disponibilidad de agua y mayor variabilidad de las precipitaciones.

Sumado a lo anterior, la disminución de la nieve en la cordillera y el aumento del nivel de la isoterma cero generarán sequías recurrentes, como también fenómenos aluvionales producto del incremento de los caudales.

Los efectos del cambio climático en Chile se manifiestan en diversos desastres climáticos, como vientos fuertes, incendios que se propagan con facilidad (caso Santa Olga), inundaciones, lluvias torrenciales (Atacama), aumento de los deshielos y del nivel del mar, marejadas y sequías, entre otros eventos.

Visión de la DOH

La Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) ha establecido un diálogo con diversos actores frente a los fenómenos ambientales que ha provocado el cambio climático. Esto, con el objetivo construir, en conjunto con el sector privado, un horizonte común en materia de sustentabilidad y cambio climático para las próximas décadas, sobre la base de un diálogo social, político y técnico, que incorpore realidades y visiones de los diversos actores de la sociedad.

Para la toma de decisiones se requiere generar información sobre la ocurrencia, magnitud y los impactos de los eventos hidrometeorológicos extremos ocurridos en el territorio. Así también, información georreferenciada de áreas de inundación, desbordes y aluviones provocados a partir de precipitación extrema.

Recursos hídricos subterráneos

A partir de 2000, la DOH inició el estudio del uso

combinado de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, tomando como experiencia piloto la cuenca del río Aconcagua, construyendo baterías de pozos y solicitando los derechos de aprovechamiento subterráneos en Las Vegas (comuna de Llay Llay), con 14 pozos; Escorial (comuna de Panquehue), con 18 pozos; y Curimón, con 23 pozos (ver *Figura 1*).

Para los períodos de sequía, la DOH habilitó y puso en funcionamiento pozos con un promedio de 100 metros de profundidad para la extracción intensiva del acuífero. De esta forma, mediante la extracción de aguas subterráneas desde los pozos habilitados por la DOH, durante los últimos 6 años se hizo frente al déficit en la cuenca del río Aconcagua, lo que ha permitido asegurar el abastecimiento para el consumo humano y el riego. De hecho, entre 2013 y 2015, solo para el riego se extrajeron cerca de 30 hm³ de esta batería de pozos

sobre implicancias curso hídrico

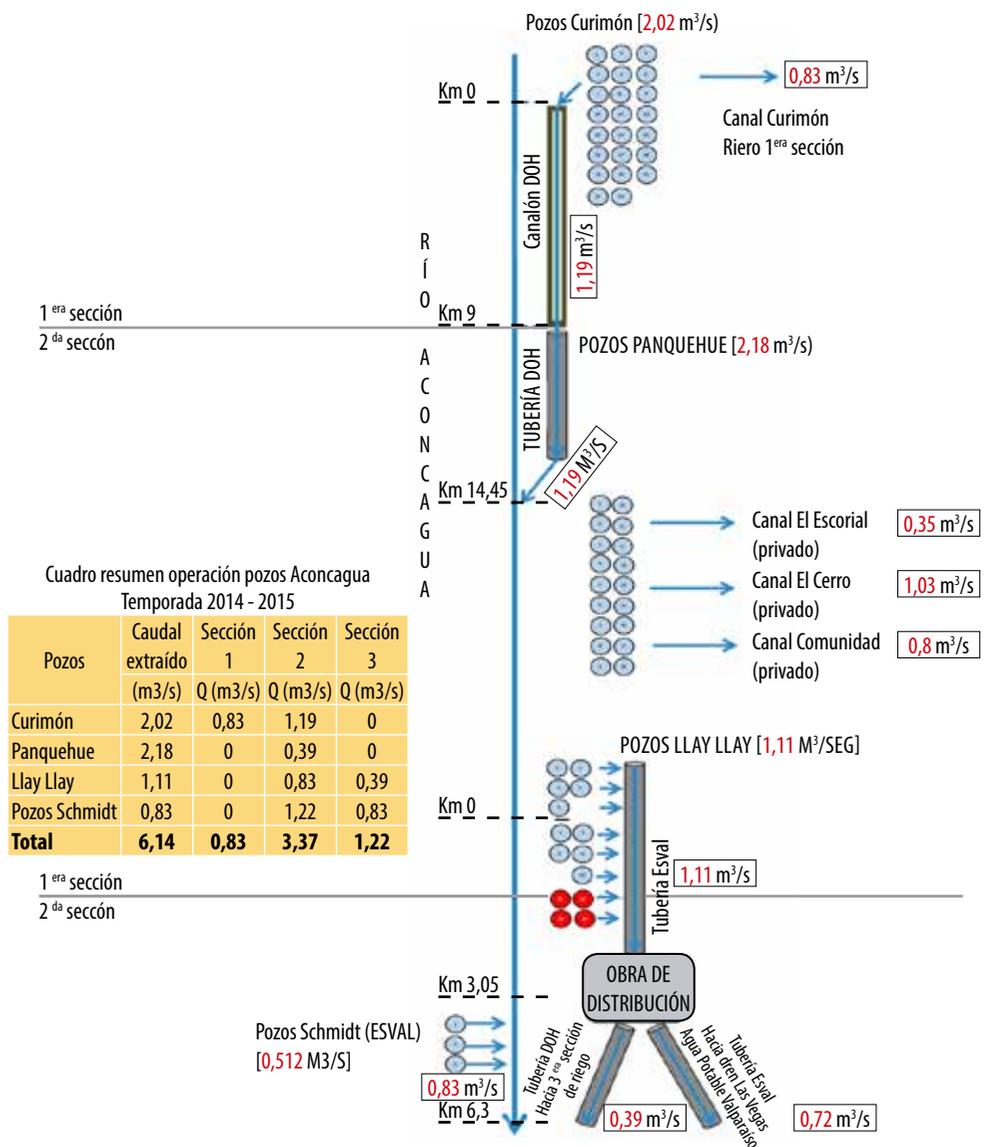
La operación de pozos requiere de un sistema de monitoreo que permita explotarlo respetando los derechos de terceros, procedimiento que considera telemetría y control, estaciones de monitoreo y sistemas de información geográfica.

Acciones a mediano plazo

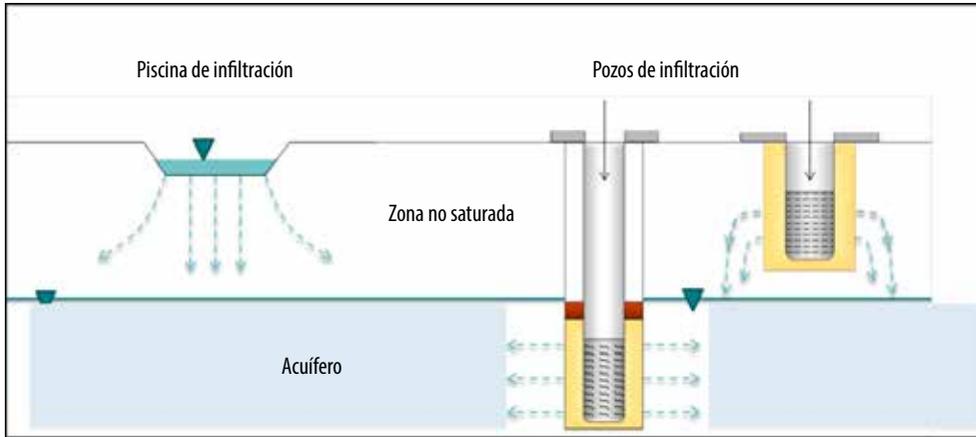
Con el objetivo de evaluar medidas que permitan asegurar el rol social y productivo del agua de forma temprana, a futuro se requiere profundizar el conocimiento mediante estudios sobre las implicancias del cambio climático en el recurso hídrico, a nivel nacional y a nivel de cuencas.

A su vez, es necesario incentivar la infiltración de napas, de modo que se puedan generar embalses naturales en los acuíferos y también desarrollar estudios de reserva de aguas para asegurar el abastecimiento de los sistemas de agua potable rural en las zonas que

Figura 1: Esquema de distribución proyecto pozos Aconcagua (fecha de actualización: 18/08/2015)



Fuente: Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

Figura 2: Recarga artificial de acuíferos.

han sido afectadas por la escasez hídrica. Y eventualmente, impulsar la reserva de agua en las desembocaduras de los ríos y estudiar proyectos de desalinización para el desarrollo de sistemas de cuencas.

Recarga artificial de acuíferos

En la línea de la explotación de los recursos hídricos subterráneos se trabaja sobre la base de principios básicos que permitan utilizar la capacidad de los acuíferos para almacenar el agua superficial excedente durante los períodos de excedencia y así poder aprovecharla en los períodos de escasez.

El plan piloto desarrollado por la DOH (ver Figura 2) consideró la ingeniería, construcción y monitoreo

RECUADRO 1: Recursos subterráneos en APR.

Se han destinado importantes recursos para atender situaciones de emergencia, especialmente entre Coquimbo y Los Lagos, que han requerido intervención durante los últimos tres años, beneficiando a más de 100 mil habitantes.

Región	Monto total (M\$)	Nº iniciativas	Beneficiarios
Coquimbo	5.328.950	83	50.702
Valparaíso	1.815.482	35	25.424
Metropolitana	91.468	4	5.468
Maule	871.285	3	4.088
Biobío	494.738	11	6.495
La Araucanía	479.388	9	8.349
Los Ríos	375.601	6	1.924
Los Lagos	41.654	2	3.184
Total	9.498.566	153	105.634

de dos piscinas de infiltración, con resultados exitosos, pues su operación permitió infiltrar un volumen de 191 mil metros cúbicos en el acuífero, con efectos percibidos con un aumento de nivel del agua subterránea (+6,7 m).

Recursos subterráneos en APR

Desde 2008, los efectos de la sequía se han manifestado recurrentemente, afectando el abastecimiento del consumo humano y generando situaciones de emergencia. Las soluciones adoptadas para disminuir estos efectos en los sistemas de APR han sido las siguientes: profundización de fuentes de agua (pozos), construcción de nuevas fuentes de agua (pozos), conexiones a otros sistemas de APR (mediante impulsiones y aducciones) y conexiones a matrices urbanas de agua potable (también con el mecanismo de impulsión y aducción). En otros casos, se suministra agua por medio de camiones aljibes a la comunidad afectada hasta que se terminan las obras de emergencia.

Previo a la realización de los proyectos de emergencia por sequía, se debe determinar lo siguiente:

OFRECIENDO SOLUCIONES INTEGRALES Y SOSTENIBLES

- Si la ubicación de las nuevas fuentes de agua tendrá suficiente caudal para abastecer de agua potable a la comunidad de forma segura.
- Establecer los puntos donde se deben perforar y construir nuevas fuentes de agua a través de la contratación de estudios hidrogeológicos o hidrológicos (en el caso de fuentes superficiales).
- Definir la disponibilidad de los derechos de aprovechamiento de agua en forma permanente o permisos temporales de uso mediante decretos de escasez hídrica, emitidos por la Dirección General de Aguas.

Gestión de los recursos hídricos

Otra forma de optimización del recurso hídrico implementada por la DOH ha sido el desarrollo de modelos de gestión de cuencas para el uso combinado de las demandas de los recursos en escenarios de escasez, con los siguientes ejemplos:

- *Laguna del Maule*: Se buscaron abordar antiguos problemas de gestión y ofrecer soluciones; combinar la demanda de riego y generación en forma eficiente; hacer más

efectiva la regulación entre embalses; destacar la importancia del ahorro y cuidado del agua; y establecer acuerdos con todos los usuarios.

- *Laguna del Laja*: De gran relevancia por convivir con múltiples intereses que dependen de él: sobre 120.000 hectáreas de riego, más de 1.150 MW de potencia instalada (distintos puntos y dueños), inversión del Estado en nuevo riego (proyecto Laja Diguillín), turismo (principalmente en Salto del Laja) y uso combinado de 3 fuentes (río Diguillín, río Laja y lago Laja).

Conclusiones

La situación de escasez hídrica como probable consecuencia del cambio climático requiere de nuevas inversiones en obras y de un manejo más eficiente de cuencas importantes, como Limarí, Petorca, Aconcagua, lagunas del Laja y del Maule.

La infiltración en los acuíferos representa también una alternativa para mejorar la disponibilidad de recursos. Asimismo, el estudio y explotación de las aguas subterráneas se plantea como una gran respuesta a los períodos de escasez. 🌍



Diseño integral y sostenible del borde costero de Nueva York

Con más de 125 años en el mercado, Arcadis es reconocido mundialmente como **líder en Diseño y Consultoría** en proyectos. Aplicando nuestro profundo conocimiento del mercado y nuestros servicios integrados de diseño, consultoría, ingeniería, y gestión de proyectos, trabajamos con nuestros clientes para crear resultados sostenibles a lo largo del ciclo de vida de sus proyectos.

Presente con más de 300 oficinas en 70 países. **En Chile más de 3.000 proyectos y estudios realizados en más de 35 años.**

#3 Sector de Aguas

#5 Empresa Internacional de Diseño

*Ránking ENR

CNR: Análisis en gestión de recursos hídricos y mejoramiento de uso y regulación



Jaime Yáñez Acevedo *

Ponencia realizada durante el Seminario 2017 "Cambio Climático y Aguas Subterráneas" de Alhsud Chile.

Jaime Yáñez, en nombre de la Comisión Nacional de Riego (CNR), expuso en 2017 en su calidad de jefe de la división de Estudios, Desarrollo y Político. Yáñez es ingeniero civil por la Pontificia Universidad Católica de Chile, con estudios de magister en Gestión y Políticas Públicas por la Universidad de Chile.

El cambio climático es un fenómeno que ha traído consigo efectos como la sequía prolongada, eventos extremos, aluviones y problemas de calidad de agua (ver Figura 1).

Chile y el cambio climático

La información generada en Chile a partir de estudios desarrollados en los últimos años indica que el sector silvoagropecuario es particularmente vulnerable al cambio climático, provocando desplazamientos geográficos de los cultivos y alteración de rendimientos, entre otros efectos.

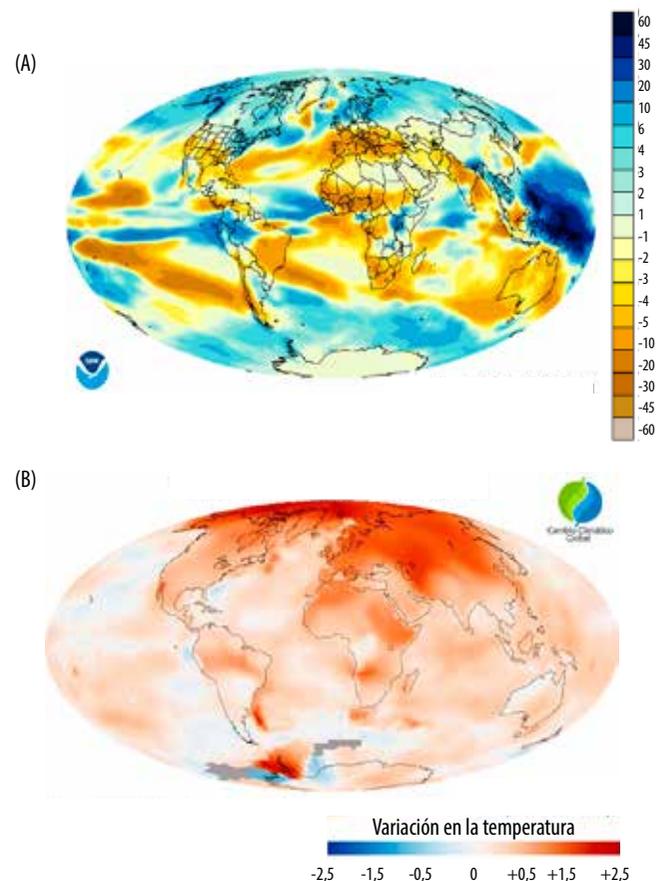
En materia de cambio climático, el Estado ha implementado un Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, el cual se divide en los siguientes puntos:

- Planes de adaptación para la agricultura, salud, acuicultura, con trabajo enfocado en los sectores de infraestructura, energía y ciudades.
- Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático, una nueva institución.

- Planes de adaptación consistenciales, en los que la Comisión Nacional de Riego (CNR) trabaja a través del Plan de Adaptación para la Agricultura.

En lo que respecta al Plan de Adaptación Sector Silvoagropecuario se han implementado 21 medidas de responsabilidad del Ministerio de Agricultura, cuyas dos

Figura 1: (A) Cambio en precipitaciones para fines del siglo XXI (pulgadas de líquido por año) y (B) variación de la temperatura promedio (mapa muestra la diferencia entre el promedio de temperaturas entre 2000 y 2009, comparado con el promedio de 1951-1980).



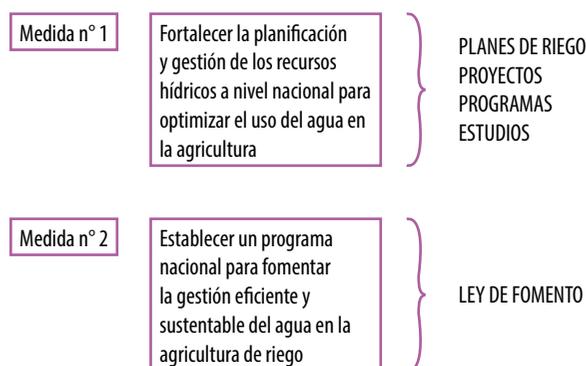
Fuentes: NOAA/GFDL CM 2.1 | <http://earthobservatory.nasa.gov>

Recursos hídricos y regulación

primeras acciones corresponden a un trabajo directo realizado por la CNR (ver *Figura 2*). La primera medida está centrada en fortalecer la planificación y gestión de los recursos hídricos a nivel nacional, buscando optimizar el uso del agua en la agricultura, con una gestión de riego en la que se ha concebido a la ciudadanía en términos participativos, definiendo cuál es la imagen objetivo de cada una de las cuencas, cuáles son las brechas existentes para lograr esa imagen objetivo (en un mediano y largo plazo) y desde allí iniciar la definición de iniciativas de inversión para subsanar esas brechas.

La segunda medida busca establecer un programa nacional para fomentar la gestión eficiente y sustentable del agua en la agricultura de riego, para lo cual, la CNR cuenta con la Ley de Fomento a la Inversión Privada en Obras Menores de Riego y Drenaje n° 18.450, que tiene por objetivo otorgar una bonificación al costo de construcción de proyectos de riego de los productores agrícolas que cumplan con el fin de

Figura 2: Plan de Adaptación sector silvoagropecuario. Medidas de responsabilidad del MINAGRI, en donde las medidas 1 y 2 son ejecutadas por la CNR.



incrementar la superficie regada del país, provocar un mejoramiento del abastecimiento de agua en aquellas áreas regadas en forma deficitaria, incentivar un uso más eficiente de la aplicación del agua e incorporar nuevos suelos.

Dentro de esta ley también existen líneas especiales para el uso de aguas subterráneas a través de la implementación o profundización de pozos o sistemas de energía renovable para el uso de estos.

Iniciativas de la CNR

En el contexto del cambio climático y de las aguas subterráneas, un primer

eje de trabajo de la CNR se encuentra asociado a la infraestructura, mientras que el segundo está vinculado a la gestión que debe realizarse en términos de recursos hídricos.

Ante ello, la CNR ha desarrollado tres iniciativas (en el norte, centro y sur de Chile) orientadas a la capacitación y transferencia tecnológica en adaptación al cambio climático a pequeños agricultores de comunas afectadas por emergencia agrícola por déficit hídrico.

En ese sentido, la CNR ha buscado entregar herramientas para incorporar en los agricultores conceptos como la gestión integra-

da de recursos hídricos. Y dentro de los objetivos específicos de esta iniciativa se ha buscado capacitar a pequeños productores agrícolas, miembros de OUAS y a agentes de extensión del INDAP en utilización y mantenimiento de equipos y sistemas de riego y manejo hídrico de los cultivos.

Para lo anterior, también se han implementando "días de campo" en predios demostrativos de agricultores líderes, se ha elaborado un manual de técnicas y manejo del riego en condiciones de cambio climático y se han desarrollado perfiles de proyectos de mejoramiento del riego para agricultores beneficiados.

Río Mostazal: mejoramiento del uso y regulación

El valle del río Mostazal posee 3.230 hectáreas de superficie agrícola potencial, de las cuales, actualmente se riega menos del 60% de dicha superficie mediante sistema de turnos. El problema corresponde a una baja seguridad de riego y a su significativo impacto en el

desarrollo de cultivos, lo que da cuenta de la necesidad de construir obras de acumulación y regulación que permitan mejorar la distribución y aprovechamiento de los recursos hídricos.

El estudio desarrollado por la CNR ha permitido evaluar las alternativas de mejoramiento del sistema de riego del río Mostazal, analizando las opciones de acumulación y regulación, sean estas superficiales o subterráneas, o una combinación de ambas.

En términos específicos, la CNR ha desarrollado la primera prefactibilidad de embalse de un sistema de regulación, la cual ha considerado a las aguas subterráneas como complemento al embalse superficial (ver ficha técnica del proyecto en *Figura 3*).

Análisis en gestión de recursos hídricos

En los ríos de Elqui y Ñuble, la Comisión Nacional de Riego ha implementado un programa de fortalecimiento de las juntas de vigilancia de ambos ríos, cuyo estudio ha tenido por objetivo analizar las funciones para la promoción de una gestión integrada del recurso hídrico de las juntas de vigilancia de ambos ríos.

Para ello, se ha propuesto un modelo o plan de manejo para cada junta de vigilancia, en la cual se han entregado las herramientas pertinentes para la gestión integrada de aguas superficiales y aguas subterráneas, considerando también aspectos como calidad de agua, caudales ecológicos y sustentabilidad.

La ficha técnica de este estudio, que tuvo un costo

de 150 millones de pesos, puede verse en detalle en la *Figura 4*.

Osorno y Llanquihue

La CNR viene realizando un análisis de los recursos hídricos subterráneos en las provincias de Osorno y Llanquihue (acuíferos preliminares: río Bueno, Rahue, Lago

Llanquihue y río Maullín, cuenca del río Bueno y cuencas e islas entre río Bueno y río Puelo) con el objetivo de mejorar la información de disponibilidad y calidad de los recursos hídricos subterráneos de ambas provincias, para dar un uso sustentable y un mejor aprovechamiento del recurso para la explo-

tación asociada a sistemas productivos.

Esta iniciativa va de la mano de otros programas que ha incorporado la CNR en las regiones de Los Ríos y de Los Lagos, vinculadas a energías renovables no convencionales, al otorgamiento de herramientas para la construcción de pozos, mini centrales cerca

Figura 3: Mejoramiento del uso y regulación de recursos hídricos en río Mostazal.



Ficha técnica del proyecto de inversión

Región	Coquimbo
Ubicación	Comuna de Montepatria
Beneficiarios	937
Fecha de inicio	4 de noviembre de 2016
Término estimado	nov-18
Monto Total	\$ 539.998.600
Código BIP	30125721-0.
Consultor	Arrau Ingeniería SpA

Figura 4: Análisis en gestión de los recursos hídricos de los ríos Elqui y Ñuble.



Ficha técnica del proyecto de inversión

Regiones	Coquimbo, Provincia de Elqui. Bío Bío, Provincia de Ñuble.
Ubicación	Cuenca del río Elqui y Cuenca del río Ñuble
Beneficiarios	Usuarios Juntas de Vigilancia del Río Elqui y del Río Ñuble
Fecha de inicio	5 de julio de 2016
Término estimado	jul-17
Monto Total	\$ 150.000.000
Código BIP	30407983
Consultor	CONIC BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda.

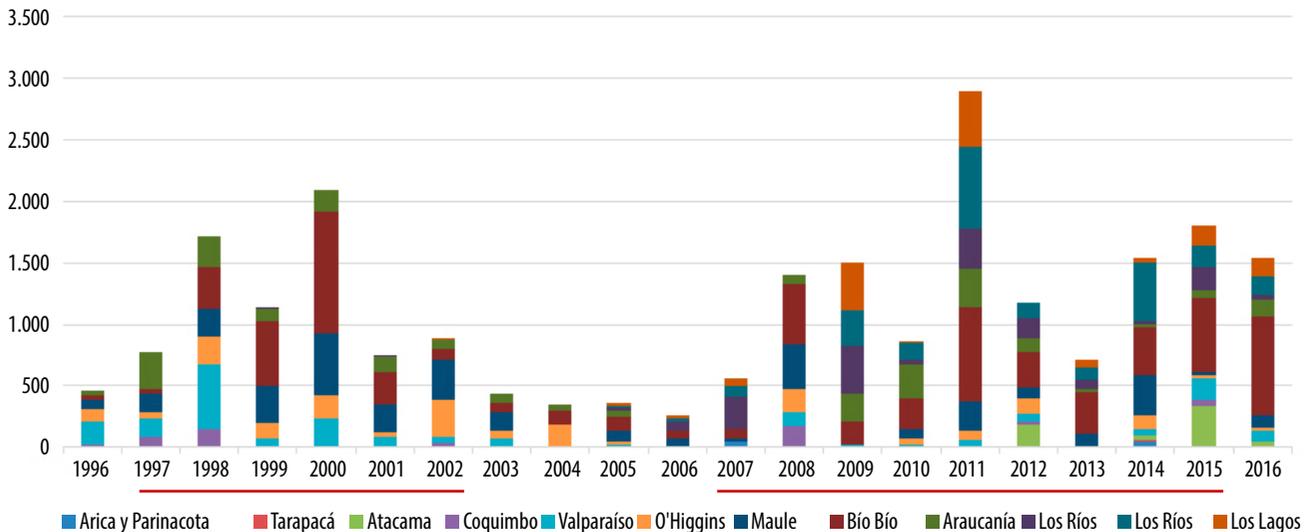
Figura 5: Análisis de recursos hídricos subterráneos en las provincias de Osorno y Llanquihue.



Ficha técnica del proyecto de inversión

Región	Los Lagos
Ubicación	Osorno, Llanquihue
Beneficiarios	Cuenca del río Bueno y cuencas e islas entre río Bueno y río Puelo
Fecha de inicio	--
Término estimado	---
Monto Total	---
Código BIP	30407983
Consultor	---
Consultor	CONIC BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda.

Figura 6: Evolución de los recursos de la Ley N° 18.450 en proyectos de pozos, destacando el aumento de recursos en periodos de escasez hídrica.



de los canales o ríos e incorporación de energías eólicas. Esto, con el objetivo de generar herramientas para que los agricultores tengan beneficios más allá de la eficiencia en el río (ver Figura 5).

Ley de Fomento al Riego

La Figura 6 muestra la evolución de los recursos que se han entregado específicamente para pozos bajo la Ley de Fomento a la Inversión Privada en Obras Menores de Riego y Drenaje (n° 18.450).

La línea roja de la Figura 6 muestra que en los años en los que se inician las sequías fuertes se inician las solicitudes de recursos. Luego, se observa una baja, y después de 1997 se genera una fuerte inversión en pozos para captar aguas subterráneas. Posteriormente, en 2007 se

presenta un nuevo incremento, el que actualmente viene decreciendo gracias a las inversiones que se han desarrollado.

Conclusiones

Los efectos del cambio climático actualmente reflejan una nueva realidad en el país, lo que transforma en necesaria la gestión integrada de recursos hídricos. Para ello, la información, datos y modelos sobre aguas subterráneas se vuelven indispensables para la realización de análisis prospectivos que permitan entender cuáles son los escenarios a futuro.

Finalmente, las políticas de riego se deben hacer cargo de las nuevas necesidades en el país, para lo cual, la coordinación entre instituciones es fundamental para el logro de resultados exitosos. ☺

QUINTA INGENIERIA

Soluciones eficientes de abastecimiento y monitoreo de recursos hídricos.

- Pozos profundos.
- Equipos de bombeo e impulsiones.
- Equipos de monitoreo y control.
- Operación y mantención .
- Gestión de Recursos Hídricos.
- Organismo de Inspección Ambiental (ETFA)

www.quintaempresas.com / Teléfono (+56) 226241351

Marco normativo de las aguas modificaciones propuestas en



Alberto Cardemil*

Ponencia realizada durante el Seminario 2017 "Cambio Climático y Aguas Subterráneas" de Alhsud Chile.

Alberto Cardemil es abogado por la Universidad Católica de Chile y master of European Law por la Universidad de Sídney (Australia). Cardemil es socio de Carey y uno de los miembros a cargo del grupo Recursos Naturales y Medio Ambiente.

Desde el inicio del tratamiento normativo de los recursos hídricos en Chile, las aguas subterráneas han sido un tema ausente y olvidado por el legislador. No obstante, en los sucesivos Códigos de Agua se ha ido incrementando la preocupación por ésta, aun cuando su regulación se ha caracterizado por ser escasa, vaga, dispersa y poco especializada.

Lo anterior ha implicado que una múltiple regulación sobre las aguas subterráneas ha sido tratada a nivel de normas administrativas internas y de alcance particular del servicio a cargo de administrar el sistema, que es la Dirección General de Aguas (DGA).

En gran medida, la institucionalidad ha enfocado su acción en otorgar

certezas y entregar respuestas a los temas que se presentan a través del tiempo. Sin embargo, las normas definidas, al tener un alcance particular y al estar destinadas a resolver problemas específicos, no han abordado elementos generales. Esto ha implicado que exista cierta arbitrariedad en su aplicación, pues cuando la norma o el criterio lo fija un órgano del Estado, ese mismo organismo tiene la facultad de modificarlo, suprimirlo y alterarlo, cuyo procedimiento puede resultar eventualmente arbitrario.

Por lo anterior, se ha ido incrementando la idea de que exista una dictación de normas de alcance general que permitan dar respuestas desde un enfoque amplio y que fijen criterios generales en torno a conceptos tan relevantes como el de la sustentabilidad.

La legislación de aguas

Tradicionalmente, los textos legales que han regulado a las aguas en Chile han sido estructurados en torno a las aguas superficiales, sin normar orgánica y sistemáticamente a las aguas subterráneas.

Los principales cuerpos normativos que regulan esta materia en Chile son los siguientes:

- Código de Aguas (1981).
- Modificaciones al Código de Aguas introducidas por la Ley N° 20.017(2005).
- Decreto Supremo N° 203 que aprueba el Reglamento sobre exploración y explotación de aguas subterráneas (2014).
- Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos (2008).
- Leyes sectoriales:
 - Código de Minería (1983).

s subterráneas y principales n proyecto de ley de reforma

Figura 1: Aspectos regulados relevantes en la legislación.

Conceptualización y disposiciones generales	Otorgamiento de DAA sobre aguas subterráneas	Protección y limitación a la explotación de aguas subterráneas
Administración colectiva de DAA sobre aguas subterráneas	Puntos alternativos de captación y/o restitución	Cambio de punto de captación y/o restitución
Cambio de fuente de abastecimiento	Recarga artificial de acuíferos	Sistemas de medición y otros

- Ley General de Servicios Sanitarios (1989).
- Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (1994).
- Ley sobre concesiones de energía geotérmica (2000).

Entre los aspectos regulados relevantes, el esquema de la *Figura 1* muestra los ejes sobre los cuales descansa la legislación sobre aguas subterráneas,

una suerte de mapa de su regulación.

Y como se observa, existen definiciones generales –en gran medida de índole técnica– que fijan las normas que rigen el otorgamiento de los derechos de aguas subterráneas, normativa que limita o establece ciertas restricciones para el ejercicio de esos derechos en función de intereses que pueden ser clasificados como generales.

Proyecto de ley

La reforma al Código de Aguas se enmarca dentro de un proyecto amplio que busca transformar toda la institucionalidad de las aguas y que, según el programa de gobierno del período 2014 – 2017, busca solucionar diversas problemáticas en miras de una correcta gestión de los recursos hídricos.

La tramitación del proyecto se ha caracterizado por ser larga, polémica y compleja (ver *Figura 2*), ya que por sus importantes alcances y disposiciones han confrontado los intereses de diversos agentes nacionales.

Reforma al Código de Aguas

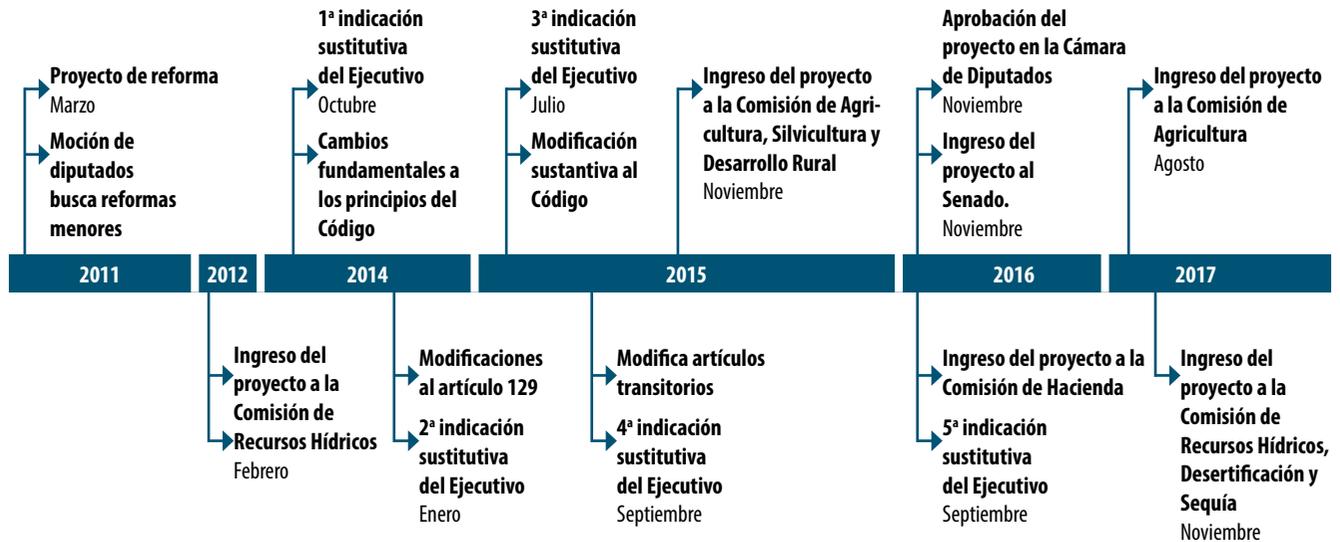
Las modificaciones generales introducidas relativas a aguas superficiales y subterráneas refieren a la redefinición del concepto de derechos de apro-

vechamiento de aguas (DAA), a la limitación en el ejercicio de DAA, a la temporalidad de los nuevos DAA que se constituyan, a la extinción por no uso, a la extensión de patentes por no uso, a las causales de caducidad, a las restricciones en el uso y a la afectación de DAA ya constituidos.

La redefinición del concepto de DAA mantiene su carácter de derecho real, pero con origen concesional o legal y, por definición, sujeto a restricciones y limitaciones en su ejercicio.

En general, se reafirma su libre transferibilidad, salvo las limitaciones y restricciones establecidas para casos especiales, fijando además el acceso al agua potable y saneamiento como derecho humano esencial e irrenunciable, lo cual debe ser garantizado por el Estado.

Figura 2: Larga y polémica tramitación del proyecto de ley que reforma el Código de Aguas.



Limitación en el ejercicio de DAA

La constitución y ejercicio de los DAA se supedita al interés público, entendiendo como tal *“las acciones que ejecute la autoridad para resguardar el consumo humano, saneamiento, preservación ecosistémica, disponibilidad de las aguas, sustentabilidad acuífera y en general, aquellas destinadas a promover un equilibrio entre eficiencia y equidad en los usos productivos de las aguas”*.

En contraposición a la legislación del Código de Aguas de 1981, se han establecido funciones del agua y fijación del listado de priorización para constitución y limitación al ejercicio de los DAA, según su finalidad, prevaleciendo la subsistencia y saneamiento.

Y en función de este interés público y de la priorización, existen una serie de medidas que la DGA puede adoptar, tales como:

- Reducción temporal del DAA.
- Redistribución temporal de las aguas para reducir los daños de sequía, escasez o función de subsistencia.
- Constitución de reservas de aguas superficiales o subterráneas.

Ejercicio de DAA es esencialmente temporal

La extensión máxima de los DAA de aguas es de 30 años para los derechos consuntivos y de 20 para los derechos no consuntivos, necesariamente prorrogables, a menos que se acredite no uso efectivo.

Este punto afectará especialmente a los derechos

de aguas subterráneas. Si bien la posibilidad de que se constituyan derechos de aprovechamientos superficiales extras en un futuro es relativamente baja, pues no existe disponibilidad de agua para ello, la realidad de las aguas subterráneas es diferente, ya que existe un enorme potencial para la constitución de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, particularmente desde la región del Maule al sur. Y todos esos eventuales derechos estarán afectados por esta extensión temporal.

Consistentemente con las limitaciones y restricciones, los DAA concedidos podrán ser revisados si existiere riesgo –o éste se haya materializado– de que su aprovechamiento pueda afectar al acuífero o fuente superficial desde donde se extrae, en

cuyo caso puede limitarse su uso o bien suspender su ejercicio mientras persista esa situación.

Extinción por no uso

Todos los derechos de aprovechamiento de aguas (DAA) se extinguirán total o parcialmente si su titular no construye las obras necesarias para su aprovechamiento en un plazo de 5 años (para el caso de los derechos consuntivos) y de 10 años (para los derechos no consuntivos) desde la publicación de la resolución que los incluya por primera vez en el listado de DAA afectos al pago de patentes por no uso.

Se regula, además, el procedimiento para la extinción y se fijan las causales de suspensión de los plazos de extinción, tales como fuerza mayor o la tramita-

ción de aprobación ambiental de obras necesarias para su aprovechamiento.

Patentes por no uso

En cuanto a las patentes, este aspecto también es relevante para las aguas subterráneas, pues se aumentan los factores de multiplicación para efectos de calcular el monto a pagar por concepto de patentes por no uso.

Y a nivel de Código de Aguas se especifica aún

más qué es lo que debe entenderse como obras de captación, eliminando los mínimos de los cuadales de los derechos asociados aplicables a la patente.

Causal de caducidad

La reforma fija como causal de caducidad la no inscripción de los DAA en el Conservador de Bienes Raíces en un plazo de 6 meses para los aún no constituidos y de 2 años para los DAA constituidos desde su otorgamiento

y entrada de vigencia de la ley, respectivamente.

Restricciones en el uso

Se reafirma la posibilidad de cambio de uso de un DAA, sujeto a obligación de informar a la DGA en los términos que ésta disponga, so pena de multa de hasta 400 UTM.

Y en caso de que se constate que dicho cambio importa un riesgo para el acuífero o la fuente superfi-

cial del derecho, puede limitarse su uso o suspender su ejercicio mientras persista dicha situación.

Además, se entiende como cambio de uso aquel que se realice entre distintas actividades productivas tales como la agropecuaria, la minería, la industria y la generación eléctrica, entre otras.

Afectación a DAA ya constituidos

Los DAA reconocidos o constituidos con anterioridad

Medición de presión.
Nuestro negocio.

KELLER
www.keller-druck.com



Tranductores de Presión OEM



Transmisores de Presión



Sondas de Nivel Data Loggers



Transmisión Remota de Datos



Manómetros Digitales

de la publicación de la ley que apruebe la reforma continuarán estando vigentes y mantendrán su carácter de indefinidos en el tiempo.

Sin perjuicio de lo anterior, los demás aspectos quedarán sujetos al Código de Aguas, incluyendo la posibilidad de extinción y caducidad.

Se establece, igualmente, un plazo de 5 años desde la entrada en vigencia de la ley para la regularización de DAA antiguos.

Modificaciones sobre aguas subterráneas

Existen ciertas modificaciones específicas sobre aguas subterráneas, como por ejemplo, las aguas del minero. Para este caso, se elimina el reconocimiento expreso por el solo ministerio de la ley, y las aguas halladas pueden ser utilizadas en la medida de que sean necesarias para las faenas y sean informadas a la DGA para su registro en un plazo de 90 días desde su hallazgo. El uso y goce de estas aguas podrá ser limitado, en caso de existir una grave afectación a los acuíferos o derechos de terceros.

Los titulares de pertenencias mineras y de concesiones mineras de exploración que a la fecha de entrada en vigencia de la ley estuvieren utilizando las aguas halladas en virtud de sus labores mineras, deberán informar-

“Desde el inicio del tratamiento normativo de los recursos hídricos en Chile, las aguas subterráneas han sido un tema ausente y olvidado por el legislador. No obstante, en los sucesivos Códigos de Agua se ha ido incrementando la preocupación por ésta, aun cuando su regulación se ha caracterizado por ser poco especializada.”

lo a la DGA en un plazo de 2 años desde la entrada en vigencia de la misma.

Protección y limitaciones

La prohibición para explorar y explotar aguas subterráneas en terrenos que públicos o privados de zonas que alimentan áreas de vegas y bofedales, sin la autorización fundada de la DGA –específicamente en las regiones de Tarapacá y Antofagasta– se extiende además a pajonales, y a las regiones de Arica y Parinacota, Atacama y Coquimbo.

Además, se prohíbe efectuar exploraciones y explotaciones en zonas que

correspondan a sectores acuíferos que alimenten humedales que hayan sido declaradas por el Ministerio del Medio Ambiente como ecosistemas amenazados, degradados o sitios prioritarios.

Igualmente, se agregan al Código de Aguas normas relativas a las áreas de protección de obras de captación de aguas subterráneas.

En cuanto a la reducción temporal del ejercicio de DAA, después de la reforma, la causal de declaración descansará en la degradación del acuífero o parte del mismo, al punto que afecte su sustentabilidad.

A lo anterior se suma que puede declararse de oficio

o a petición de parte. Se refiere a limitar su ejercicio y no a una reducción temporal del ejercicio del mismo y debe sujetarse a la priorización general de usos consagrada por el nuevo sistema.

Para las áreas de prohibición, la reforma enfatiza en la necesidad de que se constituya una comunidad formada por todos los usuarios de aguas subterráneas comprendidos en ella. Y en caso de no formarse, los usuarios no podrán solicitar cambios de punto de captación en dicha zona.

La reforma además limita la posibilidad de cambios de puntos de captación en áreas de prohibición y de restricción a los análisis sobre la situación hidrogeológica del acuífero en ese momento. Igualmente, consagra en el Código de Aguas la causal para su declaración.

Y finalmente, agrega la obligación de evaluar las zonas de restricción luego de 5 años de su declaración, con el objetivo de analizar si es necesario declararlas como zonas de prohibición.

Recarga artificial de acuíferos

Además de los permisos regulados en el Código de Aguas, la reforma exige un informe previo favorable (elaborado por la DGA) sobre la no afectación a extracciones de agua para

consumo humano y aspectos relativos a la calidad del agua para la posibilidad de recargar artificialmente un acuífero.

Establece también los fines para los cuales podrá realizarse la recarga artificial de aguas y se pronuncia sobre los requisitos de la solicitud y autorizaciones que deben cumplir los titulares de DAA que hayan recargado artificialmente un acuífero, para reutilizar las aguas infiltradas.

En cuanto a los sistemas de medición, se regula con mayor precisión la exigencia de instalación de sistemas de medición de caudales y control de volúmenes extraídos, haciéndola extensiva al control de niveles freáticos y un sistema de transmisión de la información que se obtenga a la DGA, en caso de DAA constituidos en zonas de prohibición o restricción, y la posibilidad que dicho organismo exija

aquello a cualquier titular de DAA.

Ante el incumplimiento de esta obligación, se podrán interponer multas entre 10 y 400 UTM.

Reflexiones finales

Es claro que el sistema normativo de los recursos hídricos en Chile es totalmente perfectible y que gracias al proyecto de reforma se instalaron una serie de temas relevantes y contingentes sobre los cuales discutir.

Y aun cuando la regulación debe ser estricta, no se pueden admitir incertezas en ella.

Se debe garantizar que la institucionalidad cuente con los recursos necesarios para ser eficiente y para poder actuar con transparencia y probidad.

Y finalmente, se debe avanzar en la técnica legislativa para que esta permita solucionar y atender todas las interrogantes que se presenten al respecto. ☺



COMPAÑÍA CHILENA DE PERFORACIONES LTDA. *agua subterránea*

Hidrogeología

Geofísica
Telemetría
Smart Wells®

Pozos Profundos

Entubamiento
Simultáneo
Dual Rotary (Barber)
6 Perforadoras

Hidráulica

Instalaciones
Llave en mano
Pruebas de Bombeo
Servicios de mantención
de pozos / 4 grúas

Reciclaje de Agua

Plantas modulares
de tratamiento
Filtros para pozos
de infiltración
Bio Storm®



37 años en el rubro
Más de 5.000 obras funcionando


smart-wells

www.pozosdeagua.com
2 2682 9600
info@pozosdeagua.com

Cambio climático y agua subterránea: Impactos y desafíos para el futuro



Linda Daniele*

Ponencia realizada durante el Seminario 2017 "Cambio Climático y Aguas Subterráneas" de Alhsud Chile.

*Linda Daniele es doctora en Hidrogeología por la Universidad de Almería (España) y master (DEA) en las aguas subterráneas y el medio ambiente por la misma casa de estudios. Es licenciada en Ciencias Geológicas y cuenta con el título de geóloga por la Università degli Studi di Napoli Federico I (Italia). Daniele es profesora asistente en el departamento de Geología de la Universidad de Chile, donde imparte los cursos de Hidrogeología, Sistemas de Información Geográfica (GIS), GIS Aplicados a los Recursos Hídricos y Geoquímica Ambiental.

El cambio climático es un fenómeno innegable. Se le quiera observar a corto o a largo plazo, los cambios climáticos en el planeta han ocurrido desde tiempos pretéritos. En la *Figura 1* se muestran datos a partir de evidencia pasada a través de la roca. Inicialmente, se observa que con la forma de vida del hombre y su desarrollo se han incrementado las transformaciones.

Agua: fundamento de vida y del desarrollo

El cambio climático, el desarrollo y la globalización representan elementos claves en los problemas presentes en los recursos hídricos. En general, el estilo de vida del ser humano no mantiene una adecuada convivencia ni adaptación al territorio, que no es otra cosa que la resiliencia o adaptación al medio. ¿Y cómo incide este comportamiento en las aguas subterráneas? La respuesta se encuentra en el ciclo del agua, pues todos los cambios afectan

a las aguas subterráneas, especialmente los procesos de recarga y calidad del agua.

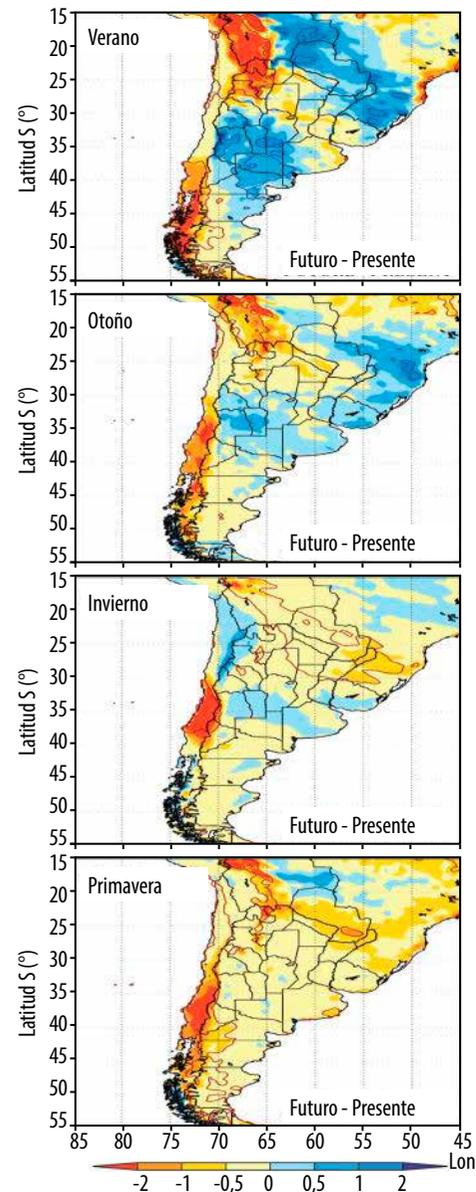
¿Y qué soluciones pueden existir frente al cambio climático? Un reporte elaborado por la Comisión Económica para América Latina y El Caribe (CEPAL) establece que el cambio climático acelerará la disminución de los glaciares en los Andes, afectará los patrones de precipitación y aumentará la variabilidad del clima y de los hidro-eventos extremos.

Así, los eventos climáticos que existen en la actualidad variarán en el futuro, por lo que la forma de enfrentarlos no solo podrá ser mirando hacia el presente, sino más bien adelantándose y mejorando las habilidades para prever lo que la naturaleza pueda cambiar.

Riesgos y problemas por cambio climático

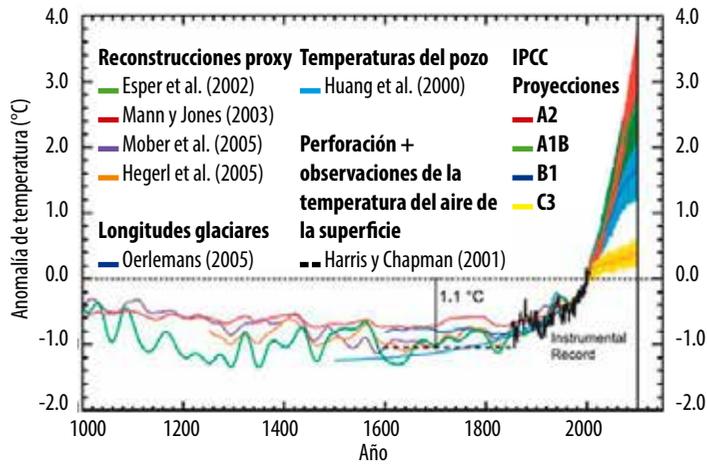
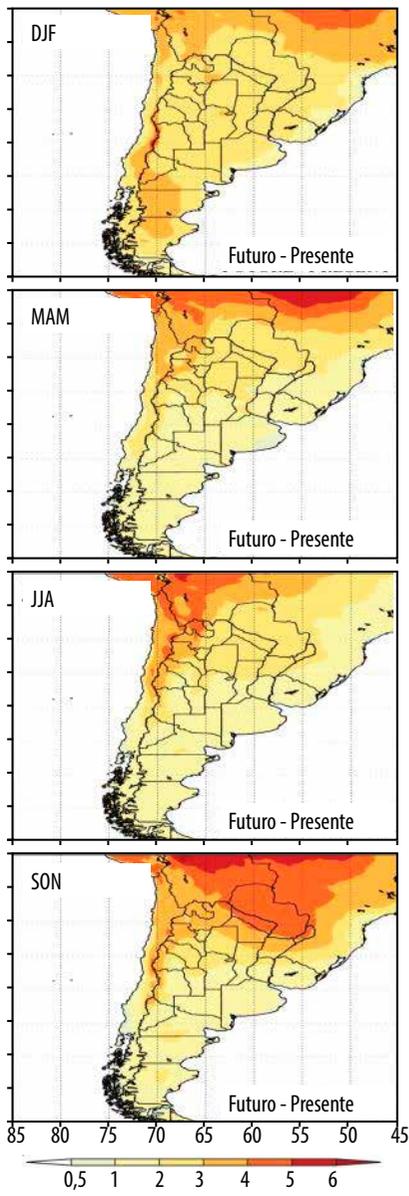
El esquema de la *Figura 2* da cuenta de cómo la acción del hombre repercute en las aguas subterráneas. Y una de las grandes preocupaciones es justamente

Figura 1: Simulación de la distribución espacial de los cambios



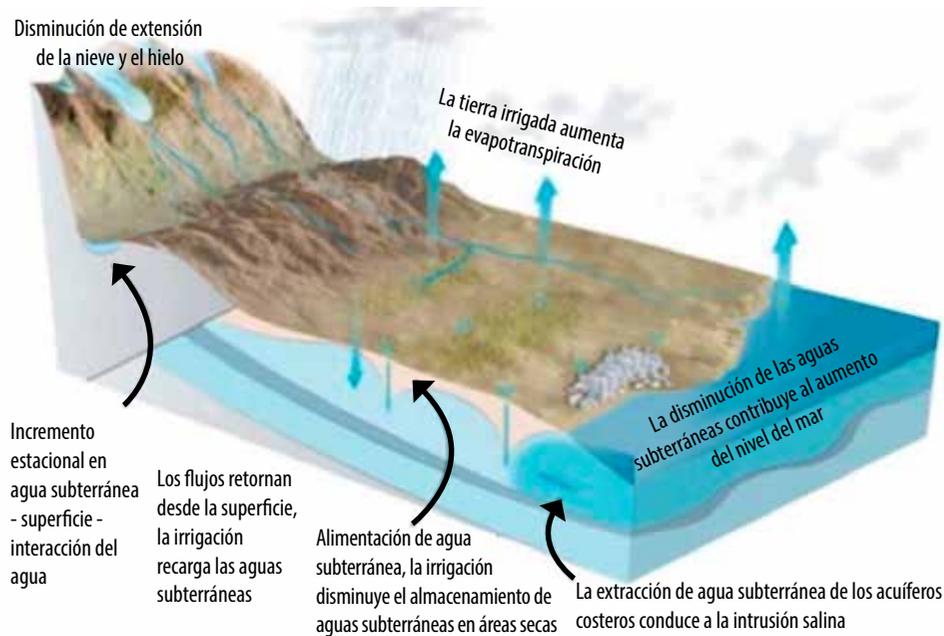
Fuente: Cabré et al., 2016.

en precipitaciones (mm/d, izquierda) y T° (°C, derecha) para 2080-2099 menos 1970-1989.



Fuente: Chapman and Davis, 2010.

Figura 2: Representación conceptual de las interacciones claves entre el agua subterránea y el clima.



Fuente: Taylor et al, 2013.

que todos los cambios que ocurren en la superficie tienen una fuerte implicancia en la calidad de estas aguas.

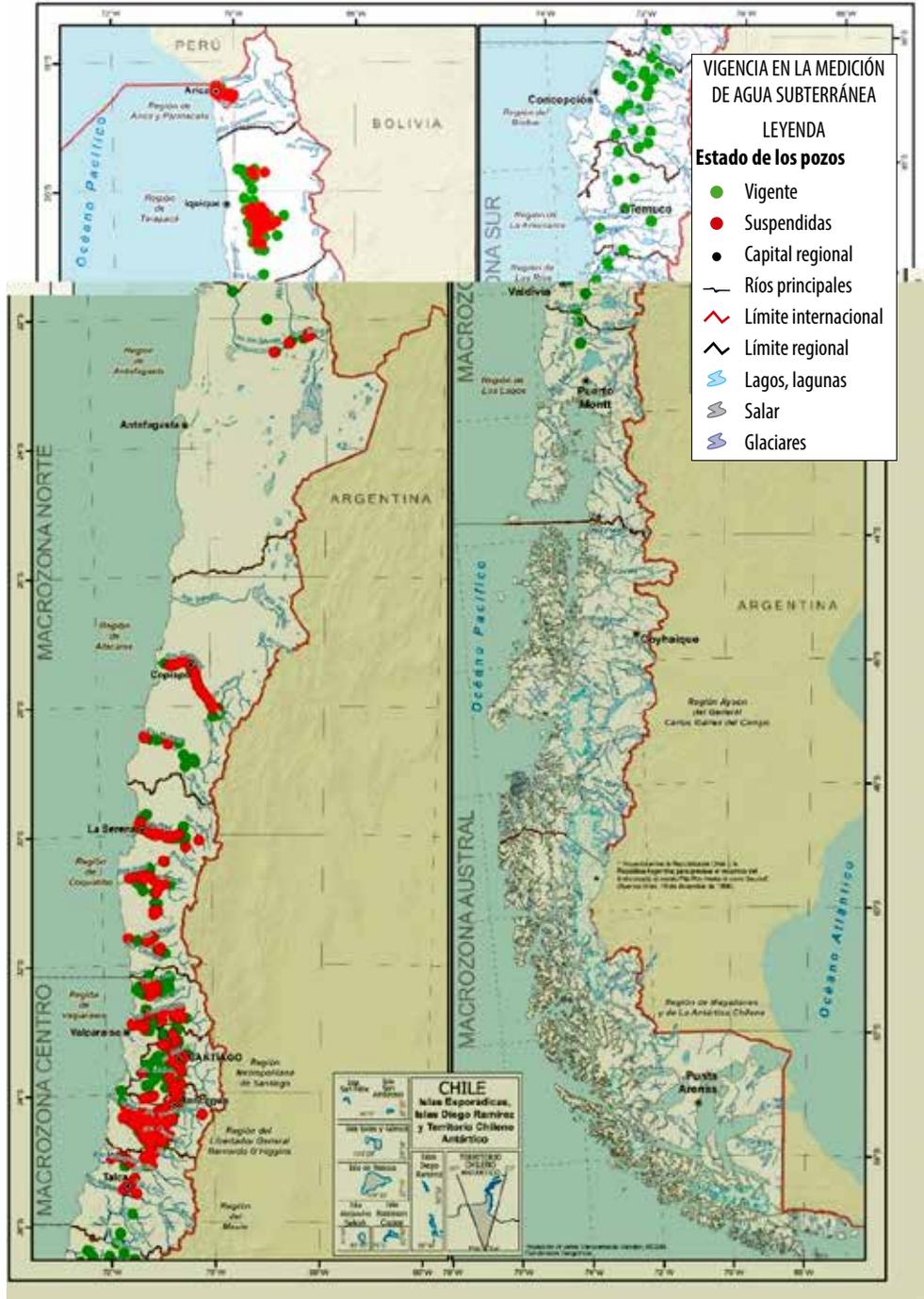
Los problemas medioambientales para las aguas subterráneas son muy grandes y están vinculados a los

estilos de vida que mantienen las personas, acelerados por el cambio climático. Actualmente, en Chile no existe una red de monitoreo específica para las aguas subterráneas. La distribución asociada a los cauces

de los ríos principales es insuficiente para entender la recarga y la dirección de los flujos subterráneos.

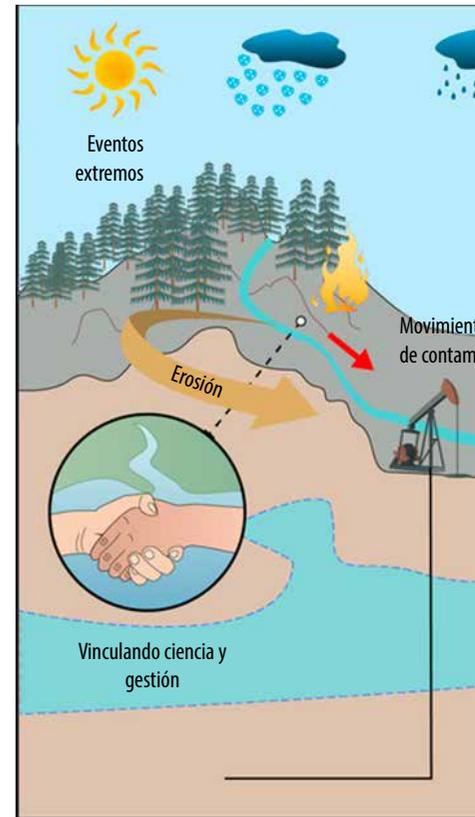
En la Figura 3 se observan las estaciones no vigentes, que en un momento estuvieron activas, pero que

Figura 3: La distribución asociada a los cauces de los ríos principales es insuficiente para entender la recarga y la dirección de los flujos subterráneos.



Fuente: División de Hidrología, DGA.

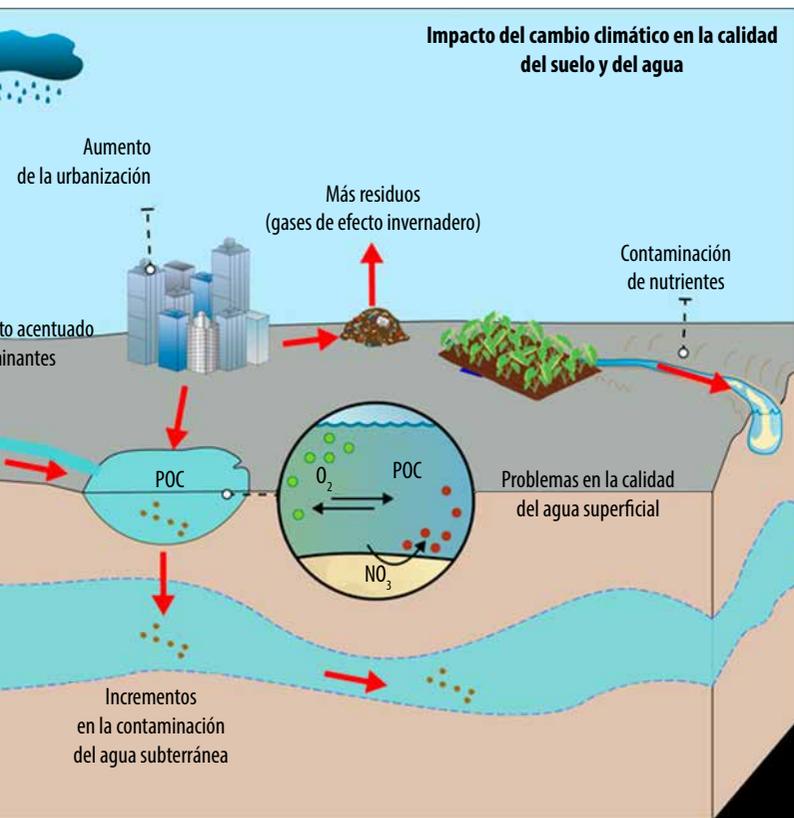
Figura 4: Impacto del cambio climático en la calidad del suelo.



Recuadro 1: Impactos del Cambio Climático.

Impacto del clima	Impacto h
Aumento del nivel del mar <ul style="list-style-type: none"> Inundación Marejadas Erosión Salinización de tierras y aguas 	<ul style="list-style-type: none"> Pérdidas de Inundación Falta de a Daños a la Pérdida de Amenaza
Aumento de la temperatura <ul style="list-style-type: none"> Cambio en los vectores de enfermedades Blanqueamiento de corales Impacto en la pesca 	<ul style="list-style-type: none"> Propagación Cambios de Medios de Amenaza
Fenómenos meteorológicos extremos <ul style="list-style-type: none"> Tormentas de mayor intensidad Marejadas Retraso de los monzones Largos intervalos en períodos de lluvia Retiro temprano de los monzones 	<ul style="list-style-type: none"> Desplazamiento Contaminación Daños a la alimentos Trastornos Aumento Daños a ti Interrupción Daños a la s Daños ma
Cambios en la precipitación <ul style="list-style-type: none"> Cambio en los vectores de enfermedades Erosión 	<ul style="list-style-type: none"> Brote de e Agotamiento

Fuente: Adaptado de "Climate Change: tackling the greatest hum



actualmente no se mantienen en monitoreo. Y aunque históricamente el foco ha estado puesto en las aguas superficiales, porque son más rentables para su utilización, hoy son absolutamente necesarias las cifras y los datos corroborables sobre aguas subterráneas, dejando de imaginar y percibir los acuíferos como un agujero con agua infinita que llega hasta un punto desconocido.

La calidad del agua también representa una gran preocupación. En la *Figura 4* se observan los contaminantes orgánicos persistentes (POC), a cuyo escenario además hay que añadirle los contaminantes emergentes. Así, lo que se espera es una variación e impacto social, pues si varía la forma en que llueve existirá una menor disponibilidad de aguas arriba,

cambiando la recarga de las aguas subterráneas, lo que implica que finalmente el agua disponible para abastecimiento y para la agricultura sea insuficiente.

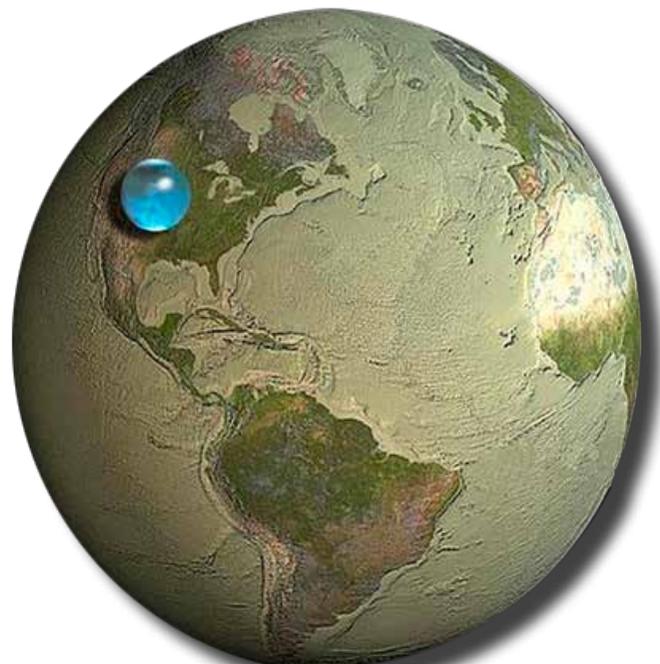
Para la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) el agua y el cambio climático representan una de las grandes dificultades, lo que requiere de intervenciones, con infraestructura o con actividades que permitan incrementar la disponibilidad de agua que garantice la producción de alimentos.

Agua: desarrollo socioeconómico y sustentabilidad

La imagen de la *Figura 5* da cuenta de la cantidad disponible de agua dulce al compararla con el tamaño de la tierra, que es muy limitada y cuya demanda

Impacto humano	Impacto global
<ul style="list-style-type: none"> de tierra iones, lesión agua limpia, enfermedades infraestructura costera, casas y propiedades tierras agrícolas y ganaderas al turismo y pérdida de playas 	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de la pobreza
<ul style="list-style-type: none"> ión de enfermedades en la pesca tradicional subsistencia y pesca comercial al turismo, pérdida de corales y de la diversidad de peces 	<ul style="list-style-type: none"> Disminución de la productividad - producción global <ul style="list-style-type: none"> - Agricultura - Ganado - Pesca
<ul style="list-style-type: none"> amientos de la población ación del suministro de agua infraestructura: retrasos en el tratamiento médico, crisis ia psicológico de la transmisión de enfermedades tierras agrícolas ón del funcionamiento de los centros educativos sector turístico. sivos a la propiedad 	<ul style="list-style-type: none"> Amenaza a la seguridad alimentaria y sanitaria de millones de personas afectadas por el hambre
<ul style="list-style-type: none"> enfermedades, afectación a cultivos y a las personas nto de los suelos agrícolas 	<ul style="list-style-type: none"> Nuevos problemas de salud

Figura 5: La gota representa la cantidad de agua dulce en proporción a la tierra.



actual no será sustentable en algunas décadas. De acuerdo a un informe del World Resource Institute sobre estrés hídrico, Chile se ubica segundo a nivel mundial después de Botswana (ver *Figura 6*). A su vez, según datos proporcionados por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal), ya en 2014 las cifras indicaban que en la Región Metro-

politana no existiría agua suficiente para el desarrollo de actividades tales como la agricultura y la industria.

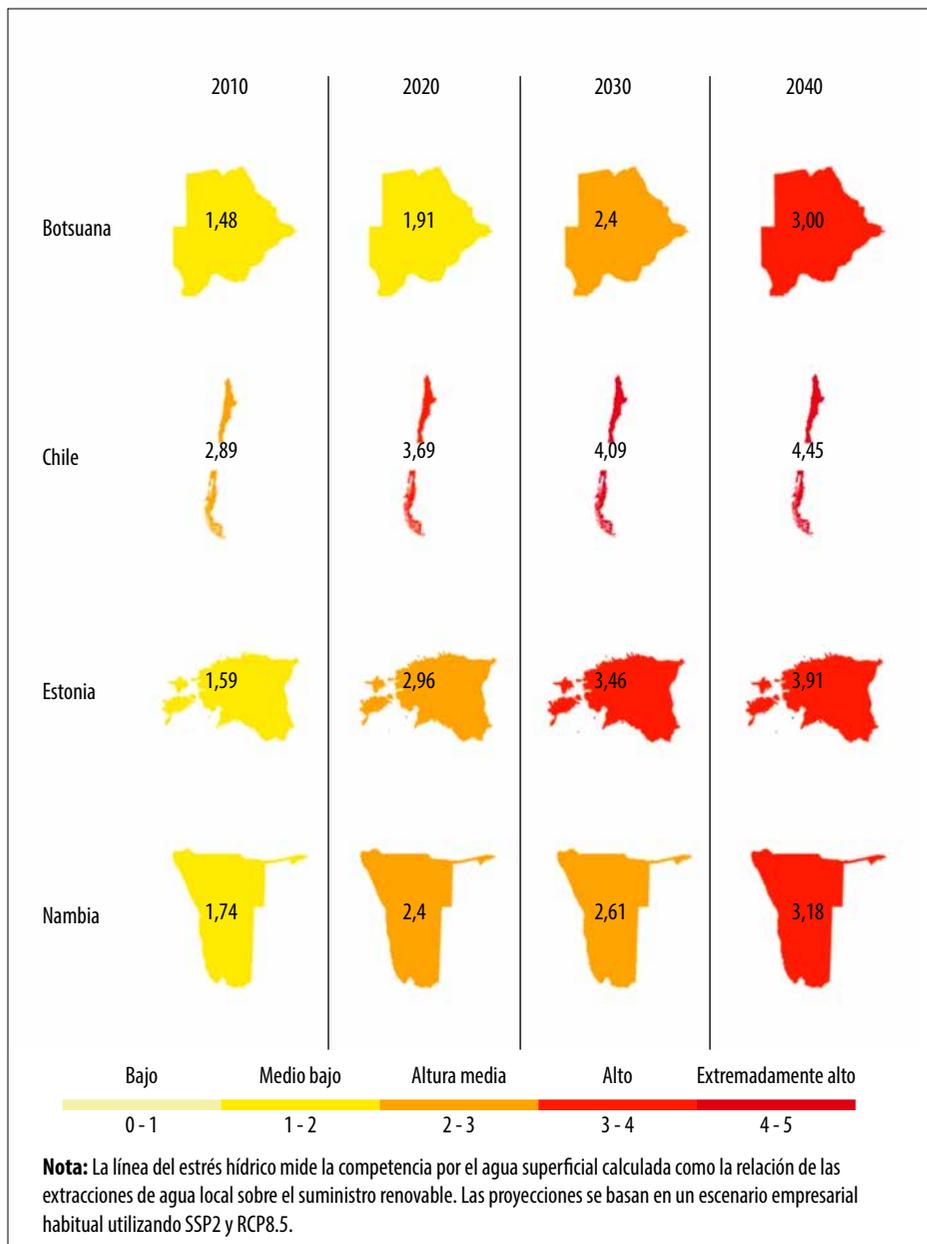
Y es en este contexto que se vuelve clave una gestión oportuna, que debe abarcar distintos aspectos. No se trata solo de infiltrar más agua o de crear una infraestructura que sea capaz de almacenarla y, de alguna manera salvaguardarla de la eva-

poración. Más bien, se trata de idear una solución de gestión que sea integral, elástica, dinámica y capaz disminuir el riesgo, porque con el cambio climático finalmente los eventos extremos aumentarán, lo que implicará que el agua disponible para infiltrar no será la misma del caudal actual, sino que más bien estará disponible durante un tiempo más corto,

como consecuencia de un evento de lluvia intensa.

La *Figura 7* da cuenta de una forma de promover la gestión dinámica del agua. Allí, los interlocutores están en distintas cajas o "water box", sin embargo, muchas veces existe una gran desvinculación entre quienes toman las decisiones, entre quienes trabajan en el problema y entre la sociedad civil. Así, como da cuenta el "water box", los especialistas y administradores del agua, si bien están formados, no siempre disponen de una perspectiva global del problema y en numerosas oportunidades toman de-

Figura 6: Estrés hídrico desde 2010 hasta 2040.



Fuente: Instituto de Recursos Mundiales.

Figura 7: Water box.



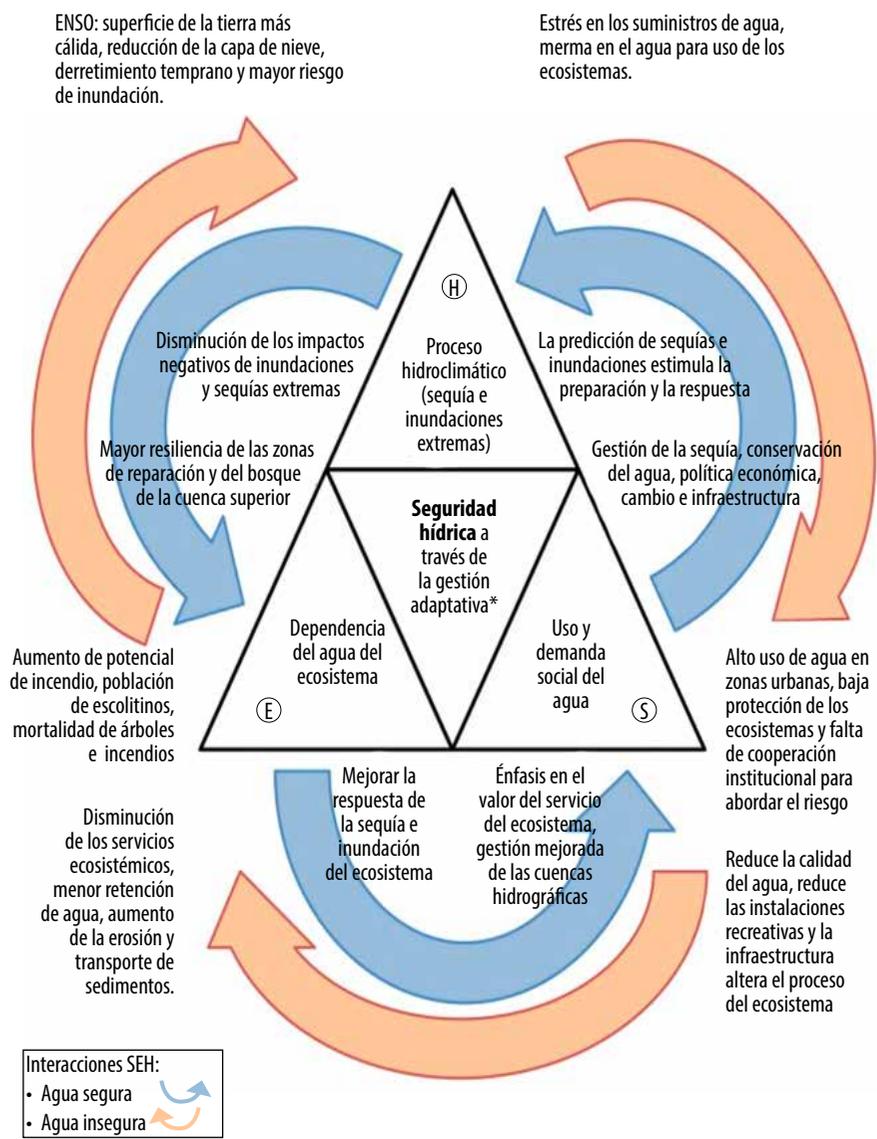
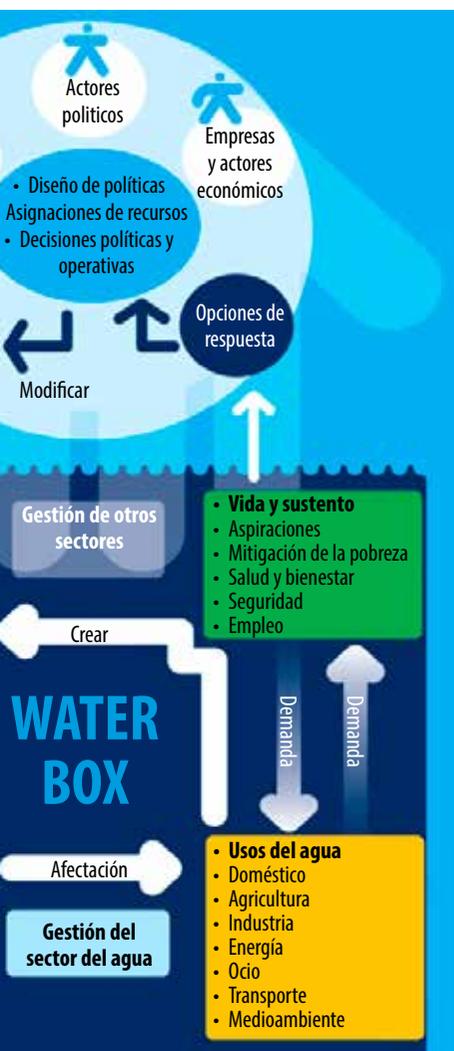
cisiones con enfoques muy localizados, que se encuentran influidas por líderes de gobierno, por el sector privado y por la sociedad civil.

Anticiparse al futuro

El agua es un recurso estratégico y en la última década se le ha tratado como un bien económico. El agua es la base para el desarrollo y estará en el centro de muchas discusiones nacionales e internacionales. Por ello, es necesario lograr disminuir todo lo asociado a un riesgo para el agua, aumentando las acciones que permitan que esa agua sea segura (ver Figura 8).

“Anticipándose al futuro, resulta necesario identificar el problema, determinar datos y que esta información no siga siendo estática, sino que se transforme en datos tan dinámicos como el propio cambio climático.”

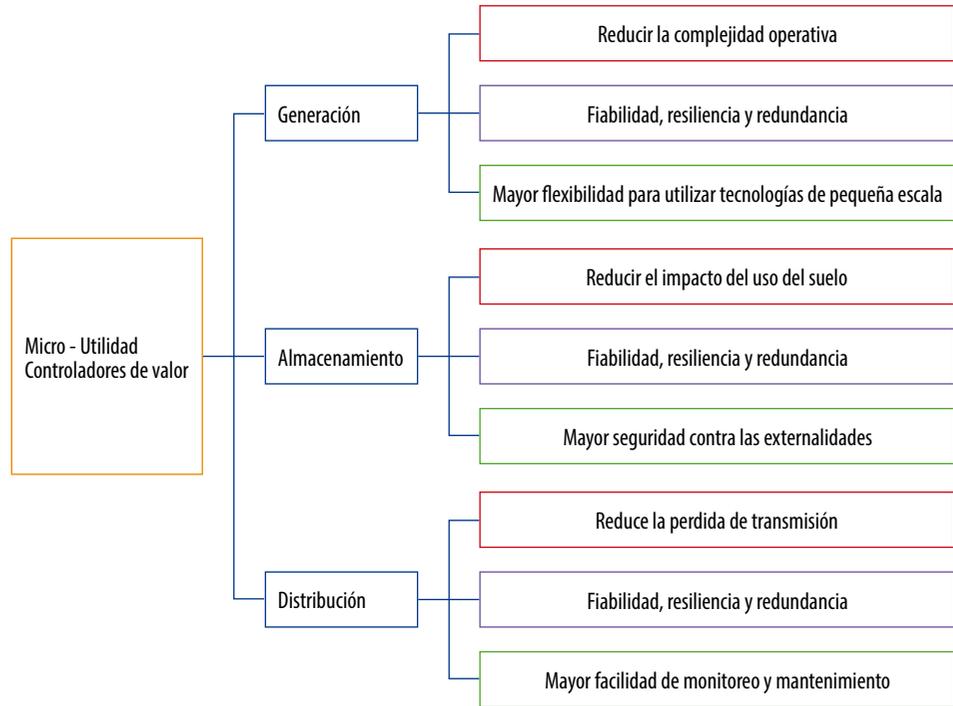
Figura 8: *La gestión adaptativa aborda la incertidumbre de las interacciones de SEH, manteniendo este intercambio en condiciones de seguridad del agua y cambiando las interacciones inseguras del agua hacia condiciones de seguridad.



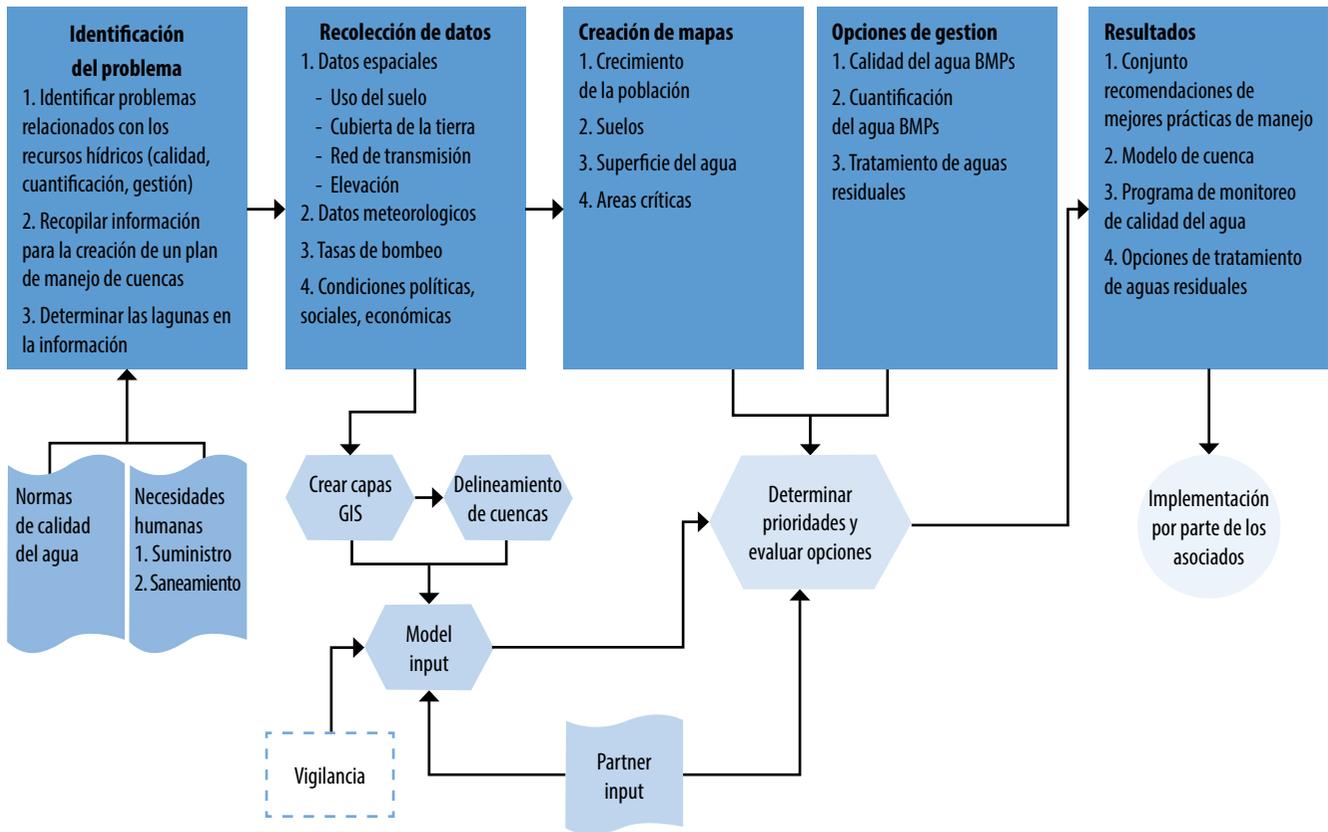
Y anticipándose al futuro, resulta necesario identificar el problema, determinar datos y que esta información no siga siendo estática, sino que se transforme en datos tan dinámicos como el propio cambio climático. Así, este proceso debe acelerarse y ser flexible.

En el mismo sentido, las instituciones, al generar esta información, deben desarrollar un portal o un *big data* capaz de compartir esta información entre diversos organismos, como la academia y entre profesionales que puedan aportar, saliendo de la actual estaticidad de la información (ver *Recuadro 2*).

Figura 9: Esquema de interconexión.



Recuadro 2: Esquema de identificación de problemas, *big data* y resultados.



Fuente: Bencala et al., 2006.

Recuadro 3: Esquema de intervención japonés. Ante los problemas generados a partir de tifones y lluvias torrenciales reiteradas y que tuvieron una inusual frecuencia, en Japón se desarrolló este sistema de intervención, con sistemas de tipo semipermeable, en el que todos los excesos generados durante las lluvias torrenciales se aprovecharon para recargar el acuífero. Contaba con un entramado en toda la cuenca, de varias obras hidráulicas de pequeña dimensión, con una suerte de mallas gigantes dentro de la quebrada que sirvieron para disminuir la velocidad y el material que llegaba a la salida de la cuenca.



Fuente: Esquema de intervención japonés (HBJLS, 1985) en Seminara y Tubino (modificado).

Gestión estratégica del recurso

Disponer de agua en el futuro implica adaptación a cambios globales, control de caudales punta e inundaciones, reducción de contaminantes, recarga de acuíferos y prevención de erosión de cauces o protección del hábitat natural.

Y también se requieren soluciones dinámicas, in-

novadoras y flexibles para enfrentar los diferentes escenarios. Como lo muestra el esquema de la *Figura 9* –que se está utilizando en la red eléctrica, la interconexión, el territorio– si se quiere salvaguardar e incrementar la disponibilidad de agua, se debe pensar en soluciones locales, por lo que las aguas deben ser manejadas no en grandes

infraestructuras, sino en pequeñas. Así, cuando va a ocurrir un problema, como una inundación o una falla de la red de abastecimiento, se puede delimitar observando, mientras que con las macroredes esto no se puede ejecutar.

Entonces, este es un concepto importante de considerar, porque minimizar los efectos del cambio climáti-

co y significa incrementar la disponibilidad de agua para el futuro.

En síntesis, es necesaria una gestión estratégica del recurso y las soluciones que se requieren deben ser flexibles y multipropósitos para responder (rápidamente) a eventuales cambios, pues finalmente, será el ser humano quien sufra las consecuencias.

Efectos del cambio climático en la recarga de acuífero

Caso de estudio en el Salar de



Nicole Blin

Nicole Blin Lizasoain es investigadora en el área de hidrogeología y candidata al doctorado en Ciencias de la Ingeniería, que cursa actualmente en la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC). Es ingeniera hidráulica por la PUC y magíster en Ciencias de la Ingeniería por la misma casa de estudios.

La investigación titulada "Efectos del cambio climático en la recarga de acuíferos: Caso de estudio en el Salar del Huasco", realizada por Nicole Blin y Francisco Suárez, fue presentada durante el Seminario 2017 "Cambio Climático y Aguas Subterráneas" de Alhsud Chile.



Francisco Suárez

Francisco Suárez, director - secretario de Alhsud Chile, es ingeniero civil hidráulico y magíster en ciencias de la Ingeniería por la PUC. Recibió su Ph.D. en Hidrogeología por la University of Nevada, Reno en 2010, donde investigó el uso de piscinas solares para recolectar y almacenar energía solar, desalinizar aguas y reducir la salinidad de lagos terminales. Es profesor asociado en el departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la PUC, desarrollando variados proyectos de investigación. Además, es investigador en el Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), en el Centro de Excelencia en Geotermia de Los Andes (CEGA)-FONDAP y en el CSET (CORFO).

El agua subterránea es una importante fuente de agua a nivel global y proporciona un tercio del agua fresca de todo el planeta para propósitos domésticos, agrícolas e industriales (Taylor et al., 2013).

Puesto que Chile es un país donde existen zonas áridas con poca disponibilidad de agua superficial y bajos niveles de precipitación, los acuíferos constituyen fuentes vitales de agua para el uso y consumo humano (Salas et al., 2016), así como también para ecosistemas que dependen de las descargas subterráneas. Para preservar este recurso, es necesario estudiar su comportamiento frente distintos escenarios futuros de cambio climático y, así, hacer más efectiva su gestión.

La mayoría de los estudios realizados hasta la fecha se han concentrado en los impactos del cambio climático en sistemas hidrológicos superficiales y las investigaciones enfocadas en el agua subterránea son relativamente escasas (Sibek et al., 2007).

Para el estudio del cambio climático se utilizan modelos de circulación global (GCM, por sus siglas

en inglés). Los GCM's son herramientas desarrolladas para simular el clima actual y futuro bajo diferentes escenarios. La formulación de estos modelos considera el comportamiento y la interacción de la biósfera, hidrósfera, criósfera, atmósfera y geósfera en el sistema climático.

Los escenarios de cambio climático establecidos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en el quinto informe de evaluación (AR5, por sus siglas en inglés) se expresan en términos de la trayectoria representativa de gases invernadero y contaminantes (RCP, por sus siglas en inglés) que resultan de actividades humanas.

En la investigación "Efectos del cambio climático en la recarga de acuíferos: Caso de estudio en el Salar del Huasco", que aquí se presenta, se han utilizado métodos de *downscaling* estadísticos para llevar la información de los GCM's, de distintos escenarios RCP's, a la escala de la cuenca seleccionada para el estudio.

Con la información recolectada, se utiliza un modelo hidrológico que permite estimar la recarga futura del

s: el Huasco

acuífero y a partir de dicha información, se realizan simulaciones hidrogeológicas para investigar el efecto del cambio climático sobre el acuífero del Salar del Huasco.

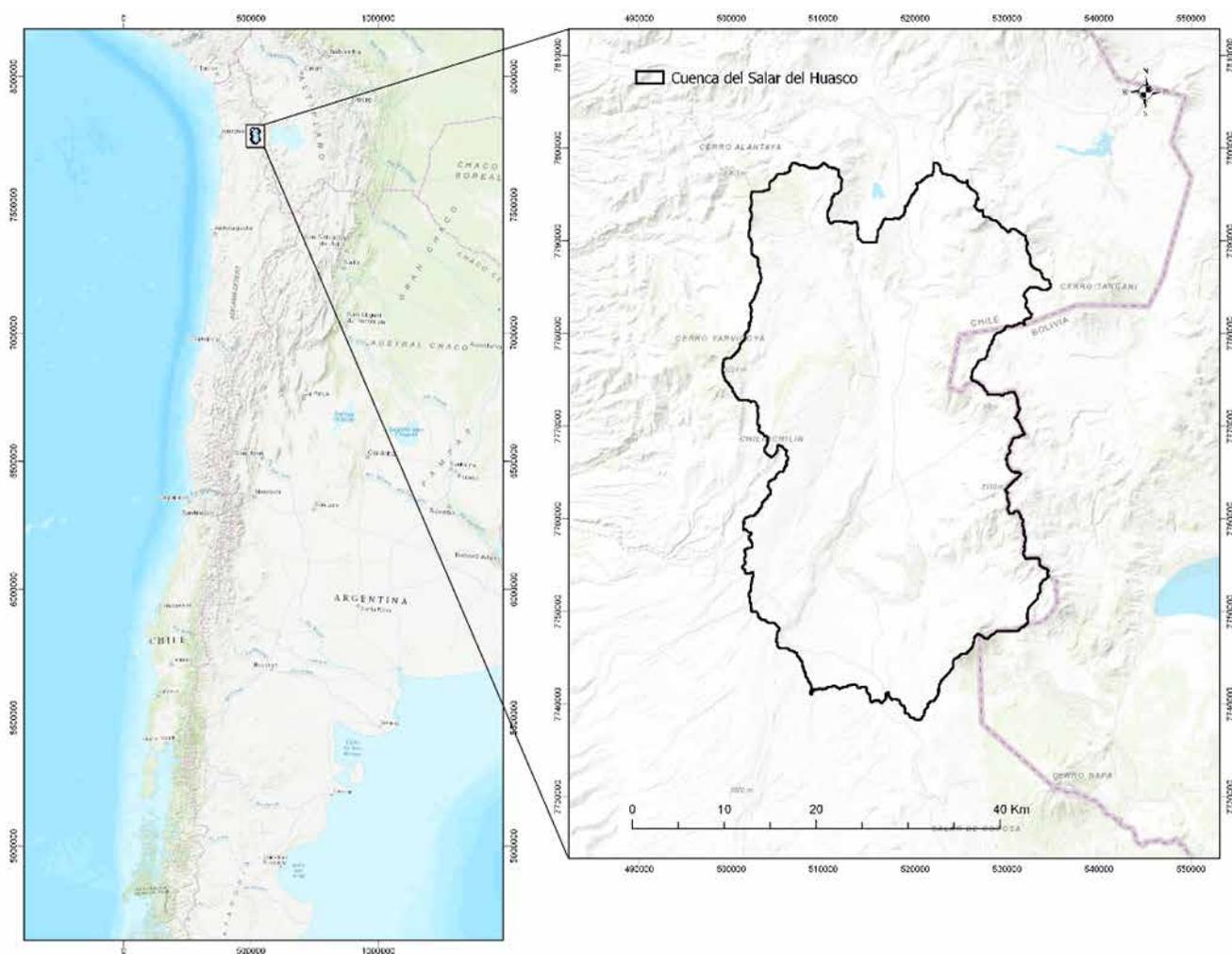
Zona de estudio

El Salar del Huasco es una cuenca endorreica ubicada en el Altiplano Andino del norte de Chile (ver *Figura 1*). Se encuentra en la comuna de Pica, al interior de

la provincia de Iquique (región de Tarapacá). La cuenca del salar cuenta con un área de 1470 km², su altura media es de 4165 msnm y se encuentra rodeado por cordones montañosos que

bordean los 5000 msnm. El punto más bajo de la cuenca posee una altura de 3770 msnm, donde desembocan las aguas del río Collacagua en el sector del salar, que por las características evaporí-

Figura 1: Cuenca del Salar del Huasco.



ticas propias de la cuenca endorreica, corresponde al sumidero final del sistema hidrológico (DGA, 2009).

El Salar del Huasco se caracteriza por la presencia de lagunas someras que alimentan los denominados bofedales (humedales en altura). Estos bofedales sustentan el ecosistema en que habitan muchas especies de flora y fauna únicas del sector (Johnson et al., 2010), entre las que destacan el zorro andino, puma, vicuñas, llamas y flamencos, entre otros.

Además, el Salar del Huasco es de especial importancia, ya que en él se encuentran tres especies de flamencos de las seis que existen en el mundo.

Metodología de análisis de impactos

La *Figura 2* presenta el esquema metodológico seguido para analizar el impacto del cambio climático sobre el acuífero del Salar del Huasco. Primeramente, se procesan los *outputs* de precipitación y temperatura de múltiples modelos climáticos para que puedan ser utilizados a nivel de cuenca, a través de métodos de *downscaling*. En este primer paso se definen los escenarios futuros que serán utilizados para evaluar los impactos del cambio climático.

Posteriormente, el segundo paso consiste en calcular la recarga a partir de los da-

tos de precipitación y temperatura procesados para cada escenario mediante un modelo hidrológico.

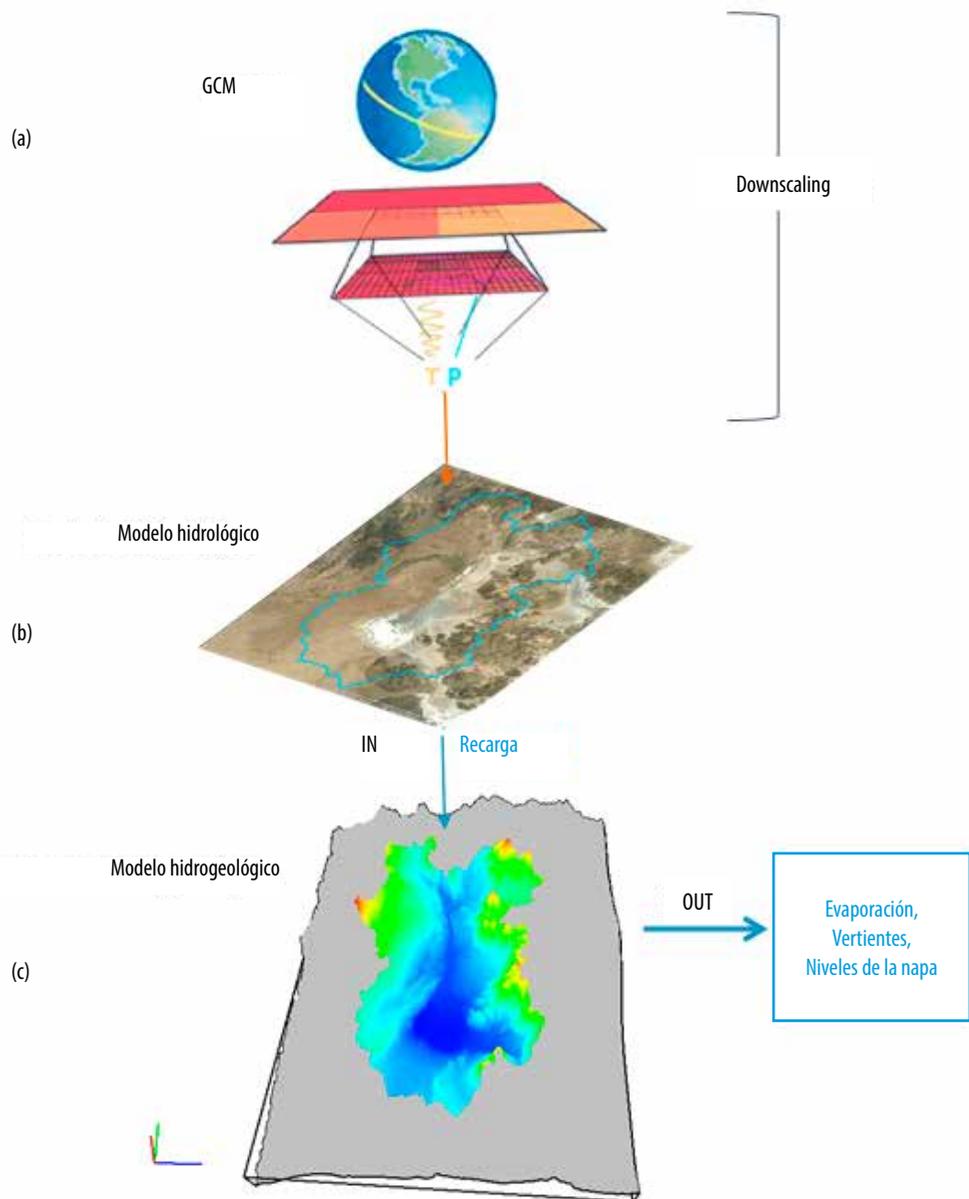
Luego, los valores de recarga obtenidos para cada escenario son utilizados como valor de entrada en el modelo hidrogeológico. Y a partir del

modelo hidrogeológico se obtienen resultados de los niveles de la napa en el tiempo, así como de la fluctuación de los flujos de entrada y salida que gobiernan el balance hídrico de la cuenca, e.g., evaporación y afloramiento de los manantiales.

Escenarios asociados al cambio climático y *downscaling*

Para la investigación de esta zona se utilizaron los datos de precipitación y temperatura mensual obtenidos de distintos modelos climáticos, dentro de los cuales se

Figura 2: Esquema de la metodología utilizada (Blin, 2018).



cuentan los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5. Y los datos para la zona del Salar del Huasco fueron obtenidos del proyecto *Downscaled CMIP3 and CMIP5 Climate Projections: Release of Downscaled CMIP5 Climate Projections* (Brekke, Thrasher, Maurer, y Pruitt, 2013), que entrega información con una desagregación espacial corregida por sesgo (BCSD, por sus siglas en inglés) con una resolución de grilla de $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ (latitud x longitud).

Con el objetivo de analizar los impactos del cambio climático a nivel de cuenca es necesario obtener *outputs* de modelos climáticos que sean aplicables a escala de local, para lo cual se aplican métodos de *downscaling*.

El estudio aquí desarrollado utilizó el método delta híbrido (HD, por sus siglas en inglés), que recibe ese nombre porque combina dos técnicas para realizar *downscaling*: corrección de sesgo y desagregación espacial (BCSD) y el método delta (DM).

El BCSD consiste en corregir los datos del GCM de manera que queden con la misma función de probabilidad acumulada que los datos observados en el lugar.

El DM, en tanto, compara los promedios mensuales de los datos futuros del GCM con los promedios mensuales de datos históricos de los GCMs en el sitio de interés, utilizando ventanas de tiempo históricas y futuras de igual duración. Estos deltas se aplican a los datos observados para generar series de tiempo futuras que representen los cambios proyectados por los GCMs, los que, posteriormente, son nuevamente corregidos con el método BCSD.

De esta forma, mientras que la aplicación común del DM implica perturbar los promedios mensuales a nivel regional de las variables de interés, el método HD perturba toda la función de probabilidad acumulada mensual de las observaciones a escala local, de manera de obtener series de tiempo futuras que sean representativas de todo tipo de eventos.

Para abarcar un mayor rango de proyecciones futuras y debido a que no se tiene ninguna justificación para elegir un escenario en particular (Hausner et al., 2014), en este trabajo se decidió trabajar con un conjunto de 241 proyec-

ciones dentro de las cuales se encuentran RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5. De este conjunto de proyecciones, también denominados ensambles, se obtienen los percentiles 10 (p10), 50 (p50) y 90 (p90).

Estos tres percentiles se utilizan como pseudo escenarios de cambio climático, los cuales, en lugar de considerar una única forzante de un modelo en particular, consideran una gama de diferentes forzantes de distintos modelos y simulaciones climáticas. El percentil 10 representa el escenario de menor temperatura y precipitación, y se denomina en este estudio *escenario A*; el percentil 50 representa el escenario intermedio, y en este estudio se llama *escenario B*; y el percentil 90 representa el escenario de mayor temperatura y precipitación, el cual se denomina *escenario C*.

Estimación de la recarga del acuífero

Para estimar la recarga que ingresa al acuífero se utilizó el modelo de precipitación escorrentía (MPE) desarrollado por Uribe et al. (2015), cuyo modelo corresponde a uno de simulación continua de los procesos hi-

drológicos, que transforma datos meteorológicos mediante relaciones de balance de masa en cuatro reservorios que representan las zonas de interés.

A partir de datos de temperatura, precipitación y evaporación a escala diaria, el modelo determina la escorrentía superficial, flujo subterráneo, pérdidas por evaporación y percolación profunda. Para aplicar este modelo se divide la cuenca en unidades con características geológicas, morfológicas e hidrológicas similares denominadas unidades de respuesta hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés). El balance de los flujos de los reservorios se hace para cada HRU, los cuales sumados constituyen los flujos de salida total de la cuenca.

Modelación hidrogeológica Modflow

Para el modelo de flujo subterráneo se utilizó el programa *Modflow*, que simula tridimensionalmente el flujo de agua subterránea a través de un medio poroso por medio del método de diferencias finitas (Harbaugh et al., 2000). La ecuación de flujo subterráneo que resuelve es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.5)$$

donde γ (L^{-1}) son los valores de conductividad hidráulica a lo largo de los ejes x, y, z , respectivamente; L es el nivel piezométrico; (T^{-1}) es el flujo por unidad de volumen de fuentes o sumideros; $S_s(L^{-1})$ es el almacenamiento específico del medio poroso; y t (T) es el tiempo. MODFLOW resuelve esta ecuación a través del método de diferencias finitas, donde el valor de h es calculado para cada celda del dominio del modelo.

Para incorporar los distintos elementos presentes en el sistema natural que interactúan con el acuífero se utilizaron los paquetes EVT, para incorporar la evaporación; RCH, para la recarga, RIV, para el río, y DRN, para las vertientes.

Además, se impuso la condición de borde impermeable en el límite exterior de la cuenca. Y como valor inicial de la napa en la simulación transiente se utilizó el nivel piezométrico obtenido en un primer período de estrés en condiciones estacionarias.

Resultados y discusión

El *downscaling* obtenido de precipitación y temperatura se utilizó como dato de entrada al modelo hidrológico, con el cual se obtuvieron las recargas totales al acuífero para los tres escenarios.

Los resultados obtenidos se comparan con estudios anteriores realizados en la zona (ver *Recuadro 1*), en términos de recarga y porcentaje de precipitación que se transforma en recarga.

Allí (ver *Recuadro 1*) puede observarse que las pre-

Figura 3: Recarga total ingresada al modelo hidrogeológico para cada uno de los escenarios estudiados.



Recuadro 1: Porcentaje de la precipitación que se transforma en recarga. Modificado de Uribe, 2012.

	Area km ²	Pp mm/año	Recarga media L/s	% Pp
Uribe (2012)	1461	148,8	1027	14,9
DIHA-PUC (2009)	1470,7	145,2	1159	17,3
Acosta (2004)	1498	163,2	1579	18,1
GP Consul. (2003)	1532	167,7	1012	12,4

Comparación estudio actual (Blin, 2018)

Area km ²	Pp			A		B		C	
	A mm/año	B	C	A L/s	% Pp	B L/s	% Pp	C L/s	% Pp
1470	66,4	88,4	119,4	550,5	17,8	682,7	16,6	1242,2	22,3

precipitaciones obtenidas en este estudio son menores a las consideradas en estudios anteriores, sin embargo, los porcentajes de precipitación que se transforman en recarga son similares.

Lo anterior se debe a que si bien disminuye la precipitación promedio, en todos los escenarios aumenta la variabilidad diaria y con ella la ocurrencia de eventos extremos, los que finalmente favorecen la recarga hacia el acuífero.

Estas recargas fueron ingresadas al modelo hidrogeológico con el cual se simuló el período comprendido por los años 2020 y 2100. De estas simulaciones se obtuvo que el balance de masa de la cuenca está gobernado principalmente por los flujos de evaporación y recarga, los que se presentan en la *Figura 2 (b)*, donde se observa que la evaporación responde al aumento o disminución de la recarga. Una mayor recarga al acuífero implica una mayor cantidad de agua disponible para ser evaporada, por lo que la evaporación es mayor

Adicionalmente, se compararon los niveles de la napa obtenidos en los tres escenarios, correspondientes al último período simulado, es decir al final del año 2100.

Es posible observar que la diferencia de niveles entre un escenario y otro es casi nula. Por tanto, existe una relación entre los flujos de evaporación y recarga que mantie-

Figura 4: Comportamiento de los flujos de evaporación y recarga, para cada escenario simulado.

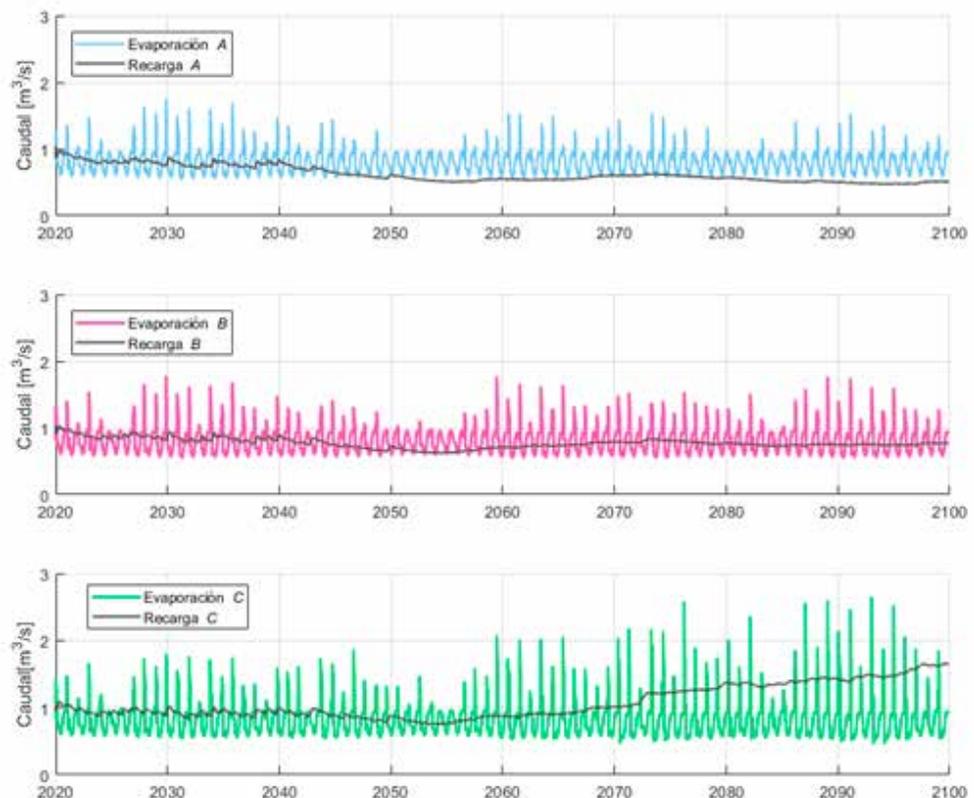
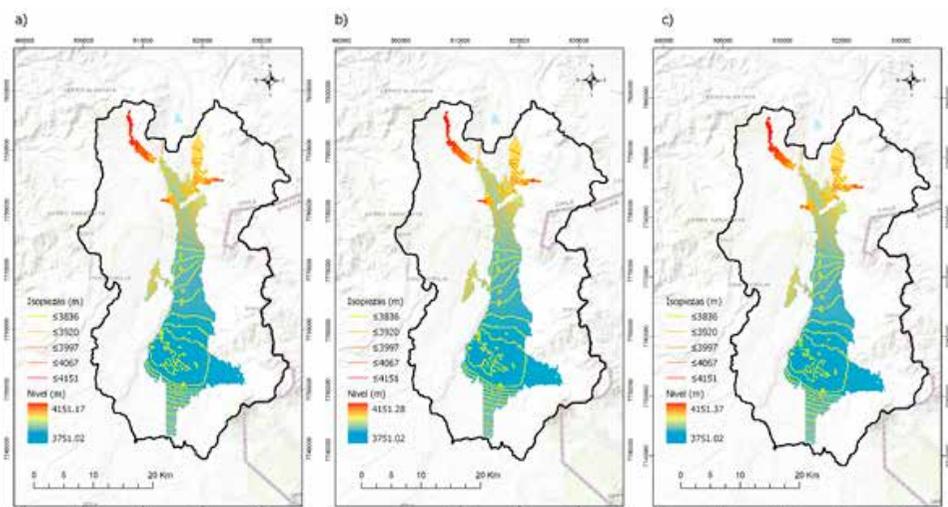


Figura 5: Niveles de la napa al final del año 2100, para a) el escenario A, b) el escenario B y c) el escenario C.



nen el balance hídrico de la cuenca, de forma tal que los niveles de la napa se mantienen constantes en todos los escenarios.

De ser efectivamente así, el Salar del Huasco tendría la capacidad de amortiguar los efectos del cambio climático, cuya capacidad se debe, en parte, a que se trata de una zona que no ha sido intervenida. Por tanto, de existir bombeo el panorama podría ser diferente.

Justamente, esto fue lo que ocurrió en el Salar de Coposa, ubicado aproximadamente a 40 kms del Salar del Huasco, donde se comenzó a bombear con fines mineros, afectando el caudal de descarga que alimentaba la laguna de Jachucoposa. Se estima que el caudal de descarga disminuyó desde 90 L/s en 1998 (año que comenzó el bombeo) a valores del orden de 20 L/s en 2005 (DICTUC, 2007).

Conclusiones

Las recargas obtenidas en cada escenario fueron ingresadas al modelo hidrogeológico para simular los flujos desde y hacia el acuífero en el período comprendido por los años 2020 y 2100, con el objetivo de analizar los efectos del cambio climático sobre ellos y sobre los niveles de la napa.

No se observaron cambios significativos en los niveles de la napa en ninguno de los escenarios simulados. Sin embargo, en respuesta a los valores de recarga ingresados

en cada uno de ellos, sí se observan cambios en los flujos de evaporación.

Puesto que ni los flujos relacionados al río Collacagua ni a las vertientes del salar responden a los cambios de recarga, se puede concluir que el balance del sistema se encuentra gobernado por los flujos de evaporación y recarga.

Estos resultados sugieren que el acuífero del Salar del Huasco tendrá la capacidad de retardar los efectos del cambio climático y, de esa forma, actuar como un *buffer* que permita ofrecer resistencia a las variaciones externas. Esto se da en el Salar del Huasco, en parte, gracias a que la cuenca no ha sido intervenida, por lo que resulta relevante que esta zona siga estando protegida, para que pueda preservar las características que hacen del salar un ecosistema tan particular.

El estudio "Efectos del cambio climático en la recarga de acuíferos: Caso de estudio en el Salar del Huasco" permite establecer un acercamiento de cómo afectará el cambio climático en zonas áridas del altiplano que no se encuentren intervenidas por el factor antrópico, lo cual facilita comprender los efectos netos del cambio climático y entender cómo responde este tipo de sistemas en condiciones naturales, lo que puede aportar a la toma de conciencia respecto al manejo responsable del recurso. ☺

Referencias

- Blin, N. (2018). *Efectos del cambio climático en el acuífero del Salar del Huasco*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Brekke, L., Thrasher, B. L., Maurer, E. P., & Pruitt, T. (2013). *Downscaled CMIP3 and CMIP5 climate and hydrology projections: Release of downscaled CMIP5 climate projections, comparison with preceding information, and summary of user needs*. Denver.
- DGA. (2009). Sistema Piloto I Región: Salar del Huasco. In *Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, Regiones XV, I, II y III*.
- DICTUC. (2007). Evaluación de efectos hidrogeológicos en Zona Norte Cuenca Coposa- Proyecto Cambio de Puntos de Captación de 448 l/s desde Falla Pabellón. In *Estudio hidrogeológico conceptual y numérico del funcionamiento de la cuenca del Salar de Coposa*.
- Harbaugh, A., Banta, E., Hill, M., & McDonald, M. (2000). *MODFLOW-2000, The US Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. Open-file Report 00-92*. wipp.energy.gov. Retrieved from http://wipp.energy.gov/library/CRA/2009_CRA/references/Others/Harbaugh_Banta_Hill_and_McDonald_2000_MODFLOW_2000_Open_File_Report_00_92.pdf
- Hausner, M. B., Wilson, K. P., Gaines, D. B., Suárez, F., Scopettone, G. G., & Tyler, S. W. (2014). Life in a fishbowl: Prospects for the endangered Devils Hole pupfish (*Cyprinodon diabolis*) in a changing climate. *Water Resources Research*, 50(8), 7020–7034. <https://doi.org/10.1002/2014WR015511>
- Johnson, E., Yáñez, J., Ortiz, C., & Muñoz, J. (2010). Evaporation from shallow groundwater in closed basins in the Chilean Altiplano. *Hydrological Sciences Journal*, 55(4), 624–635. <https://doi.org/10.1080/02626661003780458>
- Salas, I., Herrera, C., Luque, J., & ... J. D. (2016). Recent climatic events controlling the hydrological and the aquifer dynamics at arid areas: The case of Huasco River watershed, northern Chile. *Science of the Total Environment*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969716315777>
- Scibek, J., Allen, D., Cannon, A., & Whitfield, P. (2007). Groundwater–surface water interaction under scenarios of climate change using a high-resolution transient groundwater model. *Journal of Hydrology*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406004069>
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., ... Treidel, H. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, 3(4), 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>



SEMINARIO ANUAL
ALHSUD
Capítulo Chileno A.G.

28/11/2018
8:30 A.M.

Gobernanza del agua subterránea en la gestión hídrica

Centro de Extensión
Universidad de Talca
(sede Santiago). Quebec 415,
Providencia (metro El Salvador).

Valores:
Público General: \$50.000
Socio Alhsud (cuota al día): \$30.000
Estudiantes (cupos limitados): \$15.000

Inscripciones:
seminario2018@alhsudchile.cl
comunicaciones@alhsudchile.cl
www.alhsudchile.cl

 Alhsud Chile
 @alhsudchile

 Alhsud Capítulo Chileno
 alhsudchile

ORGANIZAN:





Capítulo Chileno de la Asociación Latinoamericana
de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (Alhsud)
Providencia 2330, oficina 63.
comunicaciones@alhsudchile.cl - www.alhsudchile.cl

 Alhsud Chile
 @alhsudchile
 Alhsud Capítulo Chileno
 alhsudchile