



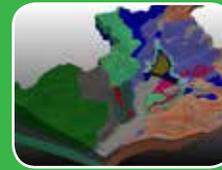
Resiliencia hidrológica,  
gestión y participación de  
usuarios en la explotación  
intensiva de acuíferos

**P. 2**



Manejo del agua  
en los Países Bajos  
y las soluciones  
implementadas

**P. 8**



Depósitos de relaves:  
Una perspectiva  
hidrogeológica para  
estimar sus infiltraciones

**P. 53**



# VERTIENTE

OCTUBRE DE 2017, EDICIÓN N° 18

## Explotación dinámica de acuíferos

# Índice

Editorial

1

Áreas de protección:  
¿Qué protegen, el agua o los derechos?" **32-33**



Manejo de las aguas en los Países Bajos  
y las soluciones implementadas **8-14**

Análisis de criterios en la predicción  
y evaluación de impactos ambientales  
por uso de aguas subterráneas **16-21**

Confirmación exitosa de la gestión  
dinámica de aguas subterráneas:  
Explotación del acuífero del  
Aconcagua en períodos de sequía **22-31**

La restauración hidrológica forestal como  
factor de recarga de acuíferos **39-45**

Estimación de flujos de evaporación  
desde napas someras y del contenido de  
humedad del suelo utilizando métodos  
distribuidos de temperatura **46-52**

Depósitos de relaves: Una perspectiva  
hidrogeológica para estimar  
infiltraciones y aplicación mediante  
modelo numérico 3D **53-56**



**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, José Luis Fuentes Vásquez, Pablo Jaeger Cousiño, Héctor González Maureira, Fernando Peralta Toro, Hernán Llona Gajardo e Ignacio Popelka Jiménez. **Past-Presidentes:** Eugenio Celedón Silva, Jaime Muñoz Rodríguez, Nelson Pereira Muñoz y Eugenio Celedón Cariola. **Comité asesor:** José Luis Delgado Escárate, Gonzalo Lira Canguilhem, Luis Simón Figueroa del Río, José Luis Arumí y Luis Jorquera Galaz.

**Dirección periodística:** Pilar Castillo Muñoz.

**Diseño y producción:** Mónica Maldonado Cea.

Revista Vertiente es el órgano oficial de difusión de ALHSUD Capítulo Chileno y tiene por finalidad entregar información a entidades nacionales e internacionales, autoridades, profesionales, técnicos y estudiantes vinculados a las aguas subterráneas.

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

# Editorial



**Pablo Rengifo Oyarce**

Presidente de Alhsud Chile.

**E**l capítulo chileno de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (Alhsud) cuenta con 23 años de activa trayectoria.

En marzo de 1993 inició su quehacer con la organización del Segundo Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea, realizado en 1994 en Santiago de Chile, que convocó la presencia de altas autoridades, incluido el entonces presidente de la República, Eduardo Frei Ruiz-Tagle.

Conscientes de la necesidad de profundizar en el análisis en torno a la gestión del agua subterránea y de los recursos hídricos en general, a partir de 1996 se inicia la publicación anual de nuestra revista *Vertiente*, medio oficial de difusión del conocimiento y de las actividades efectuadas por Alhsud Chile.

Asimismo, a partir de 1995 hemos realizado anualmente un seminario en el que se abordan distintos temas de interés nacional. Entre otros, destacan en la última década los siguientes tópicos: ¿Existe sobreexplotación del agua en Chile? (2010); “Recarga y gestión de embalses subterráneos” (2012); “El valor del agua” (2013); “El Código de Aguas mirando al futuro” (2015); y “Explotación dinámica de acuíferos: solución para épocas de sequía” (2016). Durante 2011, en tanto, el seminario se efectúa en el contexto de la “Segunda Cumbre Internacional de Sustentabilidad Hídrica”, organizada conjuntamente con la Comisión Nacional de Riego (CNR); mientras que en 2014 se realiza en Chile el “XII Congreso Latinoamericano de Hidrogeología” de forma paralela con el “XXVI Congreso latinoamericano de hidráulica”, denominado “Agua, medio ambiente y sociedad”.

Como puede apreciarse, las distintas temáticas abordadas son coincidentes con los “grandes temas país” asociados a los

recursos hídricos y en particular, al agua subterránea, recurso cada vez más valorado y estratégico para el desarrollo agrícola, industrial y minero de Chile, junto con ser la principal fuente de abastecimiento de agua potable para un alto porcentaje de la población a nivel nacional.

Nuestro seminario 2016 abordó como tema central el uso del agua subterránea como una solución eficaz para enfrentar las épocas de sequía, tema de mayor relevancia considerando la prolongada sequía que afectó al país en los últimos años, sumado a los efectos del cambio climático y a la creciente demanda por recursos hídricos. Sin embargo, para una eficiente y efectiva gestión dinámica de las aguas subterráneas se requiere de voluntad y conocimiento, junto a un marco jurídico-administrativo apropiado, lo que permitiría usar las reservas de aguas subterráneas existentes en numerosos acuíferos del país, para poder afrontar de mejor manera los períodos de sequía, facilitando posteriormente su recuperación en tiempos de abundancia hidrológica, ya sea restringiendo las explotaciones y/o facilitando la recarga artificial de los acuíferos.

En este contexto, las reformas al Código de Aguas –actualmente en discusión– plantean una oportunidad única para introducir los cambios requeridos. Estos deben apuntar, principalmente, a favorecer la gestión integrada de cuencas, la recarga artificial de acuíferos y la flexibilidad en el uso derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas.

Esta edición número 18 de revista *Vertiente* da cuenta de los principales aspectos abordados y trabajados durante el último año, específicamente en nuestro seminario 2016 y durante el primer semestre de 2017. Se presentan ejemplos de la explotación intensiva de acuíferos en períodos acotados de tiempo

para enfrentar sequías, como es el caso del acuífero del valle del Aconcagua en Chile, así como en extensos períodos (décadas), como es el caso del Campo de Dalías en España. Igualmente, se aborda la “resiliencia hidrológica, gestión y participación de usuarios en la explotación intensiva de acuíferos”, de acuerdo a la experiencia mexicana.

También se incluyen otros tópicos de interés relacionados con el recurso hídrico y la aguas subterráneas, tales como el “manejo de las aguas en los Países Bajos” y el “análisis de criterios en la predicción y evaluación de impactos ambientales por uso de aguas subterráneas”; junto a los avances en la investigación académica y desarrollo de nuevas aplicaciones, tales como el análisis de las áreas de protección en el contexto de su utilidad, la restauración hidrológica forestal como factor de recarga de acuíferos, la estimación de flujos de evaporación desde napas someras, y nuevas perspectivas hidrogeológicas para estimar infiltraciones desde depósitos de relaves mediante modelos numéricos 3D.

Los invitamos a leer y a disfrutar de esta edición de nuestra revista, que 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 también una instancia de discusión e intercambio de opiniones en torno a las políticas públicas y a la gestión del recurso hídrico.

Finalmente y en este contexto, se hace muy relevante mantener y fortalecer uno de los conceptos acuñados con fuerza en los últimos años por Alhsud: *“Una política hídrica para Chile debe estar basada en el conocimiento, cuantificación y buena administración del recurso, mediante una operación informada y monitoreada en terreno, en conjunto con los usuarios y no desarrollada desde la escasez”*.

# Resiliencia hidrológica, gestión y participación de usuarios en la explotación intensiva de acuíferos



Miguel Rangel\*

Artículo elaborado a partir de la ponencia realizada durante el Seminario 2016 "Explotación dinámica de acuíferos" de Alhsud Chile.

\* Miguel Rangel es doctor en Ciencias por la Universidad Nacional Autónoma de México y presidente de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo – Alhsud Internacional (período 2014-2018). Es presidente del Capítulo Mexicano de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH) y director del Instituto de Investigaciones del Desierto y Agua Subterránea de México.

El National Weather Service (2008) define sequía como una anomalía transitoria en la que la disponibilidad de agua se sitúa por debajo de los requerimientos estadísticos de un área geográfica dada. Es decir, el agua no es suficiente para abastecer las necesidades de las plantas, animales y humanos.

Los factores humanos van a ser fundamentales en el manejo del recurso, porque los sistemas hidrogeológicos son los mismos en todos lados, pero no así los factores humanos que trabajan para modelarlos o gestionar y administrar el recurso.

En hidrología, la sequía es un fenómeno natural que ocurre cuando la precipitación y la disponibilidad del agua, en un período de tiempo y en una región dada, es menor que el promedio histórico

registrado. Sin embargo, es inevitable, impredecible, progresiva y frecuentemente catastrófica. De hecho, como riesgo geológico ambiental se le identifica como "el riesgo silencioso"; y, por cierto, es diferente a la aridez, que es una condición natural.

## Metodología del sistema hidrogeológico ambiental

Dentro del sistema hidrogeológico ambiental existen dos modelos: el hidrosocial (MHS) y el hidrológico natural. En el primer modelo existe un tránsito que va desde el mercado de precios, demanda de productos y de crecimiento, culminando en la legislación. En este modelo la salida se da dentro de la gestión socio-económica y política (ver Figura 2).

Dentro del modelo hidrológico natural, entanto, coexisten infraestructura,

clima y un modelo climático a largo plazo, con una salida hacia la gestión integrada de los recursos hídricos.

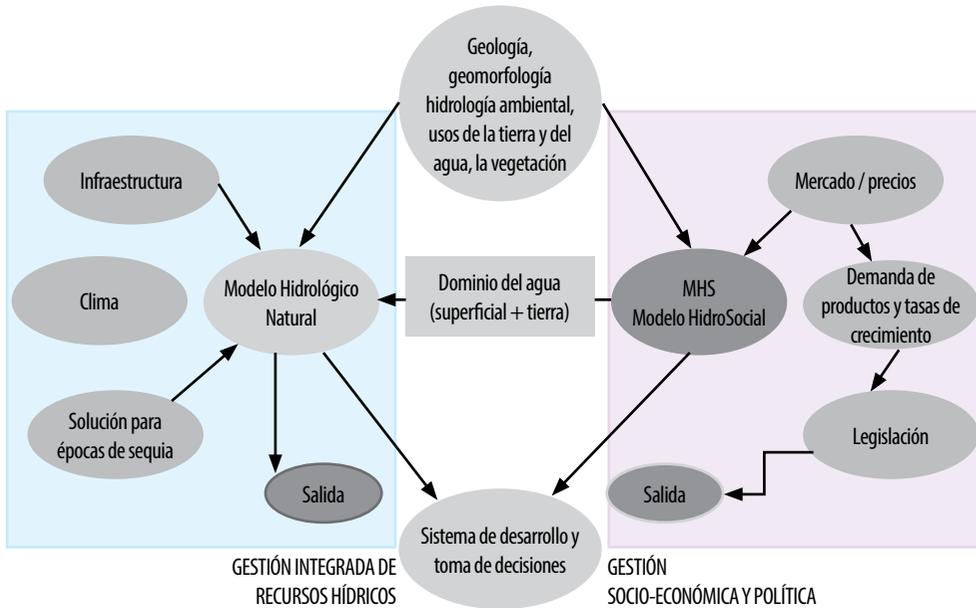
En ambos modelos existe un tronco común del dominio del agua superficial y tierra, los cuales se unen en un sistema de desarrollo y de toma de decisiones.

## Balance de cuenca ante el uso intensivo

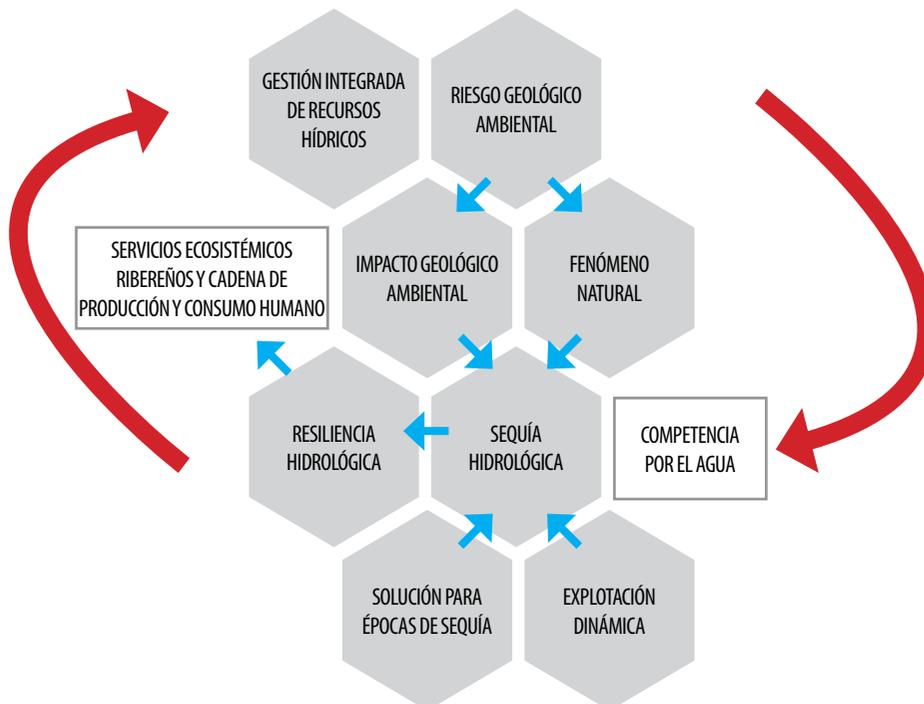
Conocer la disponibilidad de un acuífero conduce hacia la sustentabilidad – entendida esta última como una herramienta útil en el uso intensivo– y permite desarrollar estrategias para el correcto manejo del agua, determinar la sensibilidad intrínseca del acuífero (variables) y aportar en la dirección de esfuerzos, recolección de datos y resolución de conflictos.

La sustentabilidad es el resultado de una combinación de modelos hidrológicos (sociales,

**Figura 1:** Metodología del sistema hidrogeológico ambiental.



**Figura 2:** Explotación dinámica en tiempos de sequía.



económicos y de desarrollo), en el que la solución significa obtener modelos de calidad, enfrentando los problemas de optimización. El uso intensivo en un acuífero minado se contrapone a su posible recuperación. Es decir, el desconocimiento sobre éste puede acarrear incluso equivocaciones en la legislación.

### Corredores ribereños y acuíferos freáticos

El carácter de los corredores ribereños y acuíferos freáticos facilita el uso intensivo.

Los niveles freáticos no son profundos y el agua es accesible, por tanto, a partir de un pozo de poca profundidad rápidamente se puede obtener agua. Estos presentan altos niveles de uso por emergencia y consumo humano, existiendo una clase importante de sistemas socio-ecológicos (SES).

La competencia entre las estructuras inicia con funciones SES, vulnerables a los cambios de la demanda de agua y uso de la tierra. El colapso y la reorganización serán periódicos y recurrentes contra equilibrios múltiples, porque son multisectoriales y multiparamétricos,

requiriendo respuestas de los SES por cruces y escalas.

Una influencia crucial es observar cómo es el contexto transfronterizo inter cuencas e inter políticas.

### Hipótesis del resultado del uso intensivo

- Interacciones del escurrimiento-acuífero: Impacto por descensos de niveles del agua subterránea poco profundas por intercepción de caudales.
- Impacto y/o afectaciones: Cambios en la calidad del agua, naturales y antropogénicos.

**Gestión del agua:** Debe orientarse hacia la conservación de la tierra y no preservar el agua para contrarrestar los efectos.

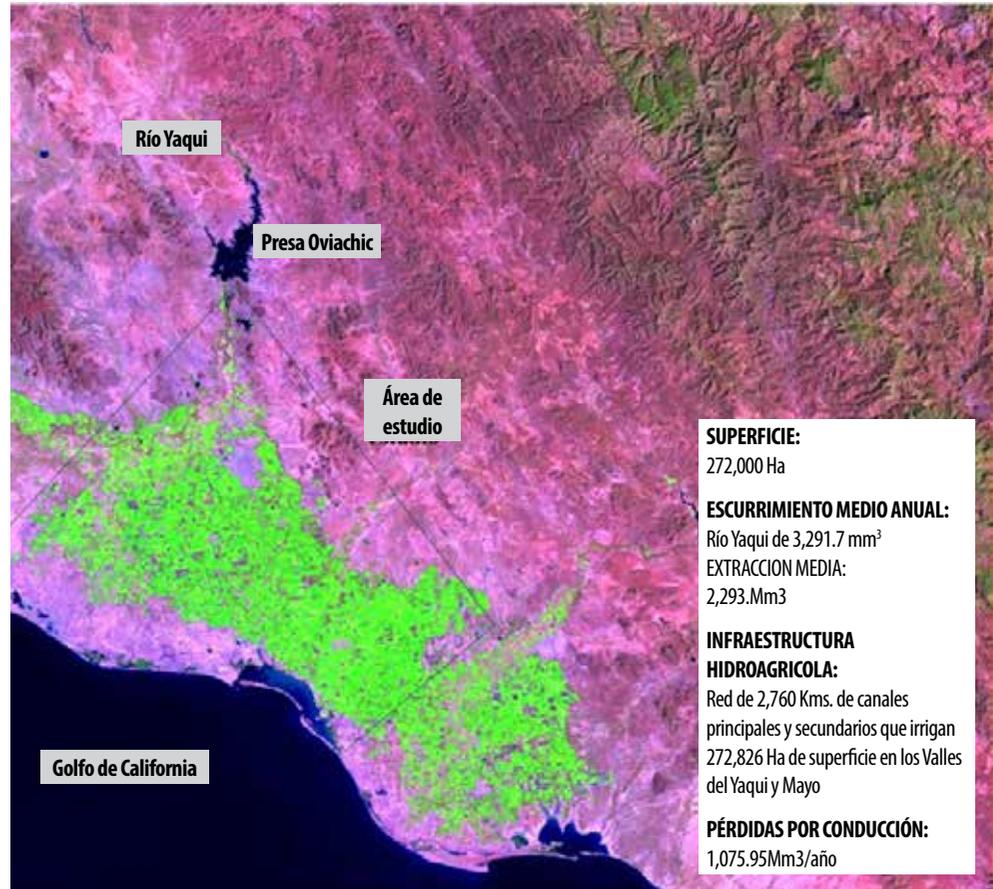
**Instituciones y regulaciones:** Deben identificar las propuestas y cambios sobre la disponibilidad del agua subterránea a través de la legislación.

La disponibilidad, en este caso, será sometida a la competencia del agua con otros usuarios no ribereños. La suma genera presiones al ecosistema por la competencia del agua con otros usuarios no ribereños.

### Principales objetivos y metas

Para evaluar la resiliencia del agua subterránea es necesario utilizar herramientas de estudio científicos bióticos y abióticos; definir cómo responden los sistemas sociales y ecológicos a las diferentes fuentes y magnitudes de cambio en

**Figura 3:** Distrito de riego Valle del Río Yaqui



el tiempo, considerando interacciones entre subsistemas ecohidrológicos.

De resultar con pérdida la resiliencia del agua subterránea, es necesario preguntarse si es posible proveer de nuevas oportunidades a los propietarios de tierras y usuarios del agua.

El movimiento dentro de una cuenca es lo más relevante y si no existe conocimiento respecto de la precipitación y de los elementos del ciclo

hidrológico dentro de la cuenca, así como de los tránsitos de corto, mediano y largo plazo, entonces, puede generarse una pérdida de volumen y de la calidad del agua.

### Sistema del valle del río Yaqui

Ubicada en la región noroeste de México, esta cuenca cuenta con un sistema de presas que escurre de una a otra y termina en un gran valle de 208 kilómetros y con un sistema de riego de 272 mil hectáreas.

Con un promedio de 1.850 m<sup>3</sup>/año de riego, permite percolar 652 hm<sup>3</sup>/año por todo el sistema hidroagrícola, siendo capaz de almacenar 6.800 hm<sup>3</sup>, con una pérdida de 550 hm<sup>3</sup>/año a través de canales de drenaje.

En la Figura 3 se observa el distrito de riego del valle del río Yaqui, que es uno de los más avanzados en el país, con una superficie de 272, 000 hectáreas, con un escurrimiento medio anual de 3,291.7 mm<sup>3</sup> y

una extracción media de 2,293 mm<sup>3</sup>.

En cuanto a su infraestructura hidroagrícola, posee una red de 2,760 kilómetros de canales principales y secundarios, los cuales irrigan 272,826 há de superficie en los valles del Yaqui y Mayo. Sus pérdidas por conducción, en tanto, alcanzan los 1,075.95 mm<sup>3</sup>/año.

En cuanto a la distribución de la disponibilidad de agua superficial, en las cuencas de los ríos Yaqui y Mayo se genera el 89% del total de

los escurrimientos (40 % del territorio regional), mientras que el escurrimiento virgen medio en la región se estima en 5,459 hm<sup>3</sup>/año.

### Aguas subterráneas en el Yaqui

La recarga media alcanza los 2,707.08 hm<sup>3</sup>/año y las extracciones alrededor de 2,784.91 hm<sup>3</sup>/año, según los volúmenes concesionados, lo que significaría un déficit regional de -77.83 hm<sup>3</sup>/año. De los 64 sistemas acuíferos en la región, 15 se encuentran en condiciones

de sobreexplotación, 13 en equilibrio y 36 subexplotados.

Con su manejo se evidencia que la precipitación pluvial en un rango de 60 años presenta cierta ciclicidad y el escurrimiento es muy semejante para el mismo período de tiempo (ver *Recuadro 1*).

Al analizar la sequía a través del método del índice estandarizado de precipitación (SPI), en diciembre de 2012 la cuenca del Yaqui marcaba una serie de altas y bajas con

presencia de sequías en un rango de 60 años. Al realizar una observación a largo plazo puede notarse que la sequía es más prolongada, mientras que al hacerlo en un período más breve, se evidencia una sequía más prolongada (ver *Recuadro 2*).

### Agua subterránea: "La más efectiva respuesta contra la sequía"

La sequía hidrológica, por ser de mayor plazo puede alcanzar y permanecer sin apreciarse por varios años. Básicamente, se caracteriza



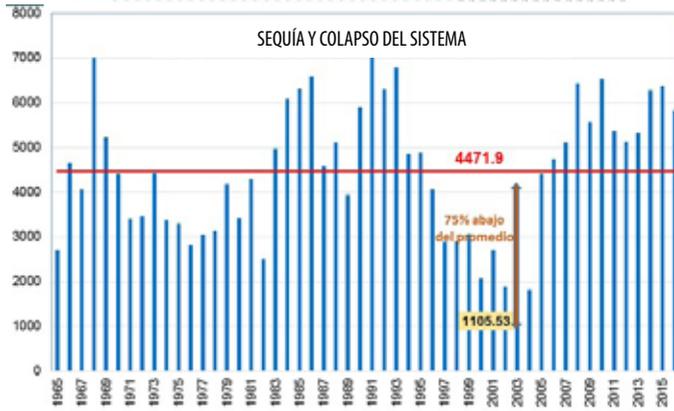
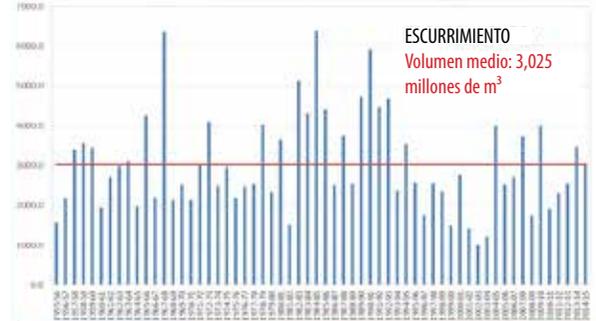
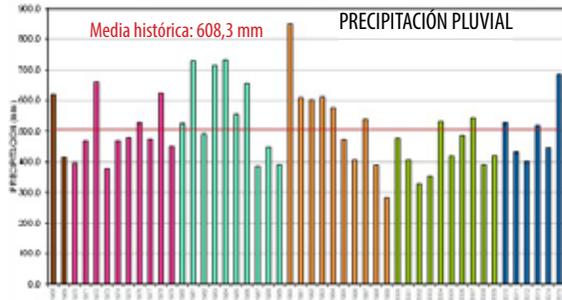
## Ingeniería al servicio del cliente

Desarrollando proyectos innovadores en hidráulica y aguas subterráneas

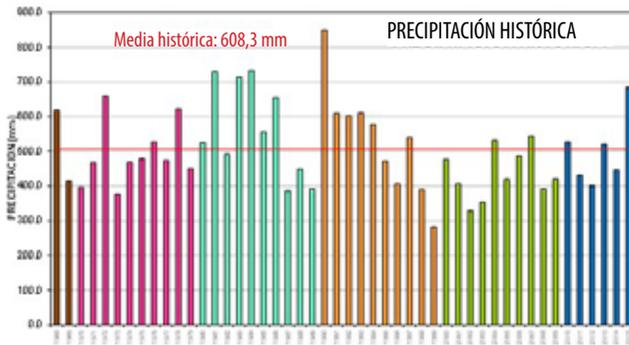
- Manejo y Evacuación de Aguas Subterráneas
- Proyectos de Infiltración y Recarga
- Estudios y Modelación Hidrogeológica
- Proyectos Hidráulicos

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

**Recuadro 1:** Precipitación pluvial, sequía, escurrimiento, sequía y colapso del sistema.



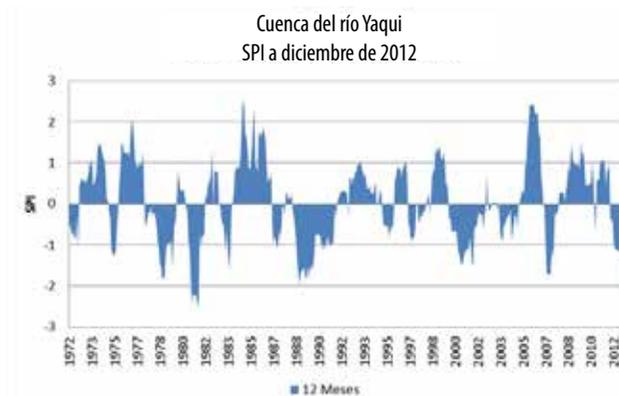
**Recuadro 2:** Precipitación histórica e índice estandarizado de precipitación (SPI) en el río Yaqui.



**INDICE ESTANDARIZADO DE PRECIPITACIÓN (SPI)**

FASE	VALOR DE SPI
Sequía incipiente	-0.50 a -0.79
Sequía moderada	-0.80 a -1.19
Sequía severa	-1.20 a -1.49
Sequía extrema	-1.50 a -1.99
Sequía excepcional	Menor que -2.0

El SPI a 48 meses es un indicador de la sequía hidrológica



por una baja sensible en los escurrimientos de los ríos, y en una reducción de volúmenes en presas y acuíferos.

Inconvenientes de su uso prolongado y progresivo: abatimiento de los niveles, deterioro de la calidad, aumento en costos operativos, y de mantenimiento, mínima recuperación a corto-mediano plazo; y regreso a tiempos de humedad (gestión socio-política).

### Conclusiones

El Sistema Estandarizado de Precipitación (SPI) es de gran utilidad para definir períodos de sequía, variando de incipiente a excepcional. Este último caso, que es el grado máximo de severidad del SPI, se detectó en 1996, 2002 y 2011 y coincidió con el año de menor bombeo ribereño.

El SPI muestra cómo en años previos (1989-1996) el régimen de la cuenca fue capaz de brindar los servicios ecohidrológicos necesarios y la fauna silvestre estuvo en auge, principalmente la que dependía de la ribera, como castores y pato silvestre, así como los anfibios y reptiles.

En esos mismos años México estuvo dentro del período de largo plazo de sequía hidrológica extrema. La sequía de la primera década de los años 2000 es compartida (MEX-USA) y se aprecia ciclicidad en los volúmenes de

escurrimiento dentro de los 50 años de análisis.

Es decir, la sequía es un fenómeno recurrente en la región, pero en México puede recuperarse a corto plazo.

Lo anterior da cuenta de la necesidad de controlar las relaciones de recarga-descarga a nivel cuenca. Wahi y otros (2008) estimaron que el 65%  $\pm$  25% de la recarga se produce en los bordes de las montañas americanas durante el invierno y 35%  $\pm$  25% se produce durante el verano. Y que más del 90% de la precipitación que no escurre, se pierde principalmente como componente de evapotranspiración.

El bombeo en el lado mexicano para 2003 era de 22.35 hm<sup>3</sup> y se dejó crecer apenas en 2016 con 24.3 hm<sup>3</sup>, incremento mínimo en 13 años. Confirmó que la relación de causa directa con la pérdida del flujo base y los servicios ribereños es la ciclicidad climática de largo plazo de la sequía y no el bombeo de flujo regional.

La agricultura de riego por bombeo y próxima al cauce del río en ambos lados, durante esta sequía sometió a tensión hidráulica al sistema ribereño, profundizando y acentuando el descenso de niveles freáticos. No así el sistema regional de flujo, que se sustenta en diferentes tiempos de recarga y largos periodos de tránsito, el cual se mantuvo en equilibrio. ☺

## ASESORÍA ESTRATÉGICA Y ESPECIALIZADA EN RECURSOS HÍDRICOS Y MEDIO AMBIENTE



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

# Manejo de las aguas en los Países Bajos y las soluciones implementadas



Hans Van Duijne\*

Artículo elaborado a partir de la ponencia realizada durante el Seminario 2016 "Explotación dinámica de acuíferos" de Alhsud Chile.

\* Hans Van Duijne es investigador del Instituto Deltares de Holanda. Desde 2008 actúa como gestor de agrupaciones en Norteamérica a través de la "Netherlands Soil Partnership", apoyando la cooperación entre Estados Unidos y Holanda. Paralelamente, trabaja a tiempo parcial en la Universidad de Wageningen (WU) para el desarrollo de proyectos de investigación en los Países Bajos y Europa.

En los Países Bajos se ha vivido una suerte de "lucha contra el agua". Desde cientos de años, Holanda ha vivido en un territorio muy bajo, conteniendo los grandes caudales de los ríos y los permanentes ataques del mar.

Actualmente se utiliza el sistema de diques para contener las aguas, además del drenaje del subsuelo. Esta dinámica ha traído consigo el hundimiento de la tierra y el consecuente ascenso del mar, escenario que se transforma en un gran desafío por atender en los próximos años.

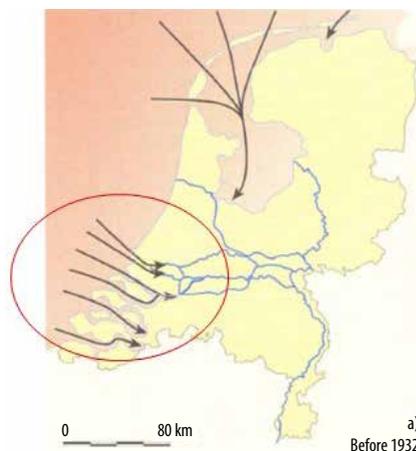
En la zona oeste de Holanda el nivel freático es muy alto en relación a la tierra, estando una buena parte de su territorio bajo el nivel del mar (hasta 6 metros). Por esto, desde aproximadamente 2 mil años se implementaron sistemas de diques y de bombeo del agua desde las áreas bajas hasta las más altas, los que en el pasado funcionaban impulsados por molinos.

En Holanda habitan alrededor de 17 millones de habitantes en una

extensión de poco más de 40 mil km<sup>2</sup>. Así, en reducidos espacios se ha frenado la entrada del mar mediante diques de 30 kilómetros. En la parte sur, en tanto, se han desarrollado obras de infraestructura que pueden ser abiertas o cerradas en la desembocadura del río (Figura 1).

Tales obras cuentan con la infraestructura adecuada para enfrentar un ataque del mar y han sido implementadas como medidas tendientes a fortalecer y elevar los niveles de los diques fluviales, creando áreas de emergencia para almacenar grandes cantidades de agua de los ríos Rin y Mosa (ver Figura 2).

Figura 1: Cierre del antiguo Mar del Sur (Zuiderzee) por medio de un dique de 30 kilómetros (1932); transformación del Mar en un lago IJsselmeer.



The eastern scheldt barrier, compromise between and environmental interests



The first test closure of the storm surge barrier in the Rotterdam waterway. May, 1997.

### El manejo del agua

Ampliando la mirada más allá de la disponibilidad y defensa ante el agua, actualmente los Países Bajos enfrentan tópicos relativos a cómo evitar inundaciones; a la mantención del nivel de agua deseado en los ríos, canales, y sistemas regionales; al almacenamiento de agua

para evitar sequías (Wilnis); y a la salinización de las aguas superficiales (intrusión marina) y de las aguas subterráneas (intrusión marina y agua connata).

Holanda posee una industria agrícola bastante grande, ubicándose entre los primeros cinco países del mundo en esta materia, lo

cual implica que se debe ir en contra de la irrupción del agua salina, pues en cuanto la tierra descende y el nivel del mar aumenta, la importación salina también se incrementa.

Sobre este último punto, le compete al Estado procurar mantener el nivel de agua deseado en los ríos, canales y sistemas regionales; el

almacenamiento de agua para evitar sequías (Wilnis); atender la salinización de las aguas superficiales (intrusión marina) y de las aguas subterráneas (intrusión marina y agua connata); mantener la calidad del agua y reducir la contaminación de la agricultura (nitratos, fosfatos) e industria.

**Figura 2:** Proyecto Delta: grandes obras para proteger la zona sudoeste de los Países Bajos de inundaciones e impactos negativos del agua salada.

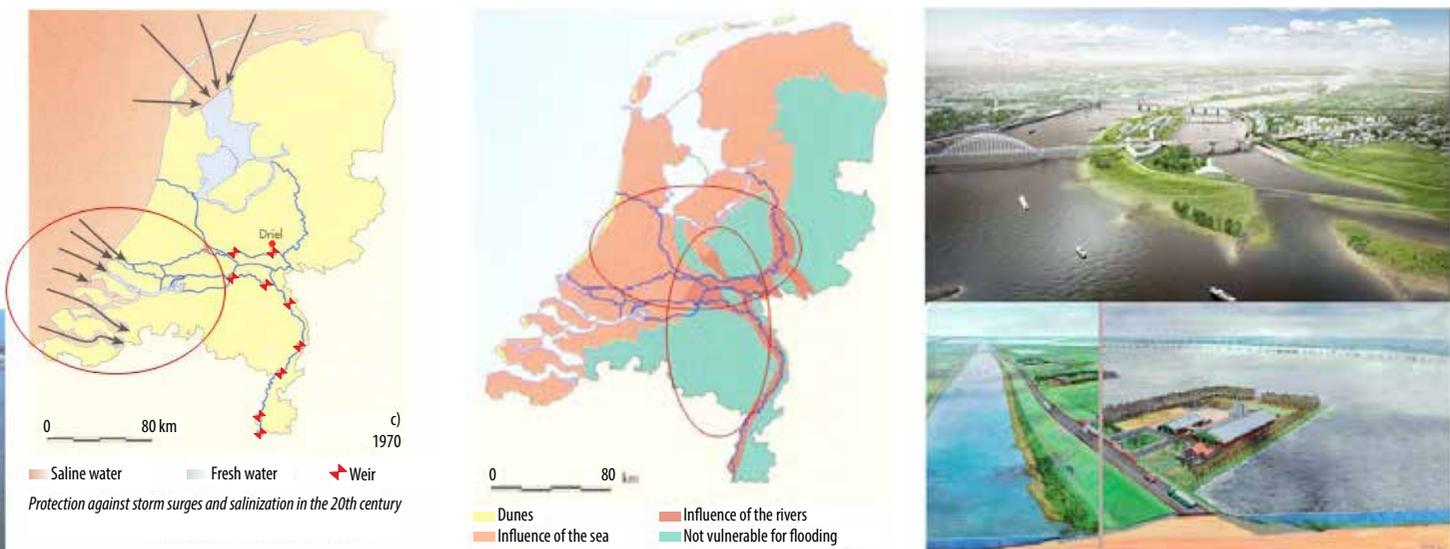
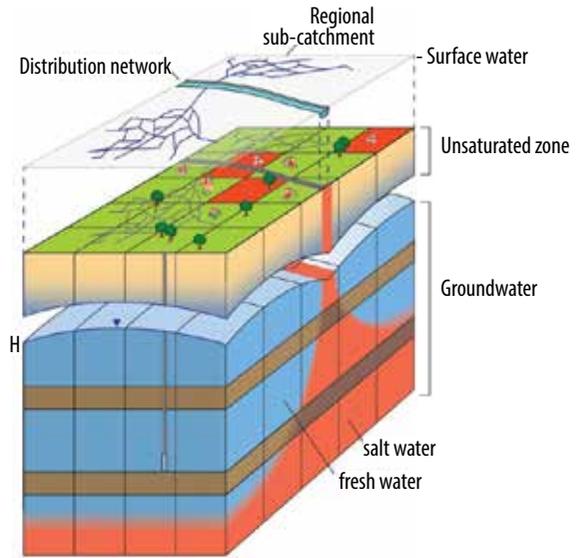
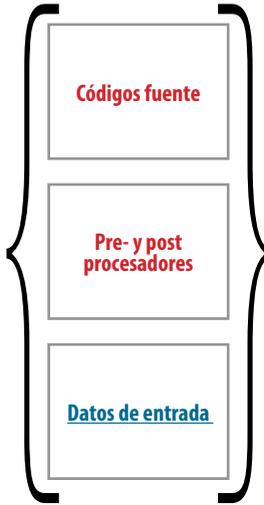


Figura 3: Netherlands (PB) Instrumento Hidrológico (NHI): Caja de herramientas para los modelos regionales y nacionales.

Modelo de agua subterránea (zona saturada y no saturada),

Aplicaciones del modelo nacional



- Visión
- Datos públicos / códigos libres
  - Fácil de reproducir
  - Flexible (adecuados para el propósito)
  - Consistencia nacional-regional

Figura 4: Caja de herramientas para modelos regionales y nacionales.

**FEWS**

*Major features:*

- New displays can be added to the user interface.
- Imports, displays and uses wide variety of data.
- Easily defines new model scenarios.
- New data can always be added.
- Formats output automatically.
- Posts output to a web server.
- Links different models.
- Links any models.
- Free software.

**SOBER**

*Major features:*

- Salt water intrusion & surface water quality.
- 1D network or 2D horizontal grid.
- Powerful hydrodynamic simulation engine.
- Complex flows & water related processes.
- Dispersion coefficient calibrates with field data & model results from DELFT3D
- Also flood forecasting

**iMOD**

*Major features:*

- MODFLOW/MT3D/SEAWAT oriented
- Easy to use graphical user interface.
- Interactive geologic schematisation.
- Supports participative processes.
- Compatible with other models & codes.
- Handles large data volumes.
- Creates and runs scenarios.
- Very fast.

**SUB-CR (subsidence)**

*Major features:*

- Using MODFLOW as core.
- Includes slow subsidence (creep).
- For saturated and unsaturated zone.

**SEAWAT**

*Major features:*

- Groundwater & solute.
- Non-steady state.
- Variable - density.
- Salt water intrusion.
- Core MODFLOW, 3D.

### Ejemplos de responsabilidades del Estado

En lo que respecta a las responsabilidades del Estado en ámbitos tales como regulación de las extracciones para agua potable, extracción de agua a gran escala, uso del recurso para energía geotérmica, extracción de sal, almacenamiento en cavernas de sal (diesel) y almacenamiento en yacimientos de petróleo (gas y CO<sub>2</sub>), se requiere de un profundo conocimiento del subsuelo. Asimismo, ya que el aumento de uso del agua trae consigo un incremento de los actores involucrados, se requiere de una visión y diálogo mucho más amplio.

Por ello, realizar un modelo de subsuelo implica también adquirir conocimiento de los actores pertenecientes a ese sistema, razón por la cual el Gobierno de Holanda ha implementado un instrumento hidrológico-NHI: la caja de herramientas para los modelos regionales y nacionales, denominada Netherlands (PB), cuyo funcionamiento puede observarse en detalle en la Figura 3.

### Caja de herramientas

Dado que cada región o municipio cuenta con sus propios modelos y bancos de datos, no ha existido mayor interacción de los resultados. Por ello, se ha desarrollado un modelo (ver Figura 4) a través del cual se puedan comparar los resultados, existiendo modelos de aguas superficiales y subterráneas.

En la actualidad, el Instituto Deltares de Holanda trabaja con un modelo basado en

Figura 5: Regiones con agua subterránea de salobre a salina a poca y media profundidad.

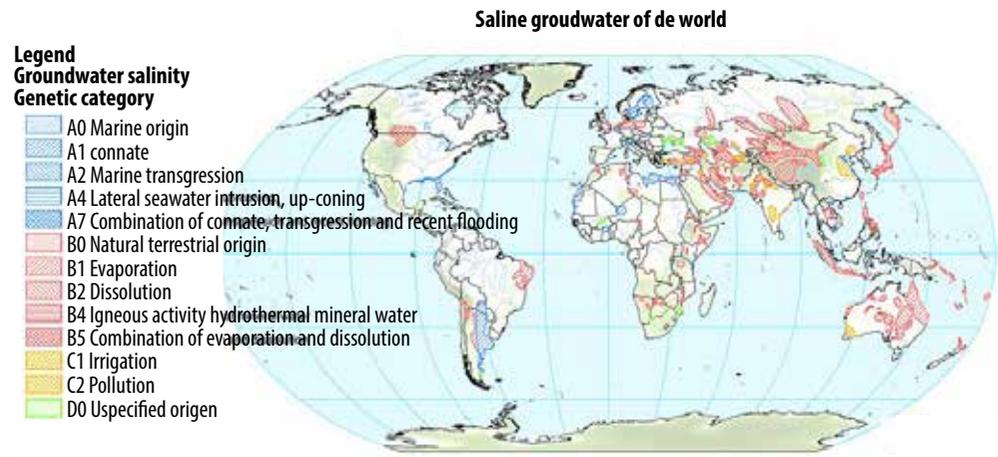
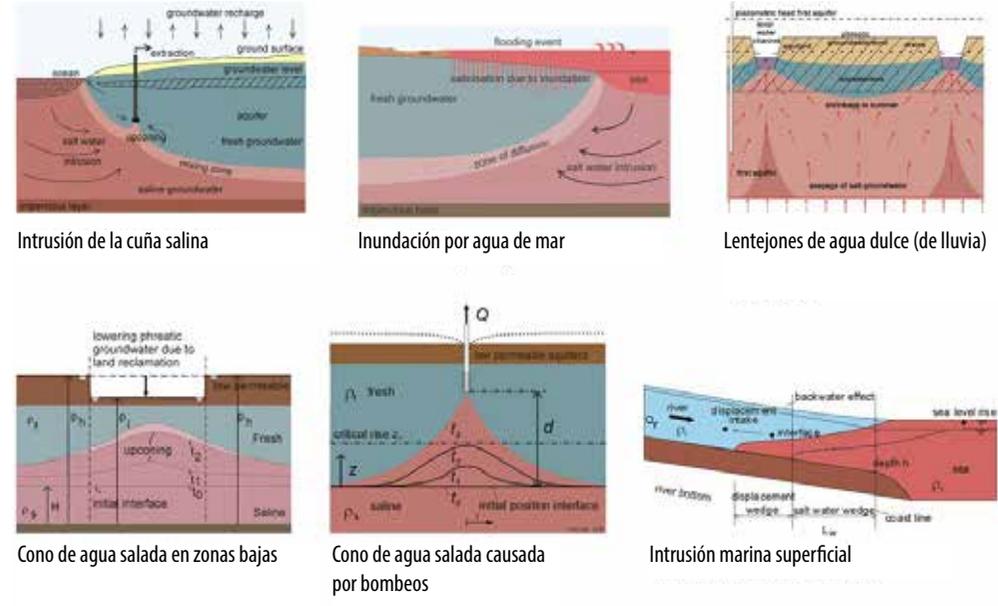


Figura 6: Los diferentes procesos de salinización.



un modelo basado en

un consenso de 2006, el cual combina las zonas saturadas, no saturadas y las aguas superficiales, además, de modelos para la intrusión salina del mar y el modelo de nutrientes.

### La sal y los diferentes procesos de salinización

En las diversas investigaciones realizadas en distintas partes del mundo para la observación de las regiones con agua subterránea de salobre a salina (a poca y media profundidad), el instituto IGRAC elaboró un mapeo sobre la salinidad de las aguas subterráneas en el mundo, cuyos resultados pueden revisarse en *Figura 5*.

Existen además varios tipos de intrusión del agua (ver *Figura 6*), tales como intrusión de la cuña salina, inundación por agua de mar, lentes de agua dulce de lluvia, cono de agua salada en zonas bajas, cono de agua salada causada por bombeos e intrusión marina superficial.

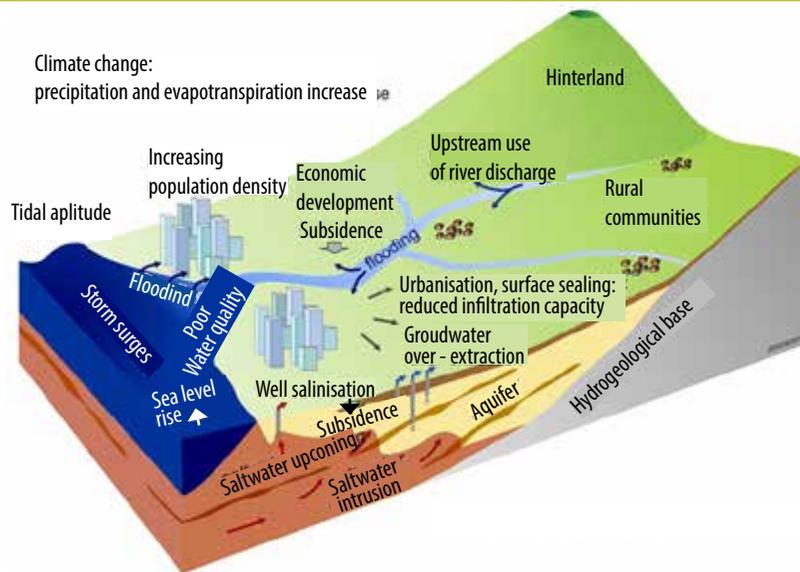
Además de los procesos anteriores, hay áreas con combinación de estos tipos de intrusión, lo que obliga al drenaje, que a su vez trae consigo un aumento de la presión salina del subsuelo.

### El manejo de agua y sus soluciones

Mejorar el suministro de agua dulce no solamente implica estudiar, sino que también obliga a establecer un manejo y modelación permanente junto a la realización de mediciones, con una combinación basada en el entendimiento del funcionamiento del sistema hidrogeológico, que involucre la caracterización y visualización del subsuelo junto a técnicas de monitoreo innovadoras y modelación integral en 3D.

La gestión del agua también requiere del desarrollo de planes de manejo del recurso

#### Recuadro 1: Factores que ponen la vida en los deltas en peligro.



#### Recuadro 2: Modelos 3D de intrusión salina en el agua subterránea.

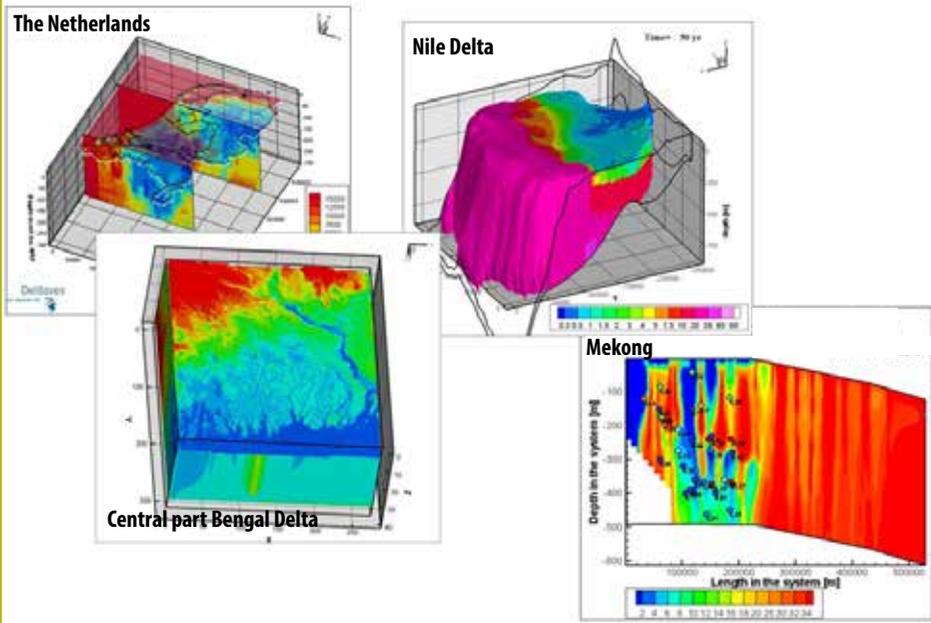
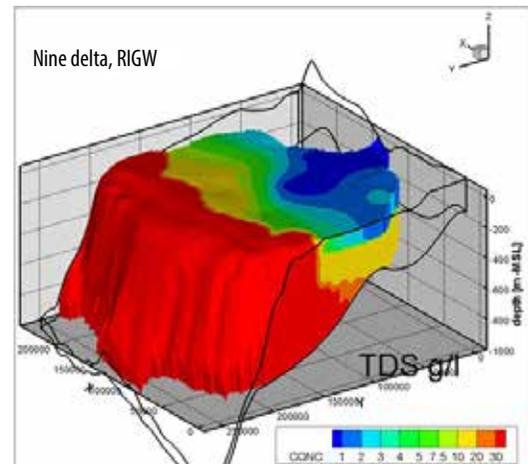


Figura 7: Gestión sostenible de los recursos subterráneos.

#### Egipto

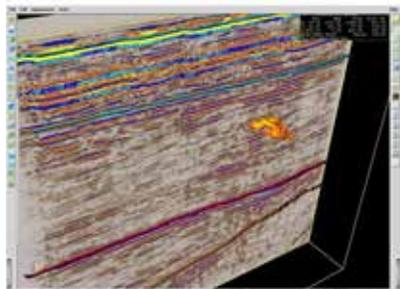
- Modelo en 3D de aguas subterráneas con transporte de agua salada del Delta del Nilo.
- Efectos del cambio climático y de la subida del mar.
- Consecuencias del aumento de las tasas de bombeo.
- Escenarios de gestión sostenible del recurso subterráneo para prevenir la intrusión marina y la sobre-explotación del agua dulce.



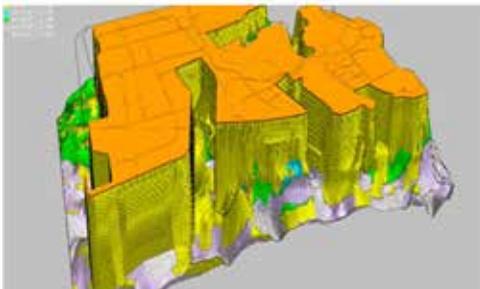
**Recuadro 3: Caracterización y visualización del subsuelo.**

**Geología:**

- Campañas geofísicas con técnicas nuevas.
  - Diseño de la campaña.
  - Técnicas propias.
- Modelación "Solid" en iMOD (3D).



Cubo geológico sísmico en 3D.

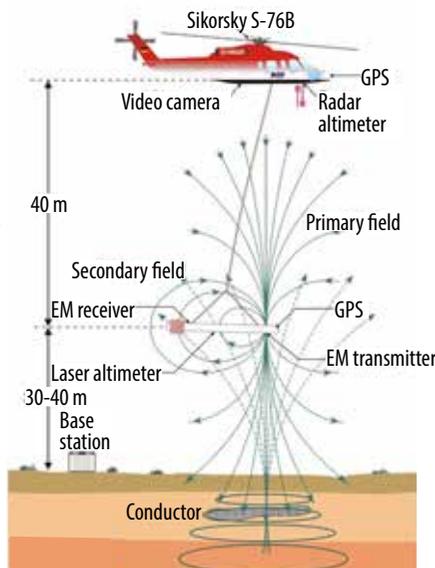


Modelo sólido en 3D de Singapur.

**Geología y agua dulce**

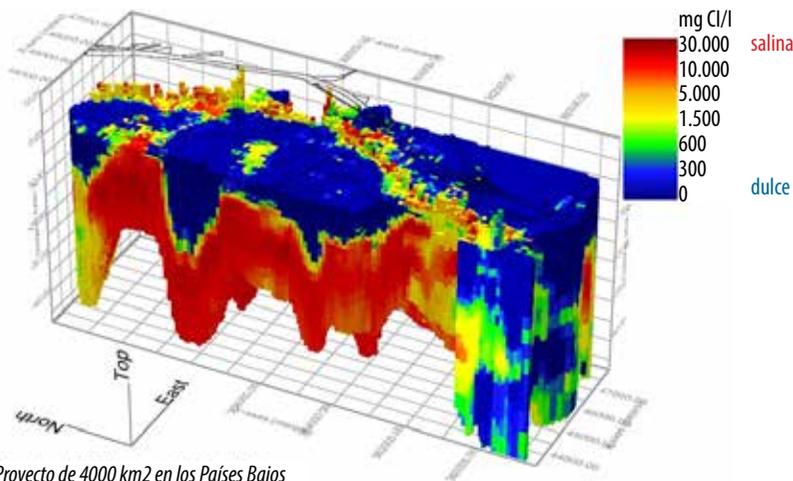
Sistema geofísico aéreo (Helicóptero).

- Mediciones electromagnéticas.
- Campo electromagnético en el suelo con 6 frecuencias distintas.
- El campo electromagnético queda perturbado en el subsuelo.
- El sistema recibe la señal perturbada.
- La señal perturbada es una medida de la resistencia del subsuelo y del agua subterránea.
- Otras opciones: con un dron o a pie.



Resultado del sistema aéreo:

**Distribución en 3D del agua subterránea dulce-salobre y salina**



Proyecto de 4000 km2 en los Países Bajos

subterráneo, políticas de gestión y gobernanza del agua y análisis de escenarios. Finalmente, también debe implicar el diseño de medidas de protección o mitigación (tailor-made), de riesgos y análisis de factibilidad y campañas de campo.

**Experiencias internacionales**

El Instituto Deltares de Holanda también ha aplicado el sistema de fews en Australia (Victoria). Mediante un mapa de amenazas de la salinidad del agua subterránea, que contempla medidas para observar la salinización del agua y los valores de salinidad, tanto autoridades como propietarios de tierras ha podido acceder a este sistema de libre acceso para la gestión del riego.

Igualmente, en Egipto, un modelo en 3D de aguas subterráneas –con transporte de agua salada del Delta del Nilo– ha mostrado los efectos del cambio climático y de la subida del mar, las consecuencias del aumento de las tasas de bombeo y los diversos escenarios de la gestión sostenible del recurso subterráneo para la prevención de la intrusión marina y la sobreexplotación del agua dulce (ver Figura 7).

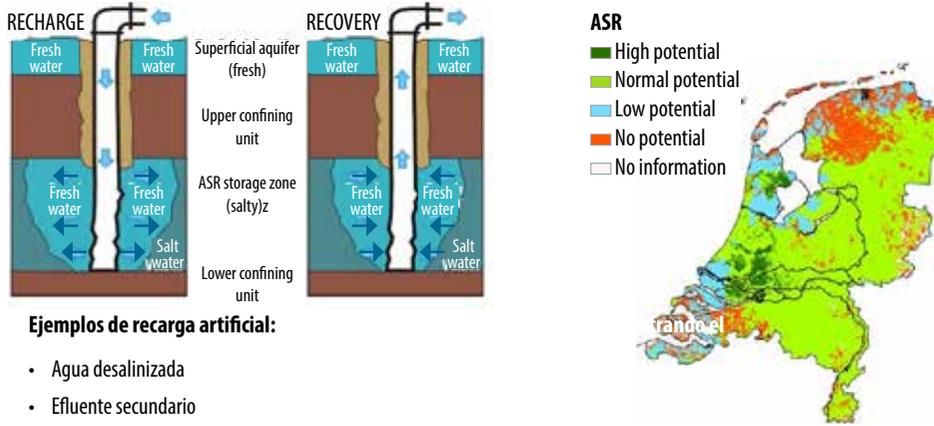
**Recarga artificial de acuíferos**

En cuanto a la recarga de acuíferos, se ha diseñado un plan para observar cuáles son las áreas más aptas para realizar la recarga, existiendo zonas de mayor y menor potencia, las que junto a un ejemplo de recarga artificial (agua desalinizada y efluente secundarios) pueden revisarse en la Figura 8.

**Qué se necesita a futuro**

A través de la gestión de recursos hídricos, actualmente en Holanda se está trabajando en la combinación del conocimiento

**Figura 8:** Recarga artificial de acuíferos.



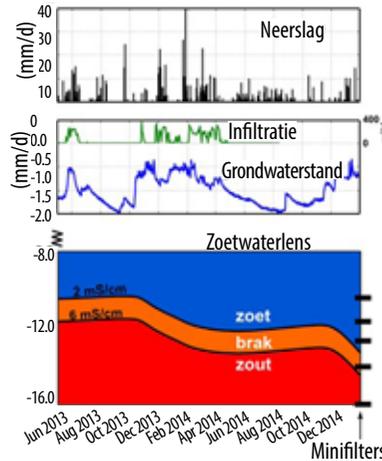
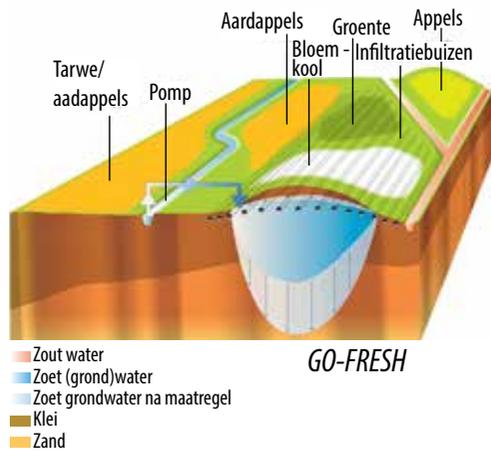
**Ejemplos de recarga artificial:**

- Agua desalinizada
- Efluente secundario

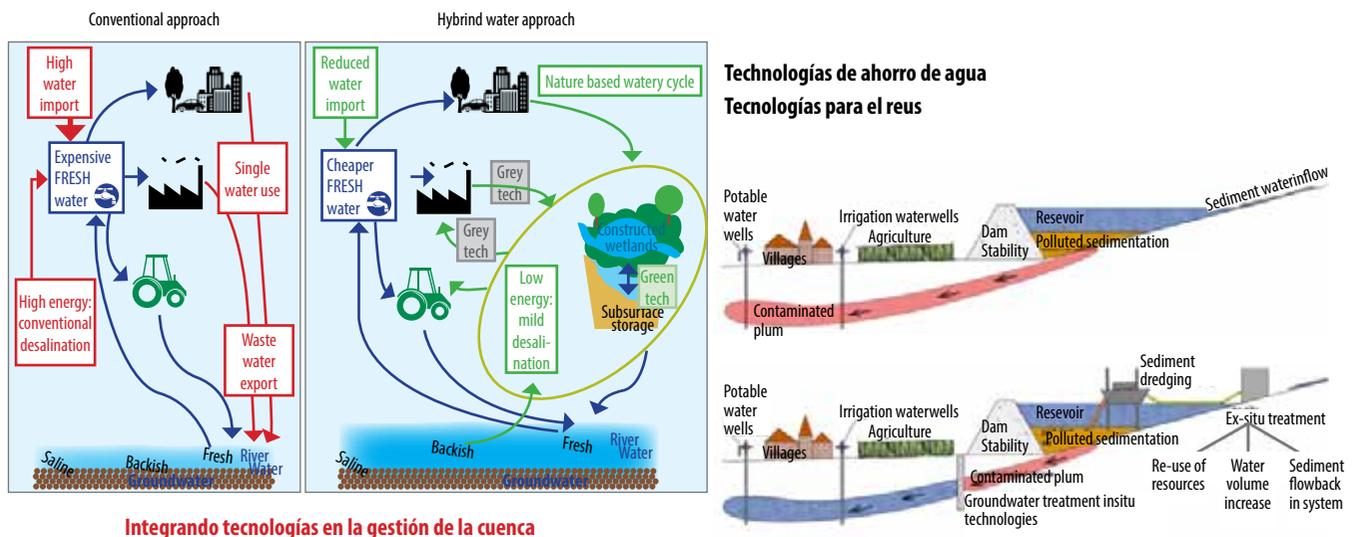
**Recuadro 4: Ensayos de campo en los países bajos.**

**Ensayos de campo en los Países Bajos:**

- Infiltración causada por la subida del nivel freático en antiguos cauces rellenos de arena
- Bombeo con pozos horizontales
- Incremento del lentejón de agua dulce >20% in 1.5 year



**Figura 9:** Estrategias innovadoras y técnicas para reducir el uso de agua y minimizar sus consecuencias.



**Integrando tecnologías en la gestión de la cuenca**

del sistema del agua en conjunto con su manejo y tratamiento tecnológico.

Junto a cuatro universidades e instituciones del mundo privado, el Instituto Deltares de Holanda hoy trabaja en el desarrollo de un proyecto llamado Water Nexus, que es un programa de investigación que busca una solución integral ante la escasez de agua y que tiene como visión: "agua salada dónde sea posible y agua dulce dónde sea necesaria".

Resulta necesaria la implementación de estrategias innovadoras y técnicas para reducir el uso de agua, minimizando sus consecuencias. En cuanto a la utilización de agua dulce (ver Figura 9), sin bien cada usuario, industria o agricultor lo conoce, se necesita trabajar en un sistema integrado que combine el recurso con las aguas tratadas técnicamente, mejorando sus procesos biológicos y químicos, así como las tecnologías de ahorro y reúso, integrando nuevas tecnologías en la gestión de la cuenca.

Finalmente, para garantizar un suministro de agua subterránea sostenible a largo plazo a través de la gestión integrada de recursos hídricos, se debe conectar a escala local, regional, y continental la información sobre la demanda y el suministro de agua, así como las tecnologías y los conceptos más adecuados para su gestión.



**Soluciones eficientes de abastecimiento y monitoreo de recursos hídricos orientado al consumo humano, producción, agrícola, industrial y minero.**

### **UN EQUIPO DE EXPERTOS A SU SERVICIO**

- Pozos profundos y sondajes geotécnicos
- Limpieza, mantenimiento y rehabilitación de pozos
- Inspecciones técnicas y filmación de pozos
- Sistema de bombeo e impulsiones
- Equipos de monitoreo y control
- Operación y mantenimiento de baterías de pozos
- Gestión de abastecimiento de agua
- Estudios de sustentabilidad del recurso hídrico

# Análisis de criterios en la predicción y evaluación de impactos ambientales por uso de aguas subterráneas



Francisco Echeverría\*

Artículo elaborado a partir de la ponencia realizada durante el Seminario 2016 "Explotación dinámica de acuíferos" de Alhsud Chile.

\* Francisco Echeverría es abogado especialista en recursos hídricos y socio en H2O Abogados. Es vicepresidente de Alhsud Chile y lideró la Dirección General de Aguas (DGA) entre 2012 y 2014.

A la hora de analizar cuáles han sido los últimos cambios respecto del análisis y predicción de impactos ambientales por uso de aguas subterráneas – consideradas un recurso en sí mismo –, primeramente se debe precisar que el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (RSEIA) define como impacto ambiental a "una alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada. Y estos impactos ambientales serán significativos cuando generen o presenten alguno de los efectos, características o circunstancias del artículo 11 de la Ley, conforme a lo establecido en el Título II de

este Reglamento".

La evaluación de los impactos asociados a los recursos renovables – contemplada en el artículo 6 del RSEIA –, en tanto, establece que "el titular deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental si su proyecto o actividad genera o presenta efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire".

Y añade a lo anterior que "se entenderá que el proyecto o actividad genera un efecto adverso significativo sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluidos el suelo, agua y aire si, como consecuencia de la extracción de estos recursos; el emplazamiento de sus partes, obras o

acciones; o sus emisiones, efluentes o residuos, se afecta la permanencia del recurso, asociada a su disponibilidad, utilización y aprovechamiento racional futuro; se altera la capacidad de regeneración o renovación del recurso; o bien, se alteran las condiciones que hacen posible la presencia y desarrollo de las especies y ecosistemas. Deberá ponerse especial énfasis en aquellos recursos propios del país que sean escasos, únicos o representativos".

Así, de acuerdo a lo establecido en las letras c y g de dicho artículo, el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (RSEIA) establece que – con el objetivo de evaluar si se presenta la situación a que se refiere el inciso

anterior- se considerará “(c) La magnitud y duración del impacto del proyecto o actividad sobre el suelo, agua o aire en relación con la condición de línea de base...” y (g) “el impacto generado por el volumen o caudal de recursos hídricos a intervenir o explotar, así como el generado por el transvase de una cuenca o subcuenca hidrográfica a otra, incluyendo el generado por ascenso o descenso de los niveles de aguas subterráneas y superficiales”.

Finalmente, citando los números 1, 2, 3, 4 y 5 del artículo 6 (letra g) del reglamento, se ha establecido que “la evaluación de dicho impacto deberá considerar siempre la magnitud de la alteración en:

- g.1. Cuerpos de aguas subterráneas que contienen aguas fósiles;
- g.2. Cuerpos o cursos de aguas en que se generen fluctuaciones de niveles;
- g.3. Vegas y/o bofedales que pudieren ser afectadas por el ascenso o descenso de los niveles de aguas;
- g.4. Áreas o zonas de humedales, estuarios y turberas que pudieren ser afectadas por el ascenso o descenso de los niveles de aguas subterráneas o superficiales; y
- g.5. La superficie o volumen de un glaciar susceptible de modificarse”.

#### **RSEIA (decreto 40 – 2012)**

Como se puede observar de las disposiciones precitadas, en lo relativo a la competencia disponibilidad

de las aguas, la mayoría de los proyectos sujetos a evaluación ambiental (fundamentalmente mineros) que utilicen insumo hídrico continental, deberían reconocer impactos asociados a los literales c) y g) anteriormente indicados.

Aquellas disposiciones, que fueron incorporadas por el DS 40 (octubre de 2012) y que aprueba el RSEIA actualmente vigente, representan un fortalecimiento de las potestades de la Administración en materia ambiental hídrica, en relación al anterior RSEIA (D.S. n° 95/2001 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia).

En consecuencia, el RSEIA (actualmente vigente) agregó, entre otros aspectos, los siguientes conceptos respecto de lo que debe entenderse por impactos

ambientales significativos asociados a los recursos renovables:

- *La afectación a “la permanencia del recurso, asociada a su disponibilidad, utilización y aprovechamiento racional futuro”.*
- *La alteración a “la capacidad de regeneración o renovación del recurso”.* (En el anterior RSEIA sólo se habla de “regeneración” el cual es un concepto mayormente asociado a la diversidad biológica, al contrario de “renovación” que dice relación más directa con la componente hídrica).
- *Que se considera taxativamente la “La magnitud y duración del impacto del proyecto o actividad sobre el suelo, agua o aire en relación con la condición de*

línea de base”, lo cual de alguna medida se asocia, sin decirlo expresamente, al tiempo de explotación de un proyecto minero, por ejemplo.

Como consecuencia de lo anterior, se puede observar una posición jurídica distinta de la Administración al evaluar ambientalmente un proyecto dependiendo si lo efectúa bajo el antiguo o el nuevo RSEIA.

Producto de lo anterior, si se pretendía evaluar bajo el imperio del antiguo reglamento el componente disponibilidad hídrica, desligada de los sistemas vegetacionales azonales hídricos asociados al acuífero que constituía la fuente de abastecimiento del recurso, la Administración incurría en un acto ilegal.

En consecuencia, con la dictación del DS 40 se ha fortalecido en alguna medida a la Autoridad para consultar directamente sobre el impacto en disponibilidad y solo en cuanto a la disponibilidad del recurso, lo que en la actualidad ha generado una presión especialmente en el sector minero para que abandone las aguas continentales como insumo hídrico y compense o capte directamente el recurso desde el mar.

### Minuta DCPRH N° 14/2015

En lo medular, este documento instruye sobre los criterios a considerar en el Sistema de Evaluación

“Una vez hecha la calificación de los impactos, si ellos resultan significativos, coherentemente se requiere de la definición de medidas de mitigación, compensación o reparación, que se hagan cargo de dichos efectos adversos significativos.”

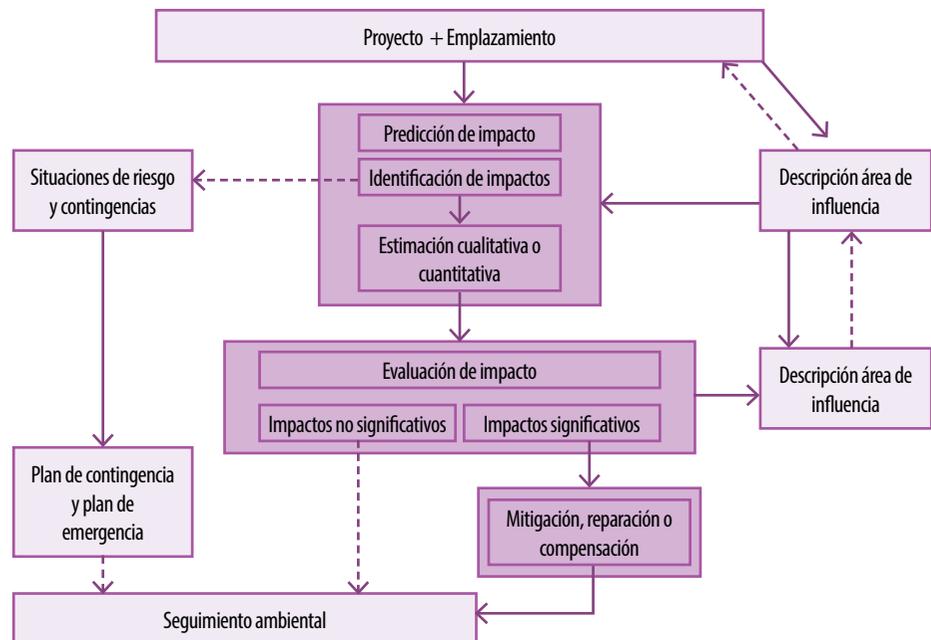
de Impacto Ambiental (SEIA) respecto de la evaluación ambiental del ejercicio de derechos de aprovechamiento de aguas.

Dichas directrices hacen referencia estrictamente a la ocurrencia de efectos adversos significativos sobre el recurso natural renovable agua, según lo dispuesto en la letra b) del artículo 11 de la Ley N° 19.300 y en el artículo 6 del Reglamento del SEIA.

### Competencias ambientales de la DGA en materias SEIA

En su artículo 24 el RSEIA indica que los Órganos de la Administración del Estado con Competencia Ambiental (OAECA) son aquellos que cuentan con atribuciones

Recuadro 1: Alcances y criterios generales de la minuta en el marco del SEIA.



en materia de los PAS respecto del proyecto o actividad en particular, y en la protección del medio natural, la preservación de la naturaleza, o el uso y manejo de algún recurso natural.

Así entonces, –en el contexto del SEIA– la DGA debe pronunciarse en materia de los PAS de su competencia y también debe opinar sobre proyectos o actividades que hagan uso o intervengan, en cualquier forma, de los cauces y de las aguas de su jurisdicción, siendo éstas las aguas terrestres, superficiales o subterráneas existentes en fuentes naturales y en obras de desarrollo del recurso hídrico.

Son competencias ambientales de la DGA las siguientes actividades:

- Protección y conservación de las aguas superficiales.
- Protección y conservación de los álveos de aguas corrientes y detenidas.
- Protección y conservación de las aguas subterráneas.
- Protección y conservación de los acuíferos que alimentan vegas y los llamados bofedales.
- Protección y conservación de las aguas minerales y fuentes curativas.
- Protección y conservación de glaciares.

### Minuta DCPRH N° 14/2015

“La sola constitución de un derecho de aguas no exime al titular de evaluar todos los posibles efectos del proyecto o actividad sobre el medio ambiente. En efecto, como parte de sus funciones de carácter sectorial, el Servicio hace un análisis de disponibilidad hídrica con el fin de otorgar los derechos de aprovechamiento, sin que ello considere todas las características de algún proyecto determinado, ni la línea de base de las componentes ambientales del ecosistema impactado, ni la evaluación de impactos,

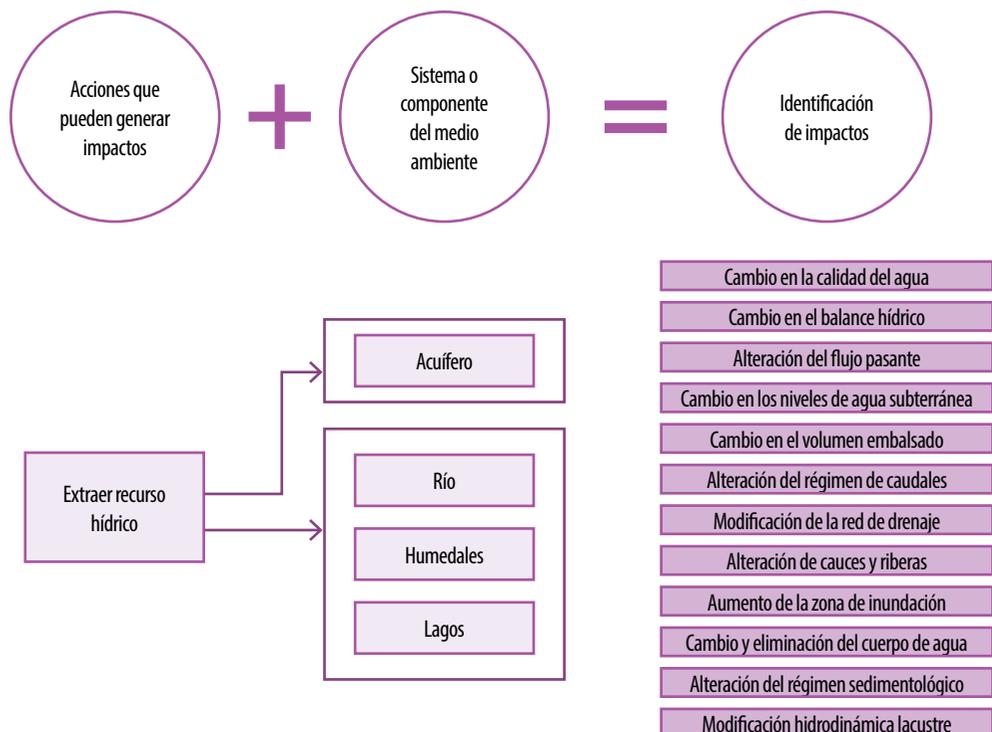
que son las temáticas a evaluar en el marco del SEIA”.

“Además, la constitución de un derecho de aguas, en algunos casos, puede haberse concretado al margene incluso, en contrario a las recomendaciones técnicas de la DGA. A mayor abundamiento, las Resoluciones de derechos de aprovechamiento de aguas incluyen explícitamente un apartado en el que se señala que “el ejercicio del derecho de aprovechamiento de agua que se constituye en el presente acto, deberá dar cumplimiento en lo que corresponda, a las disposiciones de la Ley

No19.300, de Bases del Medio Ambiente”. Lo anterior debe entenderse como una manera de recordar que se deberá cumplir ineludiblemente la normativa ambiental aplicable para un proyecto o actividad que ingrese al SEIA y que haga uso del derecho constituido sectorialmente por el Servicio”.

“Si un proyecto pretende hacer uso de derechos de aguas que ya se encuentran en ejercicio, no hay diferencias entre ambas situaciones, y consecuentemente, no hay impactos que evaluar ambientalmente. Por otra parte, si los derechos a utilizar

**Recuadro 2: Listado de potenciales impactos ambientales, derivados del ejercicio de un DA, y contemplados en la Minuta DCPRH N° 14/2015:**



no están siendo ejercidos y sólo se encuentran constituidos, entonces se deben evaluar los potenciales efectos adversos que ese nuevo ejercicio es susceptible de generar”.

### Calificación de los impactos

Una vez hecha la calificación de los impactos, si ellos resultan significativos, coherentemente se requiere de la definición de medidas de mitigación, compensación o reparación que se hagan cargo de dichos efectos adversos significativos.

Por último, la letra f) del artículo 12 de la Ley

*Los objetos de protección, vinculados con la existencia de sistemas de aguas subterráneas, corresponden al estado del propio acuífero, siendo el conocimiento de las aguas subterráneas la temática central a estudiar juiciosamente.*

Nº 19.300 precisa que, respecto de las variables ambientales relevantes que dan origen al EIA, se debe establecer un plan de seguimiento, el que tiene por finalidad asegurar que dichas variables evolucionan según lo proyectado (ejemplo: Planes de Alerta Temprana -PAT).

### Criterios específicos para aguas subterráneas

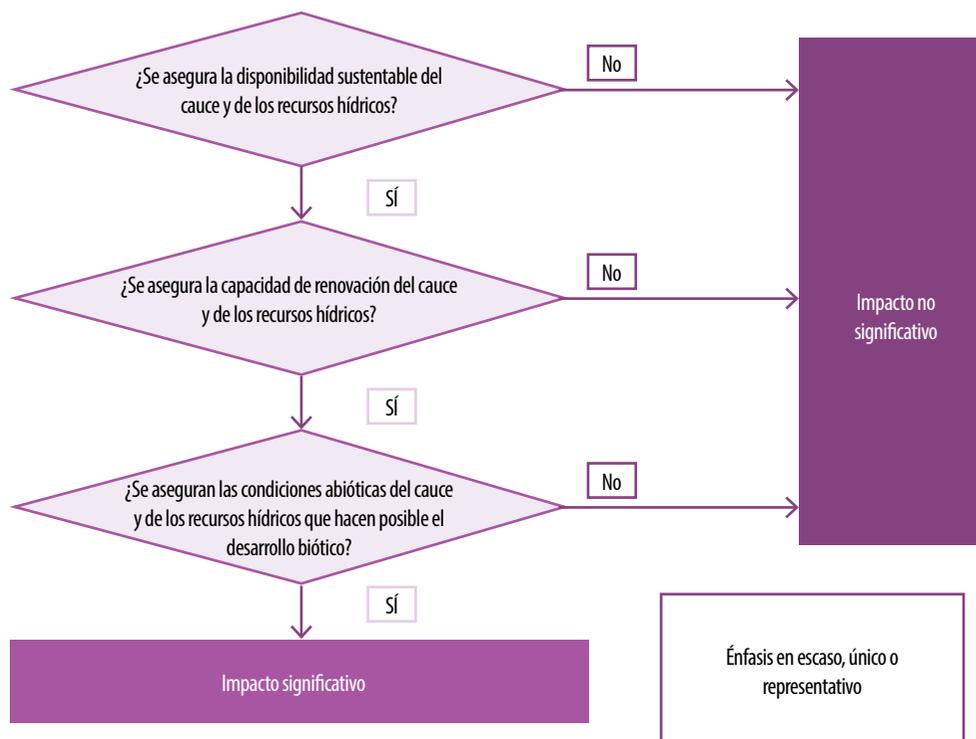
“En el caso del uso de recursos hídricos subterráneos es fundamental establecer las condiciones que permitan resguardar los objetos de protección o elementos del medio ambiente susceptibles de recibir impactos.

Los objetos de protección, vinculados con la existencia de sistemas de aguas subterráneas, corresponden al estado del propio acuífero, y a sistemas de vegas, bofedales y lagunas, entre otros, siendo el conocimiento de las aguas subterráneas, tanto en cantidad como en calidad, la temática central a estudiar juiciosamente. Lo anterior está ampliamente documentado en el SEIA para numerosos ejemplos de proyectos mineros en el norte del país”.

### Planes de Alerta Temprana (PAT)

“En los últimos años, como forma de cautelar cualquier efecto adverso significativo y de adoptar una estrategia para reducir la incertidumbre inherente en

**Recuadro 3: ¿Cuándo un impacto es o no significativo sobre el recurso hídrico?**



toda evaluación ambiental, la institucionalidad ambiental ha aceptado el uso de herramientas de gestión de carácter preventivo, denominadas Planes de Alerta Temprana (PAT), con el objeto de evaluar anticipadamente la situación de los sistemas ambientales a proteger”.

“Mediante el empleo de modelos hidrogeológicos, se proyecta en el tiempo el comportamiento de la variable “nivel de aguas subterráneas”, con la finalidad de relacionar la depresión de la superficie freática y el estado del objeto de resguardo”.

### Definición umbrales de seguimiento PAT

El proceso de elaboración de un PAT deriva en la definición de umbrales de seguimiento a monitorear continuamente durante la operación del proyecto, valores que de ser sobrepasados gatillan medidas o acciones correctivas pertinentes.

A este respecto, la Guía del SEA para el Uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA (SEA, 2012) sostiene que un PAT incluye obras y acciones asociadas al Plan de Seguimiento de las Variables Ambientales, las que están orientadas a proteger oportunamente a un receptor ambiental y a evitar que se produzcan impactos ambientales mayores a los definidos durante el proceso de evaluación.

### El agua por el agua

Busca que cierta cantidad de derechos de aprovechamiento de aguas constituidos se inmovilicen y no puedan ser utilizados en actividad productiva alguna, de manera tal que, con cargo a esa falta de ejercicio se logre compensar de alguna manera el impacto significativo generado sobre la componente cantidad o disponibilidad del recurso hídrico en sí mismo.

Desde un punto de vista jurídico, la exigencia de esta figura por parte de la Autoridad es del todo cuestionable, toda vez que no se encuentra consagrada en disposición legal o normativa alguna.

Asimismo, atendería contra una serie de garantías constitucionales y disposiciones expresas de la legislación civil (libre circulación de los bienes y el libre emprendimiento).

Es por esta razón que no es posible encontrar Oficio alguno en que la Autoridad exija expresamente la renuncia o inmovilización de derechos de aprovechamiento de aguas, sino que más bien, han sido los propios titulares, quienes frente a la ausencia de alguna medida que se haya considerado suficiente, han optado por renunciaciones a derechos de aprovechamiento constituidos o han comprometido su no ejercicio. 🌍

## OFRECIENDO SOLUCIONES INTEGRALES Y SOSTENIBLES



Diseño integral y sostenible del borde costero de Nueva York

Más de 300 oficinas en 70 países para entregar soluciones sostenibles en el tiempo: **en Chile más de 3.000 proyectos y estudios realizados durante sus 35 años.**

Con más de 125 años en el mercado, es reconocido mundialmente como **líder en Diseño y Consultoría** en proyectos de inversión.

**#2** Sector de Aguas

**#3** Empresa Internacional de Diseño

\*Ránking ENR



Confirmación exitosa de la gestión dinámica de aguas subterráneas:

# Explotación del acuífero del Aconcagua en períodos de sequía



Pablo Rengifo Oyarce\*

Ponencia realizada durante el Seminario 2016 "Explotación dinámica de acuíferos" de Alhsud Chile.

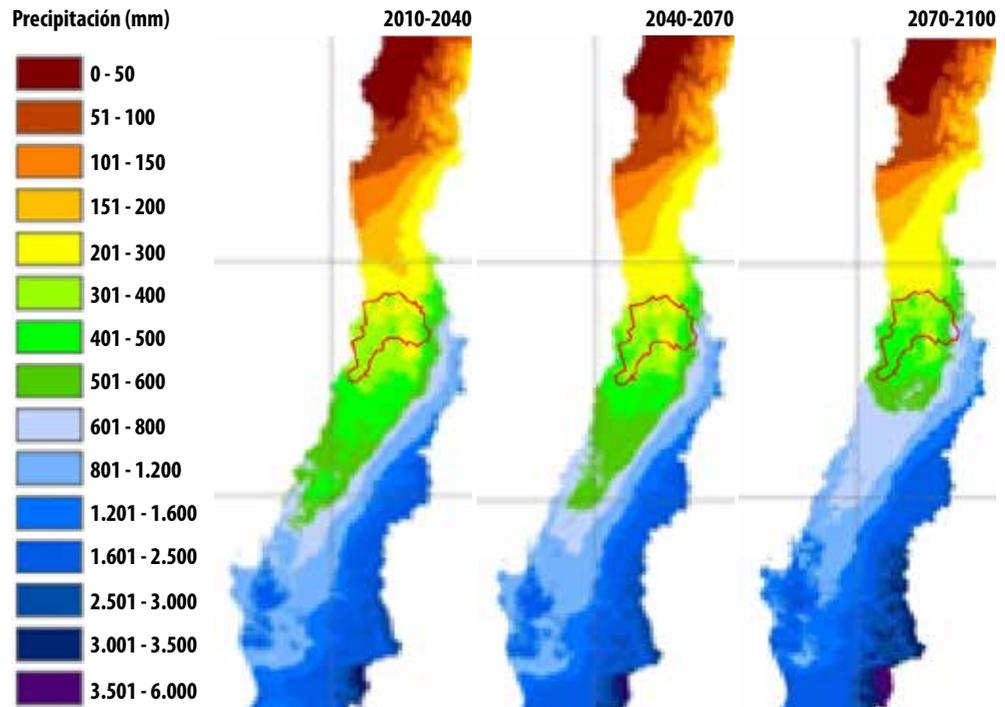
\*Pablo Rengifo es ingeniero civil, magíster en Ciencias de la Ingeniería por la PUC y cuenta más de 20 años de experiencia profesional en consultoría. Lidera la gerencia de Negocio, Medio Ambiente y Recursos Hídricos de Arcadis y es presidente del Capítulo Chileno de la Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo (Alhsud).

La visión general del cambio climático ha sido analizada en diversos seminarios y publicaciones, tanto nacionales como internacionales. Y existe un consenso, entre los distintos escenarios evaluados, de que en nuestro país se experimentarán aumentos de las temperaturas, disminución de las precipitaciones y un incremento de los eventos extremos. En el caso particular de la temperatura, se estima que de aquí a la década de 2040 se registrará un aumento de 0,5 a 1 grado; que entre 2040 y 2070 el ascenso de temperatura oscile entre 2 y 2,5 grados; mientras que para fines de siglo,

alcanzaría los 4 grados.

Las precipitaciones, en tanto, tal como se observa en la *Figura 1*, disminuirían en la zona central, cuyos valores actuales registran entre 500 y 600 milímetros, mientras que la proyección para el período 2040 -2070 establece un descenso entre los 300 y 400 milímetros. Asimismo, se evidenciará un cambio en la cantidad y oportunidad de

Figura 1: Proyecciones de variación de precipitación.



Fuente: Santibáñez, Fernando (2013). "Los desafíos de la agricultura frente al clima del siglo XXI". Universidad de Chile. IV Encuentro Nacional de GTT, Pucón.

los caudales con una menor acumulación de nieve por el alza de la línea de nieves en el Chile Central, la que está ascendiendo y durante este siglo, debería remontar alrededor de 300 metros (ver *Figura 2*).

Lo anterior se traduce en que se dispondrá de menos agua en una serie de valles de la zona central del país. A modo de ejemplo, en el

río Maule se espera una disminución de un 35% a un 40 % de caudal medio anual, pasando de un promedio de 260 m<sup>3</sup>/s a 160 m<sup>3</sup>/s, de acuerdo los estudios realizados por Fernando Santibáñez (2013), tal como se aprecia en la *Figura 3*.

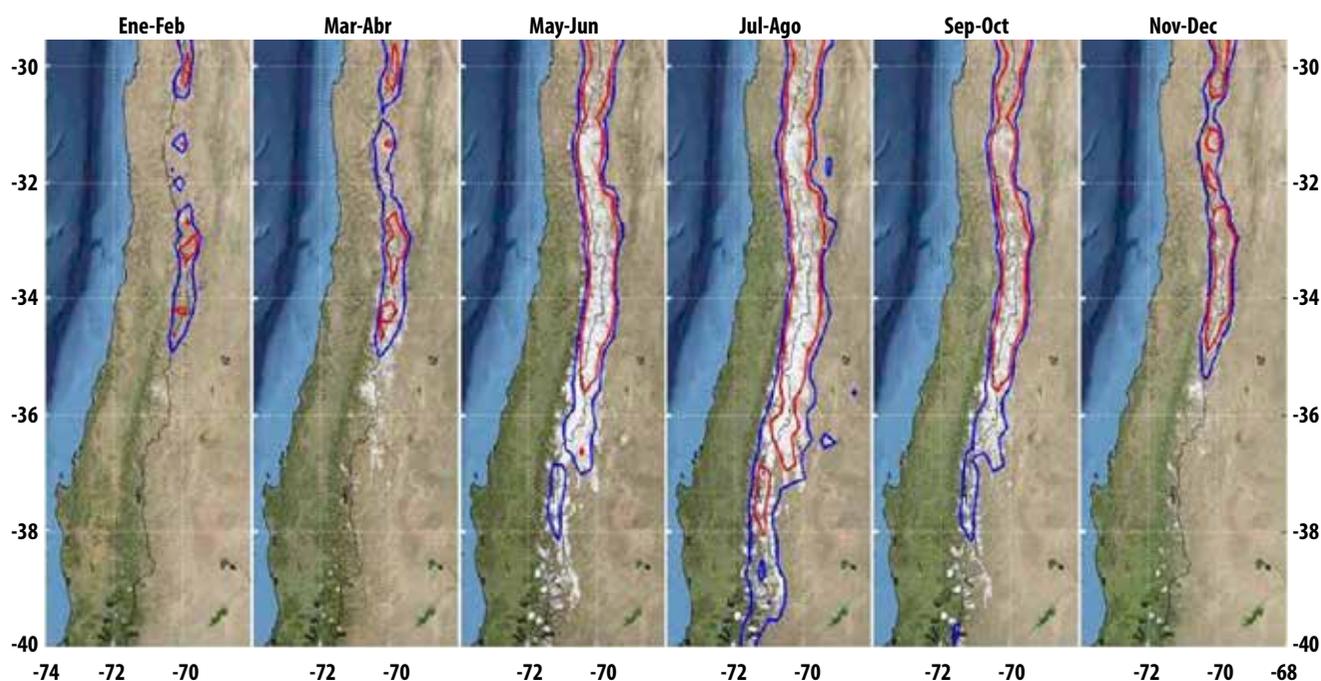
#### Aconcagua y su contexto

El valle del Aconcagua representa uno de los

principales valles productivos del país, con cultivos de alta rentabilidad y una clara vocación exportadora, principalmente de frutales y paltas. El eje agrícola de la zona es el río Aconcagua, que riega las provincias de Los Andes, San Felipe y Quillota. Dicho valle representa uno de los sectores de Chile que más ha tecnificado su riego,

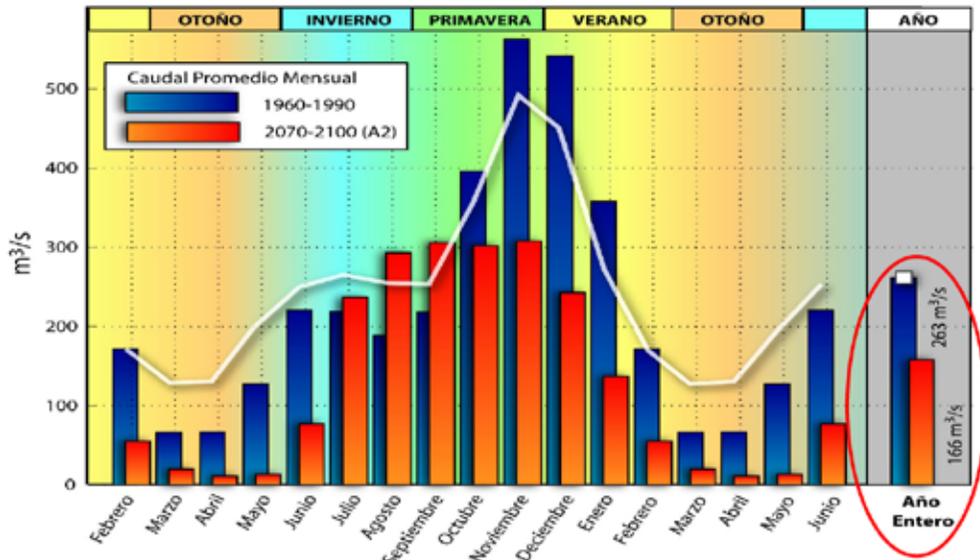
profesionalizando en forma muy avanzada el uso eficiente del agua. Sin embargo, aun existiendo esta tecnificación, la seguridad o disponibilidad hídrica es variable, por lo que una sequía severa genera cuantiosas pérdidas. En este contexto, los fenómenos de sequía que se han intensificado en el tiempo y que a futuro se

**Figura 2:** Cambio en cantidad y oportunidad de los caudales (menor acumulación de nieve por alza en línea de nieve en Chile central).



Fuente: Santibáñez, Fernando (2013). "Los desafíos de la agricultura frente al clima del siglo XXI". Universidad de Chile. XIV Encuentro Nacional de GTT, Pucón.

Figura 3: Caudal simulado en río Maule.

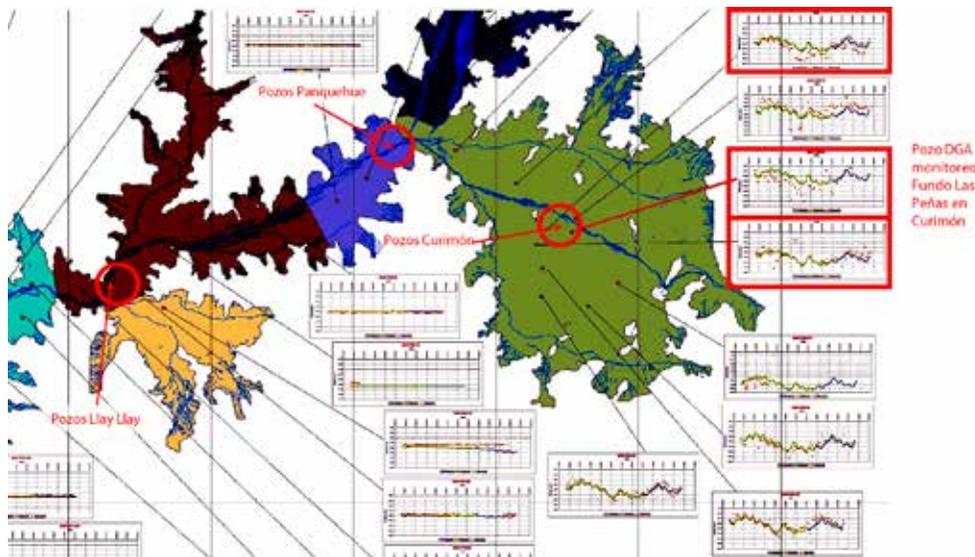


Fuente: Santibáñez, Fernando (2013). "Los desafíos de la agricultura frente al clima del siglo XXI". Universidad de Chile. XIV Encuentro Nacional de GTT, Pucón.

Figura 4: Secciones de riego del valle del Aconcagua.

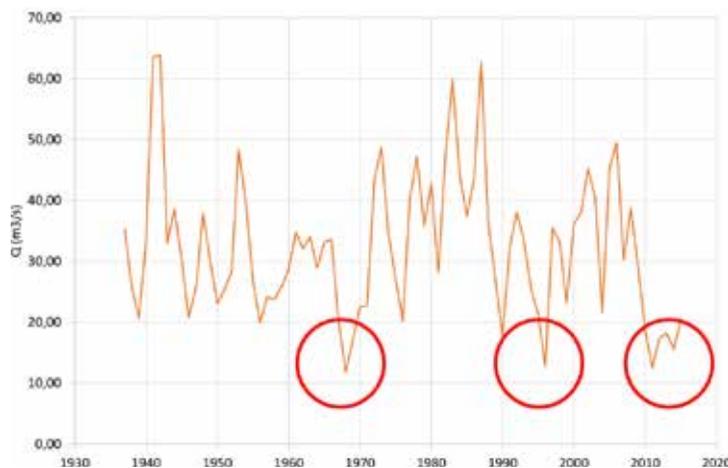


**Figura 7:** Comportamiento histórico de los acuíferos del Aconcagua.

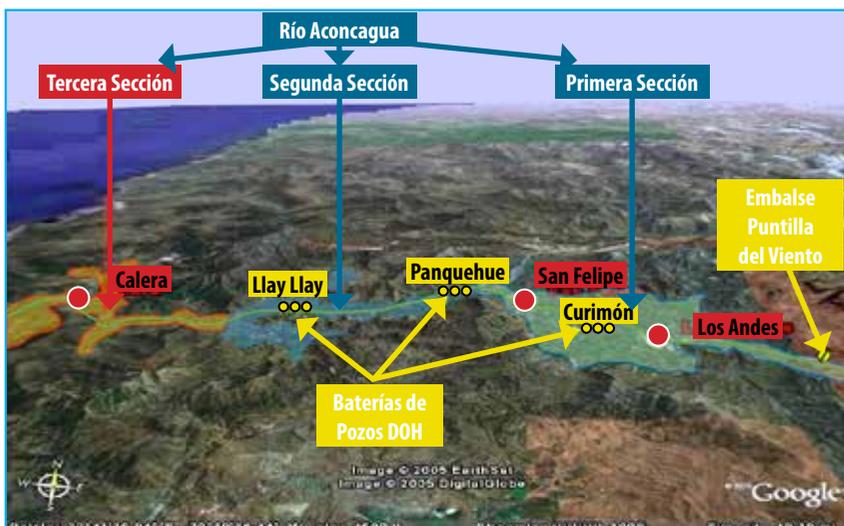


Fuente: Celedón, Eugenio (2013). "Seminario ALHSUD Chile: El Valor del Agua". Santiago.

**Figura 5:** Caudal río Aconcagua en Chacabuquito.



**Figura 6:** Batería de pozos colectivos en valle del Aconcagua.



Fuente: Celedón, Eugenio (2013). "Seminario ALHSUD Chile: El Valor del Agua". Santiago.

prevé un panorama similar, presentan un importante desafío para poder mantener la producción agrícola en el valle.

Durante un año normal, en el río Aconcagua se descargan alrededor de 1.000 millones de metros cúbicos al mar, lo que da cuenta de la incapacidad de manejo eficiente del agua, lo cual se suma a la realidad de la región de Valparaíso, donde no existen grandes obras de regulación de los recursos para riego, salvo el I embalse Chacarrillas (27 Hm<sup>3</sup>), ubicado en el valle de Putaendo.

A grandes rasgos, el valle del Aconcagua dispone de cuatro secciones de riego de cordillera a mar, ubicadas entre las zonas de San Felipe, Los Andes, Llay Llay, Catemu, Calera y Quillota. Tal como se visualiza en la Figura 4, las principales zonas de riego corresponden a las secciones uno y tres del río.

### Superficie de riego y tamaño de predios

En términos globales, en el valle del Aconcagua se riegan alrededor de 63 mil 500 hectáreas con aguas superficiales y subterráneas. De éstas, sólo 41 mil hectáreas poseen una seguridad de riego del 85%, mientras que las 22 mil hectáreas restantes, la seguridad de riego fluctúa entre un 50% y 60% (ver Recuadro 1). En tanto, el área cultivada bajo

**Recuadro 1:** Superficie de riego y tamaño de predios por sección; demanda actual y futura; y usos del agua en el valle del Aconcagua.

Sección	Total por Sección				Total Área de Estudio
	I	II	III	IV	
Total Cultivada	22.858,1	14.561,5	25.405,3	633,6	63.458,5
Bajo cota	20.615,8	13.490,4	22.407,9	633,6	57.147,7
Sobre cota	2.242,3	1.071,1	2.997,4	0,0	6.310,8

Fuente: Estudio del Negocio y Actualización de Costos - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA. – DOH V Región - MOP

cota es mayoritaria y se ubica principalmente entre la primera, segunda y tercera sección del río, siendo las secciones primera y tercera las que abarcan una mayor área, de casi un 80% del total.

Desde la perspectiva de las proyecciones, los estudios dan cuenta de que en el período 2000-2030 se pasará del orden de las 67 mil a las 105 mil hectáreas (80% con riego tradicional y 20% con riego tecnificado). Es decir, con poco menos del doble de hectáreas se necesitará casi el doble de agua, escenario que plantea un desafío enorme para la región.

Desde el punto de vista de la utilización del recurso, un 85% del agua se utiliza para riego y un 10% para agua potable, siendo muy menores los otros usos (ver Recuadro 1, sectores de la demanda). Esto da cuenta de que éste es un valle con una clara vocación agrícola, donde los recursos hídricos son utilizados mayoritariamente para riego.

### Uso del agua subterránea en sequía

La reciente sequía del valle del Aconcagua ha dejado como experiencia muy positiva el aprovechamiento del embalse subterráneo. En la estación Chacabuquito, que se estima representativa del valle (ver Figura 5), pueden observarse tres episodios de escasez hídricos importantes: la sequía entre 1968 y 1969,

Tamaño (ha)	Número de Propiedades / Sección de Riego				Total
	I	II	III	IV	
Menos de 1 ha	949	478	2.130	31	3.588
1 a menos de 5	887	362	2.089	12	3.350
5 a menos de 20	718	516	1.259	34	2.527
20 a menos de 50	218	114	301	26	659
Más de 50	121	42	119	6	288
Total	2.893	1.512	5.898	109	10.412

Fuente: Estudio del Negocio y Actualización de Costos - AC INGENIEROS CONSULTORES LTDA. – DOH V Región - MOP, sobre la base de los antecedentes contenidos en el VI Censo Nacional Agropecuario. 1

Sección del Río	Superficie Actual (ha)		Riego Tradicional		Riego Tecnificado		Total (ha)
	Actual	Futura	(ha)	(%)	(ha)	(%)	
1ª	22.555,3	29.882,9	19.024,1	84,3	3.531,2	15,7	22.555,3
2ª	14.510,8	23.570,0	11.522,8	79,4	2.988,0	20,6	14.510,8
3ª	27.583,1	49.154,8	21.066,0	76,4	6.517,1	23,6	27.583,1
4ª	2.812,4	3.189,7	2.801,9	99,6	10,5	0,4	2.812,4
Total	67.461,6	105.797,4	54.414,8	80,7	13.046,8	19,3	67.461,6

Fuente: Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Aconcagua DGA, 2000

Situación	Sección del Río	Sectores de Demanda (Q en l/s)					Totales	
		Riego	A. Potable	G. Eléctrica	Industria	Minero	Por Sección	Porcentaje (%)
Actual (2000)	1ª	11.148	572	61.400 (*)	155	215	12.090	30,7
	2ª	8.114	2.109	-	12	45	10.280	26,1
	3ª	11.616	416	540	426	509	13.507	34,3
	4ª	2.297	944	-	220	-	3.461	8,9
	Total Valle	33.175	4.041	540	813	769	39.338	100
	Porcentaje (%)	84,3	10,3	1,4	2,1	1,9	100	
Futura (2030)	1ª	10.699	966	75.200 (*)	350	299	12.314	25,3
	2ª	9.978	665	-	28	71	10.742	22,1
	3ª	15.497	2.679	540	1.464 (**)	807	20.987	43,2
	4ª	2.137	2.447	-	-	-	4.584	9,4
	Total Valle	38.311	6.757	540	1.842	1.177	48.627	100
	Porcentaje (%)	78,8	13,9	1,1	3,8	2,4	100	

Fuente: Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Aconcagua DGA, 2000

(\*) Corresponde a derechos de tipo no consuntivo 3

(\*\*) Incluye las demandas de las Secciones 3 y 4



# SUSTENTABILIDAD HÍDRICA

**En Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi realizamos una gestión hídrica sustentable a través de una estrategia que permita ser un aporte para el entorno y la comunidad.**

**Collahuasi, somos mucho más que cobre**



el descenso de mediados de la década de 1990 y la sequía desde 2010. Se evidencia que los caudales mínimos son parecidos y que la extensión de los períodos de sequía, si bien son un tanto diferentes, en términos generales, todas son sequías que presentan comportamientos similares.

### Batería de pozos colectivos

A partir de 2000 –y antes inclusive– se plantea y diseña un plan para mejorar la seguridad de abastecimiento en el valle del Aconcagua (ver *Figura 6*), combinando la concepción y diseño de embalses, particularmente con el Embalse Puntilla – El Viento, junto a una serie de baterías de pozos colectivos desarrollados por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH).

Dichos pozos –construidos por el Estado a través de la DOH– fueron concebidos para ser utilizados en períodos de sequía y su concepto inicial fue mezclar el agua subterránea con los embalses.

Las baterías de pozos – que son los pozos colectivos de los sectores de Curimón, Panquehue y Llay Llay– contemplan caudales importantes (5.000 l/s para Curimón, 2.000 l/s para Panquehue, y 4.000 l/s para Llay Llay) y cuentan con alrededor de 10 a 15 pozos en cada caso. Estos fueron estudiados, analizados y ubicados en sectores

*“El desarrollo social y económico debe estar al servicio del interés nacional bajo una adecuada ecuación entre hombre y naturaleza.”*

estratégicos, donde la permeabilidad, espesor del acuífero, volumen embalsado y otras características hidrogeológicas así lo aconsejaron.

### Aprovechamiento del embalse subterráneo

Durante el último período de sequía se explotaron las baterías de pozos colectivos en la temporada estival. El agua extraída desde los pozos es introducida, en algunos casos al mismo río y en otros casos a canales, y con ello se aprovecha el mismo sistema existente de distribución de aguas superficiales para regar las zonas en los períodos de escasez hídrica o estiaje.

Si bien a partir de este proceso el volumen almacenado en el acuífero disminuye, este sistema se recupera en los períodos de abundancia hidrológica, particularmente en invierno

con la lluvia, logrando mantener la explotación en períodos de sequía hidrológica y recuperando los niveles de los acuíferos.

En cuanto al comportamiento histórico de los acuíferos del Aconcagua, la *Figura 7* da cuenta a grandes rasgos de los niveles de la napa, que si bien presentan períodos de disminución, en una perspectiva de largo plazo no muestran una tendencia al descenso, pues los niveles tienden a recuperarse a través del tiempo.

A partir de las cifras expresadas en el *Recuadro 2* sobre el análisis del comportamiento actual de los pozos puede concluirse que un uso intensivo en el acuífero –con caudales del orden de 70 m<sup>3</sup>/s en los períodos más intensivos– no ha producido una variación sustantiva en el descenso del nivel de acuífero

respecto de la sequía del período 1968-1969.

Asimismo, se evidencia una clara correspondencia entre el aumento de las precipitaciones y la recuperación del nivel del acuífero por concepto de recarga.

### Cambio del concepto de uso

La experiencia del valle del Aconcagua ha permitido modificar algunos conceptos y ampliar la mirada respecto de la conceptualización del uso y administración del agua subterránea.

Ante la pregunta de cómo ha sido posible el uso de pozos colectivos durante períodos de sequía sin la titularidad de derechos, la respuesta surge a través de la figura del Decreto de Escasez Hídrica. Éste, bajo determinadas características y condiciones producidas durante una sequía, permite que el Estado autorice el uso o manejo de los recursos hídricos en condiciones excepcionales. Y en este caso, dada esta figura administrativa, en un período de 6 años aproximadamente, se ha permitido la utilización de los pozos durante los veranos.

En este escenario, cabe reflexionar sobre cuáles son las formas más adecuadas para poder utilizar los pozos en las condiciones que el sistema lo requiera y así

poder administrar el recurso de forma eficiente.

El esquema actual representa un concepto muy estático basado en la unidad de la corriente, sustentabilidad del recurso, balance entre ingresos y salidas y protección del medio ambiente. Y si bien para Alhsud Chile todos estos son conceptos fundamentales y esenciales para el manejo de un sistema, se propone avanzar hacia un esquema más dinámico para la sociedad y el mundo actual, principalmente considerando los efectos del cambio climático.

Por ello, el esquema dinámico propuesto (ver *Recuadro 3*) plantea la necesidad del conocimiento del recurso

por aproximaciones sucesivas, indagando a través de un adecuado sistema de control y monitoreo, mediante una explotación programada y controlada, utilizando el agua subterránea como un embalse y elemento regulador. Para esto, se deben favorecer las condiciones de recarga de los sistemas cuando exista abundancia de agua, así como también su explotación en período de escasez o estivales.

### El propósito de la sustentabilidad y la gestión integrada de cuencas

Según el Instituto de Ingenieros, se define como “un proceso permanente

de coordinación entre entidades públicas y privadas, orientado a entregar una visión de conjunto de las acciones que ellas realizan, de acuerdo con el marco jurídico, económico e institucional vigente, con el propósito de abordar y solucionar situaciones características de la interacción de la sociedad con los recursos hídricos en una cuenca o grupo de cuencas, en que las acciones independientes o parciales, no ofrecen una adecuada respuesta y solución”.

Para Alhsud Chile, una complementaria debe considerar el aprovechamiento de los recursos hídricos basado en la sustentabilidad del

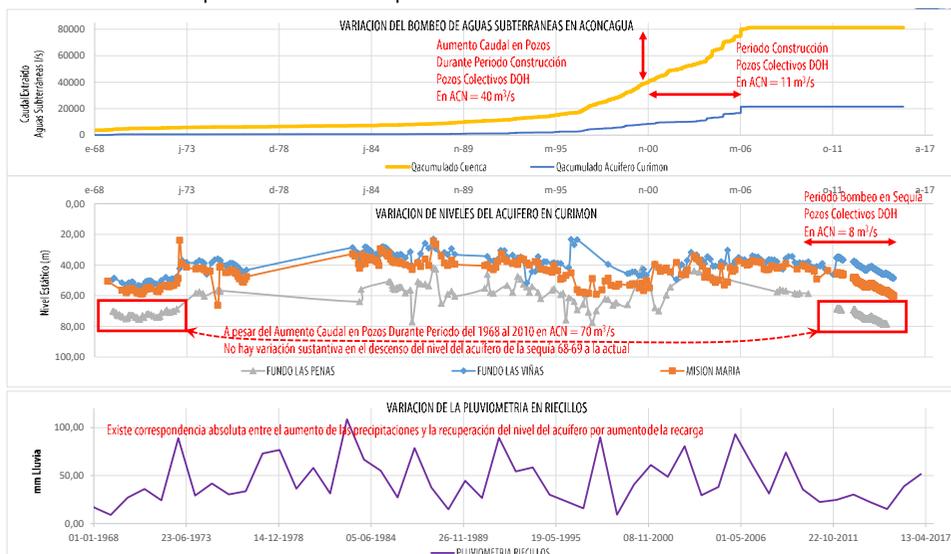
recurso, pero mirando el interés nacional, privilegiando al hombre y a la naturaleza, y aprovechando todos los recursos en forma progresiva y eficiente.

Tal como lo muestra el esquema de la *Figura 8*, en una cuenca hidrográfica hay aguas superficiales, subterráneas, desalinizadas, tratadas, de trasvase y otras, lo que implica mirar un conjunto de posibilidades de disponibilidad de agua, procurando optimizar los recursos económicos para un uso eficiente del recurso.

Por tanto, el desarrollo social y económico debe estar al servicio del interés nacional bajo una adecuada ecuación entre hombre y naturaleza, pues si bien debe asegurarse el resguardo de la sustentabilidad, también debe considerarse que los recursos naturales están al servicio del hombre.

Así, el propósito de la sustentabilidad debiera ser garantizar una adecuada combinación de los modelos hidrológicos, sociales y económicos para la toma de adecuadas decisiones políticas; ser una solución a los problemas de optimización de recursos; contar con modelos de calidad y balances de agua, simulando los flujos de agua a lo largo de las cuencas y su calidad.

**Recuadro 2:** Análisis del comportamiento actual de los pozos.



### Recomendaciones de Alhsud Chile

- El uso intensivo del volumen embalsado del acuífero del valle del Aconcagua permitió enfrentar con éxito una extensa y severa sequía.
- Los recursos obtenidos no sólo fueron utilizados para el riego, sino también para suplir el déficit de agua potable.
- Esto fue posible dado el profundo conocimiento del sistema (modelos conceptuales y numéricos), junto con disponer de la infraestructura adecuada de pozos colectivos y construidos en el momento adecuado, visión que ha permitido enfrentar períodos de sequía.
- El uso de los pozos fue posible bajo la figura jurídica del decreto de escasez hídrica, ya que no se disponía de derechos para su uso.
- Una vez terminada la extracción de los pozos en la temporada de riego, los niveles del acuífero se recuperaron a su condición natural, sin observarse un deterioro o disminución permanente en su volumen embalsado.
- Desde el punto de vista de las recomendaciones, los cambios que se introduzcan al Código de Aguas deben contar con un marco de acción asociado a la cuenca principal y con una gestión integrada entre el sector público y privado.

Recuadro 3: Esquema actual y propuesta de Alhsud sobre el concepto de uso y administración del agua.

El esquema actual (estático)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unidad de la corriente.</li> <li>• Sustentabilidad del recurso.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balance entre ingresos y salidas.</li> <li>• Protección del medio ambiente.</li> </ul>
El esquema propuesto (dinámico)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conocimiento del recurso por aproximaciones sucesivas.</li> <li>• Explotación programada y controlada.</li> <li>• Uso del embalse subterráneo como elemento regulador.</li> <li>• Gestión del embalse subterráneo en proceso de vaciado – llenado.</li> <li>• Otorgamiento de derechos eventuales de agua subterránea.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas.</li> <li>• Como vaciar el embalse subterráneo.</li> <li>• Audacia <math>\left\{ \begin{array}{l} -Leyes \\ -Normas \\ -Reglamentos \end{array} \right\}</math> Al servicio Del hombre</li> <li>• Creatividad.</li> <li>• Ingenio - ciencia-tecnología-administración.</li> </ul>

Figura 8: Uso conjunto y uso alternante.

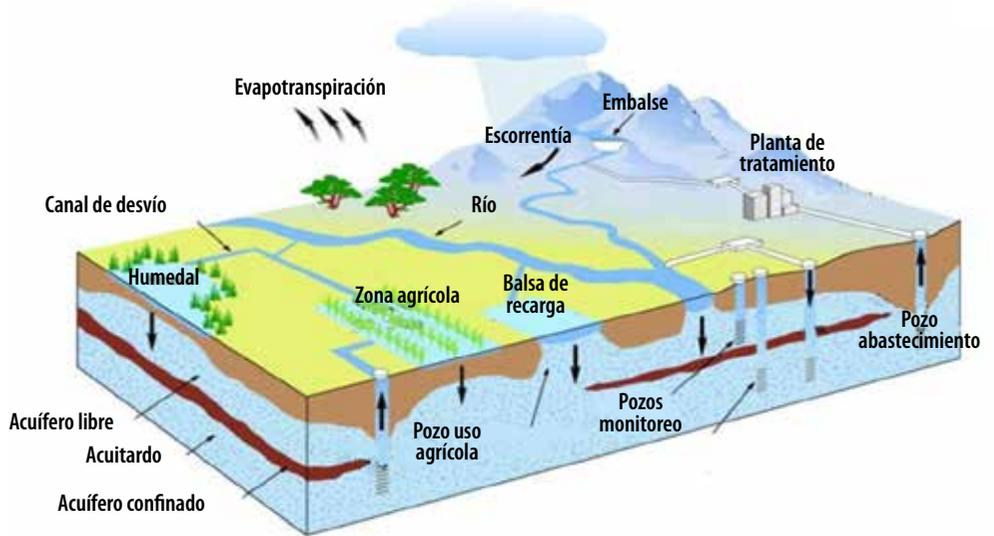


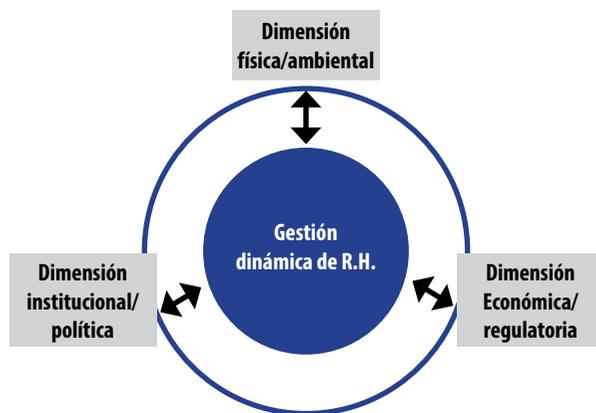
Figura 9: Una mirada distinta en el aprovechamiento de los recursos hídricos.



Fuente: Peralta, Fernando (2005). Jornada Técnica Alhsud 2016: "Una Alternativa para la Explotación de las Aguas Subterráneas en Chile"

- Se propone agregar en la legislación la constitución de Organizaciones Administradoras de Cuencas Principales, cuya directiva esté constituida por representantes de las Juntas de Vigilancia y de Organizaciones de Usuarios de Aguas, junto a las autoridades regionales.
- Es indispensable la información del uso efectivo de todos los derechos de agua y del potencial funcionamiento de un mercado, lo que requiere de un monitoreo continuo efectivo por parte de la autoridad, con información pública y accesible.
- Se debe fortalecer una estructura única de administración de usuarios por cuenca principal, la cual permita obtener soluciones colaborativas e integradas para el mejor aprovechamiento de los recursos hídricos de Chile.
- Una experiencia exitosa es la explotación intensiva, pero controlada de aguas subterráneas en épocas de sequía mediante baterías de pozos colectivos, los que pueden ser utilizados como fuentes de recarga artificial en épocas de excedencia o abundancia hidrológica.
- Esto último resulta una buena solución comunitaria que asegura el abastecimiento en épocas críticas o de escasez de las aguas

**Recuadro 4:** Tres dimensiones de la gestión dinámica del agua.



Fuente: Modificado de *Water Management in Arid and Semi-Arid Regions* (2006).

superficiales, más aún cuando es manejado por el Estado en beneficio del bien común.

Finalmente, para Alhsud Chile: *Una política hídrica para el país debe basarse en el conocimiento, la cuantificación y la buena administración de los recursos, mediante una operación informada y monitoreada en terreno, en conjunto con los usuarios y no desarrollarse desde la escasez.*

El anuncio muestra un trabajador en un traje naranja y casco gris, con los brazos levantados en un gesto de victoria. En la parte superior izquierda hay un icono de una bombilla encendida. El texto principal dice "COMPAÑÍA CHILENA DE PERFORACIONES LTDA. agua subterránea". Debajo del trabajador, se lee "HACEMOS POZOS INTELIGENTES". En la parte inferior, hay un logo de "smart-wells" con un símbolo de Wi-Fi y un gota de agua, y un recuadro azul con el sitio web "www.pozosdeagua.com", el correo "info@pozosdeagua.com" y el número "2 26829600".

# Áreas de protección: ¿Qué protegen, el agua o los derechos?"



José Luis Arumí\*

Artículo elaborado a partir de la ponencia realizada durante el Seminario 2016 "Explotación dinámica de acuíferos" de Alhsud Chile.

\*José Luis Arumí es ingeniero civil, PhD. por la Universidad de Nebraska Lincoln y decano de la Facultad de Ingeniería Agrícola de la Universidad de Concepción. Es investigador del Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM) y director-asesor de Alhsud Chile. La investigación "Áreas de protección: ¿Qué protegen, el agua o los derechos?" fue desarrollada junto a Verónica Delgado y Oscar Reicher.

A través del Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y Minería (CRHIAM), un grupo de hidrogeólogos, científicos ambientales, abogados y sociólogos del área "Agua y Sociedad", desarrolló una investigación en torno a las relaciones entre la comunidad, medio ambiente y agua (ver Figura 1). Al respecto, se buscó entender los vínculos entre los seres humanos y los sistemas de agua, proponiendo estrategias adaptadas al modelo chileno para mejorar el uso del agua, administrar los recursos hídricos y contribuir a mejorar la legislación.

Sobre este último objetivo se realizó un estudio denominado "Percepción y prácticas ciudadanas del valor del agua como bien natural y social: el consumo humano, agrícola, minero y energético en Chile en tiempos de cambio climático". Para el desarrollo de éste se aplicó una encuesta en cuatro regiones del país (Coquimbo, Región

Metropolitana, O'Higgins y Bío Bío) a un grupo de más del mil personas, cuyo resultado arrojó que un 97% de los encuestados, ante la pregunta "¿Qué es para usted el agua?", respondió que es un "elemento vital", "de gran importancia para la vida" y "que sin ella no se puede vivir".

Un 63% de los encuestados, en tanto, respondió que el principal problema que identifican en torno al agua es la contaminación. Respecto de este punto, la doctora Verónica Delgado –en el contexto del desarrollo de su proyecto post doctoral "Ambientalizando el Código de Aguas" – al analizar el Código actual identificó que éste responde a la lógica del momento en que fue redactado, mientras que con el paso del tiempo Chile experimentó un gran salto productivo, existiendo en la actualidad una percepción y sensibilidad distinta a la que existía hace 40 años.

Así, se instalan hoy tópicos como calidad del agua, preservación de los ecosistemas y protección de las fuentes de agua potable. En ese sentido, la

investigación desarrollada por Verónica Delgado junto a Oscar Reicher buscó analizar la legislación comparada y observar el caso Chileno.

En general, hay muchos países donde existe una estricta regulación (Alemania, Francia, Reino Unido, Irlanda, Bélgica, Holanda, Italia, Portugal, Dinamarca, Suiza, EE.UU, Canadá y Australia), sobre cómo proteger las zonas de recarga de los pozos y se evitan las actividades que puedan inducir a la contaminación. En algunos casos se establecen compensaciones por las prohibiciones o limitación de actividades, aunque, en general, la prohibición queda comprendida dentro de la función social de la propiedad. Y se considera que un perímetro fijo es "económico" pero no "confiable" puesto que no considera las condiciones particulares del acuífero.

En Chile, en tanto, existe una norma (777-2, año 2000), la que, sin embargo, no se aplica. Esta refiere a un radio de protección de unos 100 metros de prohibición absoluta

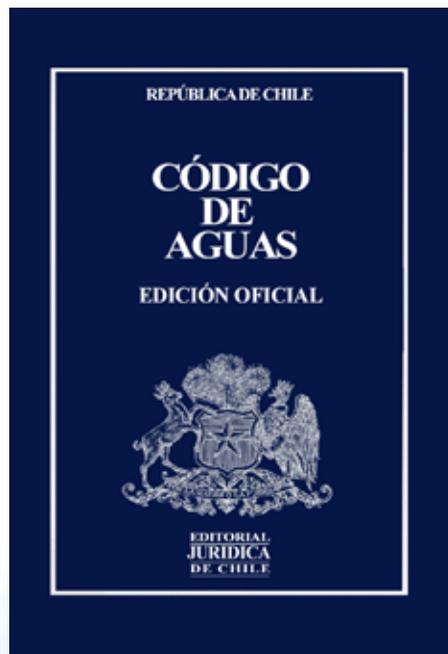
(dentro del predio) y de una zona de captura del agua, en la que la autoridad podrá establecer prohibiciones a terceros. Esto último no se aplica, pues una norma de rango inferior no puede establecer limitaciones al derecho de propiedad.

Así entonces, si esta norma no se aplica, necesariamente se debe revisar para luego dictar una ley, significando esto además que las captaciones de agua potable sólo están protegidas por el Código de Aguas.

En el Código de Aguas se establecen zonas de protección. Cada vez que se otorga un Derecho de Aprovechamiento de Aguas (DDA) subterráneas se debe establecer un área de protección de los DDA en la resolución administrativa. Instituye además, que un tercero no podrá instalar "obras

similares" de extracción de aguas (sólo cantidad), pero se refiere a un perímetro fijo de 200 metros, que puede ser mayor cuando se demuestra que hay un efecto sobre el bombeo o

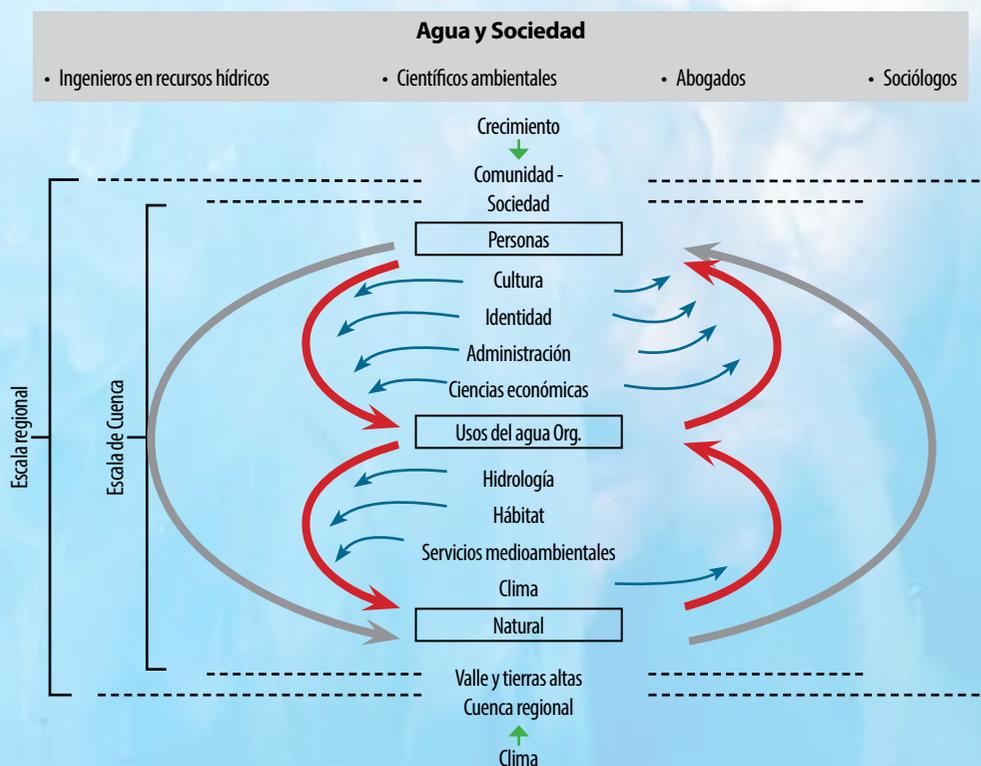
cuando se habla de fuentes purativas. Sin embargo, no puede ser menor, a no ser que el propietario del pozo dé alguna autorización, en el cual renuncia a su protección.



Las condiciones de ubicación de los puntos de captación en relación a las áreas de protección de los derechos de aprovechamiento de aguas establecen lo siguiente:

- Que la captación se ubique físicamente a más de 200 metros de otras captaciones, siempre que cuenten con derechos legalmente constituidos o en regularización, salvo que autorice el propietario o sea para uso doméstico.
- Que no podrán constituirse derechos de aprovechamiento de aguas (DAA) si el punto de captación donde se solicita se ubica a una distancia menor a 200 metros de afloramientos o vertientes, si de ello resultare perjuicio o menoscabo a derecho de terceros o afectare la relación existente entre las aguas superficiales o subterráneas.

Figura 1: Modelo de relaciones entre la comunidad, medio ambiente y agua.



Así, la conclusiones arrojadas dan cuenta de la existencia de algunas limitaciones dentro del Código de Aguas, creado bajo una lógica de protección a los derechos, pero que actualmente requiere avances, puesto que no se protegen las captaciones de agua potable de la contaminación. El radio de protección del Código de Aguas protege los derechos de propiedad con un radio fijo que impide extraer agua (cantidad). A su vez, resulta insuficiente, para lo cual debe dictarse una ley para captaciones de agua potable que asuma riesgo de contaminación.

## Explotación dinámica de acuíferos:

# Décadas de uso intensivo en el Campo de Dalías (España)



Linda Daniele\*

Artículo elaborado a partir de la ponencia realizada durante el Seminario 2016 "Explotación dinámica de acuíferos" de Alhsud Chile.

\* Linda Daniele es licenciada en Ciencias Geológicas, con título de geóloga por la Università degli Studi di Napoli Federico II (Italia), master (DEA) en Aguas Subterráneas y Medio Ambiente por la Universidad de Almería y doctora en Hidrogeología, también por la Universidad de Almería (España). Actualmente se desempeña como académica del Departamento de Geología de la Universidad de Chile.

El campo de Dalías se ubica en el sur de España y es una llanura costera de 330km<sup>2</sup> con un clima semi árido. Su precipitación media es de 200 a 300 milímetros anuales, mientras que su temperatura promedio es de 18° celsius.

En la fotografía de la Figura 1 se observa una imagen de satélite, en la cual se distinguen más de 22 mil hectáreas, en cuya área se producen entre tres y cinco cosechas anuales de hortalizas "extra-temprana". La economía relacionada con la agricultura en la zona mueve 1.500 millones de dólares al año, directamente.

En la zona descrita, todos sus habitantes viven directa o indirectamente de la agricultura. Los primeros cambios comienzan a observarse desde hace poco más de 40 años a través de una ley de urbanización de áreas deshabitadas (ver

Figura 1: Zona de cultivo Campo de Dalías (España).



Figura 2: Agricultura intensiva (3-5 cosechas "extra-temprana" por año).



**Recuadro 1:** Situación “hidroeconómica” y balance.

Año	1950 – 1960	1980 – 1990	1990 – 2000	2000 – 2010		
<b>Datos socioeconómicos:</b>						
Superficie cultivada	1.700 hás	11.500 hás	15.000 hás	20.700 hás		
Población	12.000 hab.	233.400 hab.	282.500 hab.	345.600 hab.		
PIB por habitante Almería	30 €	1.900 €	6.300 €	18.900 €		
<b>Consumo de agua</b>						
Agua subterránea	10 Hm <sup>3</sup>	93 Hm <sup>3</sup>	100 Hm <sup>3</sup>	140 Hm <sup>3</sup>		
Agua embalsada	-	-	15 Hm <sup>3</sup>	3 Hm <sup>3</sup>		
Aguas regeneradas	-	-	-	< 1 Hm <sup>3</sup>		
Aguas desaladas	-	-	-	-		
Recursos disponibles	Año 2010		Año 2015		Año 2025	
	Demandas	Déficit	Demandas	Déficit	Demandas	Déficit
94	139	45	147	54	174	80

Fuentes: Castro Nogueira H., 2015. | Acuamed. “Desalación y obras complementarias para el campo de Dalías (Almería)”

Figura 2). Entonces, en menos de 30 años se provocaron cambios importantes en el territorio y ya a partir de 1986 comenzaron a experimentarse los primeros problemas de cantidad y calidad de las aguas subterráneas.

Así, a poco andar el

gobierno promulgó un decreto para declarar estos acuíferos como sobre explotados, existiendo ya en 1986 un conocimiento real de que la situación no iba por buen camino. En la Figura 3, de hecho, puede observarse una imagen actual con más

de mil sondajes, donde algunos alcanzan los 1000 metros de profundidad y otros tantos superan los 700 metros para la extracción de agua.

### Acuíferos del campo de Dalías (Almería, España)

Desde un punto de vista más técnico, se trata de una serie de acuíferos llamados unidades. De estas últimas se reconocen tres grandes unidades: Aguadulce, Balerna-Las Marinas y Balanegra. Una parte de Balerna está confinada debajo Balanegra y este último tiene un doble acuífero porque existe una neotectónica bastante activa.

¿Pero cómo ha cambiado la situación en esta área? En la década de 1950 y 1960 existían 1.700

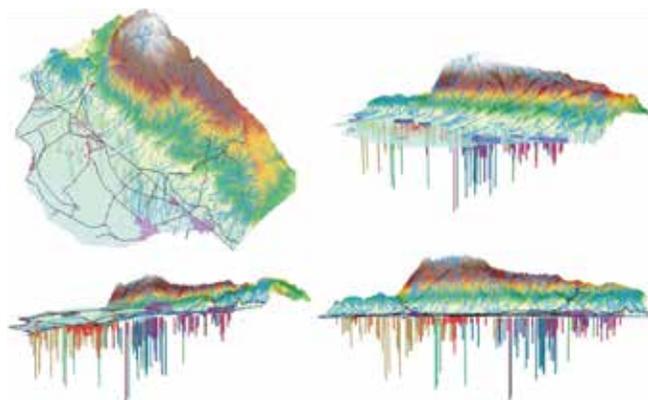
hectáreas cultivadas y 12 mil habitantes, cuyos ingresos, tal como se observa en el Recuadro 1, alcanzaban los 30 € (PIB por habitante). Con el correr de las décadas, en la zona de Almería fue aumentando significativamente el número de personas, la cantidad de hectáreas cultivadas, la renta per cápita y fundamentalmente, se produjo un incremento de la demanda. Así, se recurrió al agua embalsada y una pequeña parte de aguas regeneradas, sin embargo, al observar los déficit, conforme pasan las décadas, se incrementan aún más y se estima que lleguen a duplicarse.

### Evolución de la situación

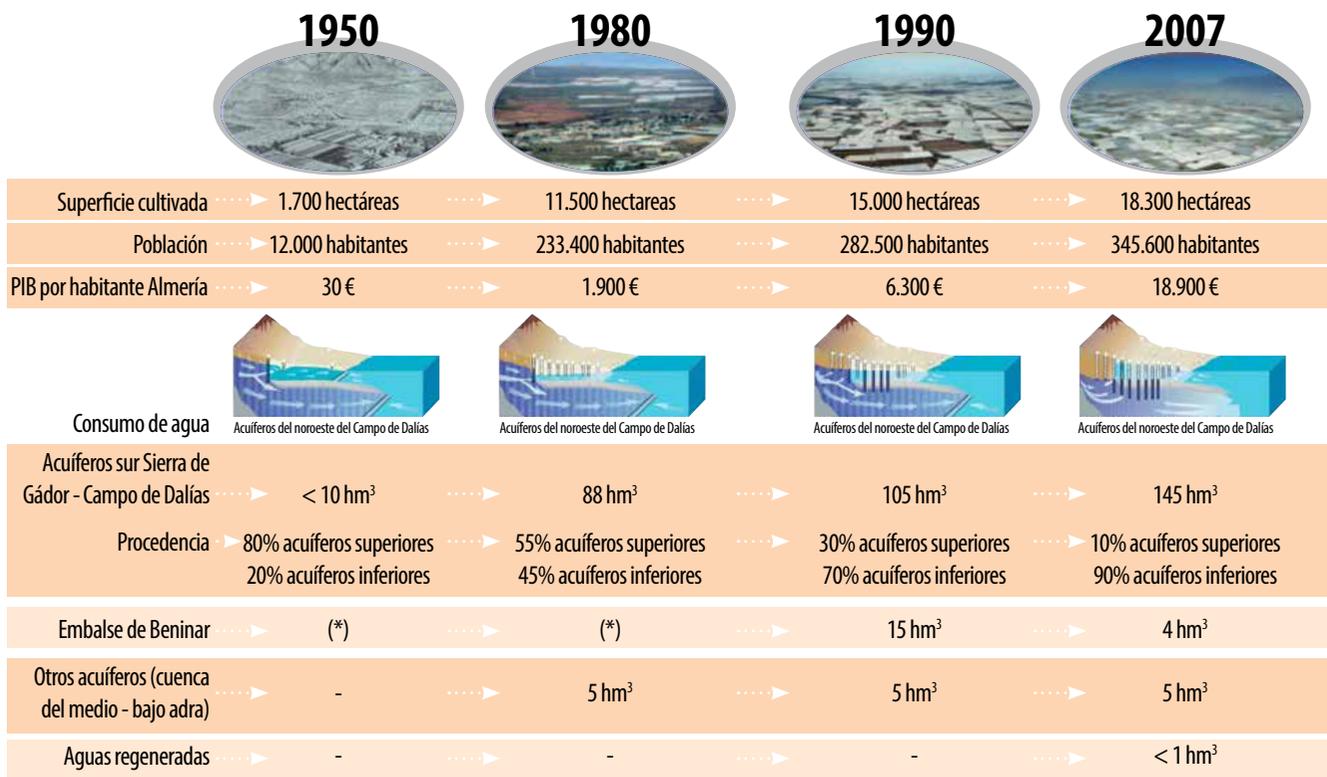
Desde una perspectiva más hidrogeológica, la evolución puede observarse con claridad en la Figura 3. Se inicia en 1950 con la explotación del agua más somera, época en la que nadie perforaba si no estaba obligado a hacerlo y los sondajes tenían pocas decenas de metros. En 1980, en tanto, la situación comienza a deteriorarse y ya en la década de 1990 se inician las perforaciones mucho más profundas. Así, estando al lado de la costa comienza el problema de intrusión marina, acompañado por procesos de contaminación por retorno del riego.

La situación antes descrita, tal como se

**Figura 3:** Agua subterránea como motor de la economía provincial. Declaración de sobreexplotación por Real Decreto 2618/1986 (24 de diciembre).

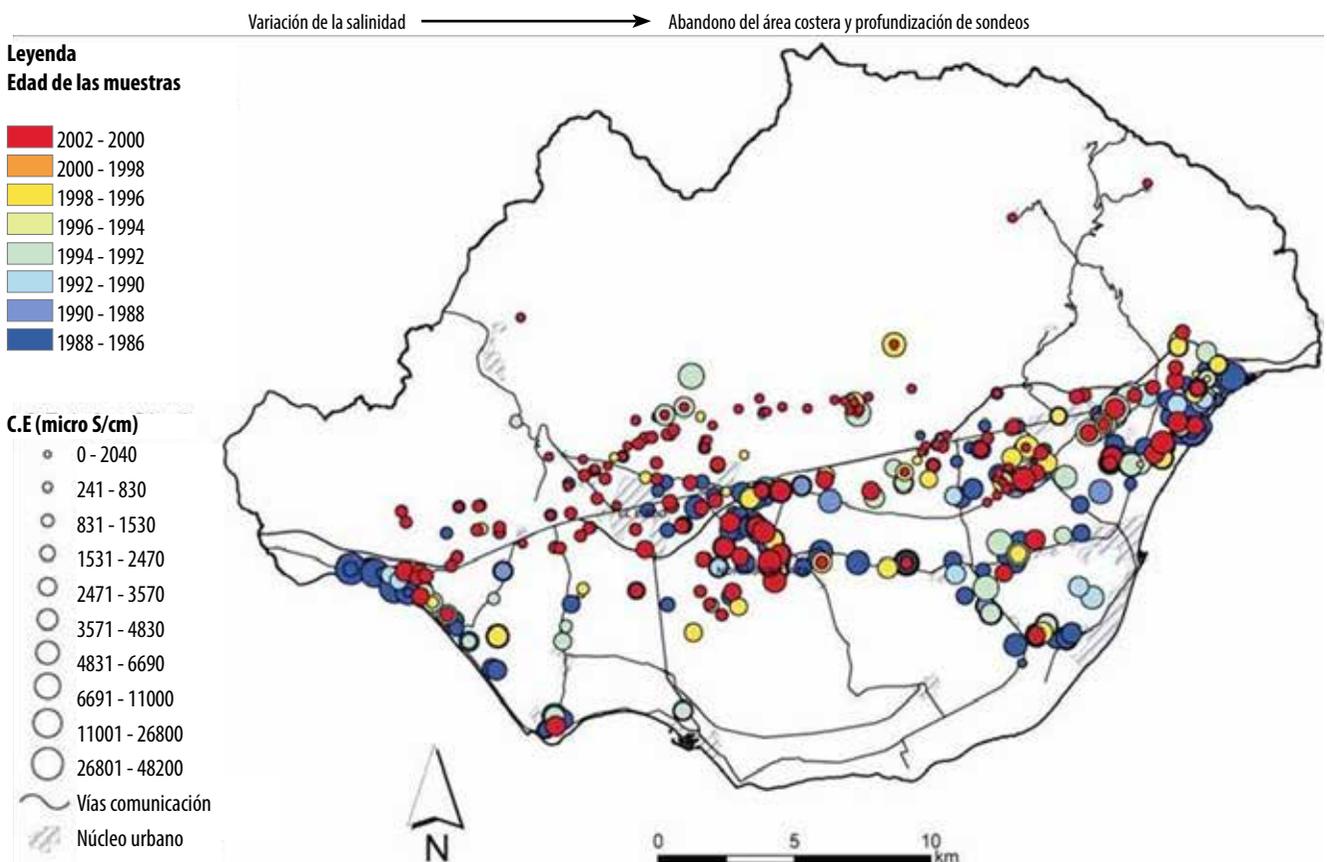


**Figura 4:** Evolución de la situación entre los periodos 1950 - 1980 - 1990 y 2007 en cuanto a consumo de agua y estado de los acuíferos.

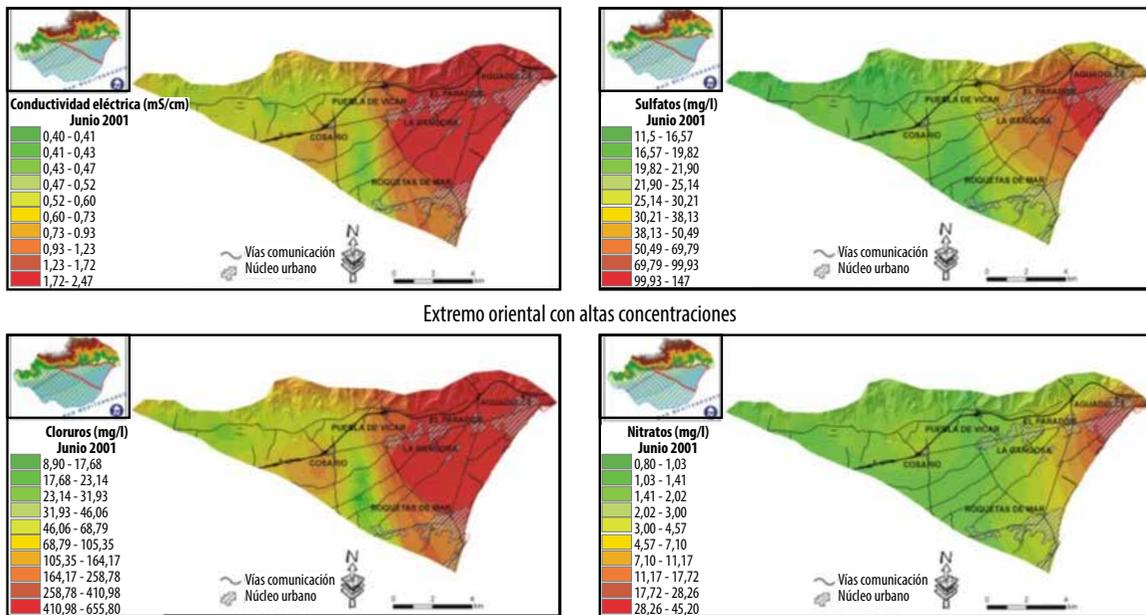


Fuente: Agencia Andaluza Agua, Junta de Andalucía. "Acuíferos poniente: un tesoro oculto bajo tus pies".

**Figura 5:** Evolución salinidad y captaciones: variación de la salinidad - abandono del área costera y profundización de sondeos.



**Recuadro 2:** Procesos fisicoquímicos en aguadulce. Intrusión marina y contaminación aparecen en ambos acuíferos.



Fuente: Domínguez et al., 2000; Pulido-Bosch et al., 2005; Daniele, 2007; Daniele et al., 2008 y 2013.

visualiza en la *Figura 4*, evidentemente no había mejorado en la última década, tal como se observa el estado que presenta en 2007 (ver *Figura 4*).

### Décadas de estudios

Estas décadas de evolución antes descritas también implicaron un largo período de estudio con información de décadas que fueron recopiladas en bases de datos “inteligentes” (una base de datos geográfica). Luego, a partir de una base de datos geográfica fue posible realizar un análisis espacial temporal de lo que ha ocurrido efectivamente en estas aguas.

### Evolución de la salinidad y captaciones

Al analizar lo ocurrido durante estos años y en la conductividad eléctrica, que es también un indicador de la salinidad y calidad del agua, tal como se observa en la *Figura 5*, los sondeos comenzaron su

actividad en la costa o en la zona más llana.

Las perforaciones fueron avanzando y esto implicó que aumentara la profundidad de la perforación. Entonces, en la actualidad se está invirtiendo muchísimo dinero en la búsqueda de agua.

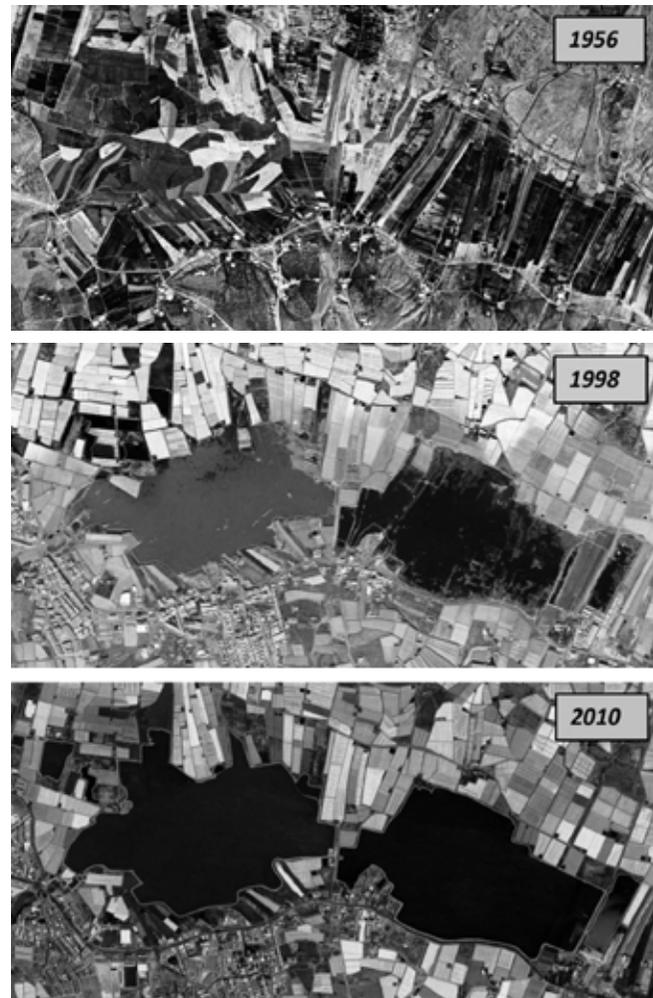
### Procesos fisicoquímicos en agua dulce

Lo que a primera vista parecía una gran hecatombe, con un análisis más detallado reveló ser una complejidad debido a la organización geométrica de estos bloques.

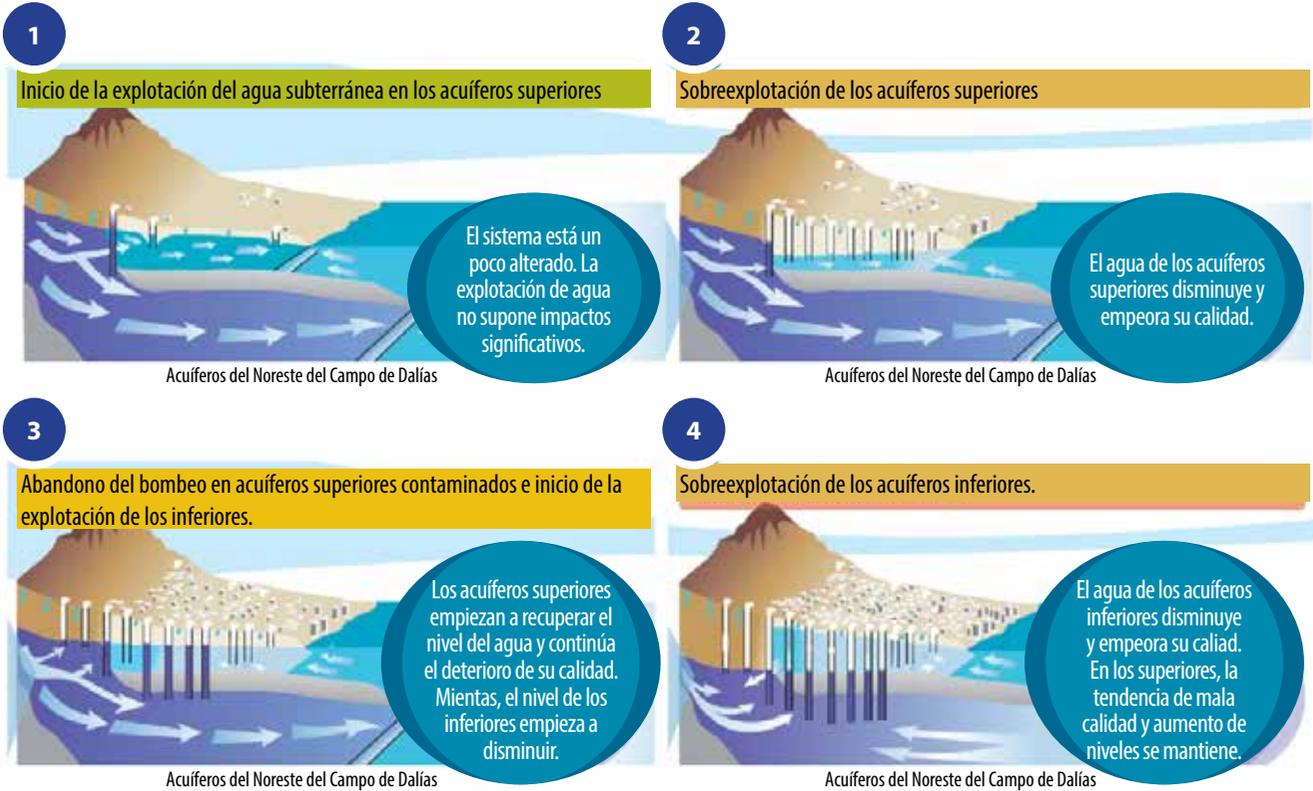
Se logró medir un 7% de la intrusión marina en el acuífero superficial ( $F_s=7\%$ ) y pudo observarse en la zona central –que parecía con intrusión, llegando al acuífero profundo 4 a 5 kilómetros tierra adentro– que debido a una mala construcción de sondeo, se ponía en contacto el acuífero superior con el inferior.

Entonces, finalmente en esta zona no existía una intrusión activa, sino

**Recuadro 3:** Zona central “Balerma-Las Marinas” (sobrexplotación - deterioro – abandono – inundaciones)



**Recuadro 4:** Evolución de la situación, problemas de cantidad y calidad en los recursos.



Fuente: Agencia Andaluza Agua, Junta de Andalucía. "Acuíferos poniente: un tesoro oculto bajo tus pies".

más bien una salinización debido a un contacto hidráulico a través de las perforaciones.

### Algunas conclusiones

En la actualidad, esta situación claramente ha presentado una inflexión. Para garantizar una gestión eficiente, durante 2009 se llegó a la conclusión de que las decisiones no pueden tomarse sin un profundo conocimiento de los acuíferos.

Las décadas de uso dinámico (sobreexplotación o uso intensivo) han

demostrado que si bien se han generado "efectos adversos" y el agua subterránea sigue siendo el sustento económico de esta región estudiada.

Tras 40 años de uso intensivo y demanda creciente, en 2009 la situación no podía seguir en un estado de ilegalidad total y España tuvo que acatar la Ley Marco de la Unión Europea. En razón de ello, se establecieron varias mesas de trabajo en las que autoridades y usuarios se reunieron para decidir lo que se iba a hacer

a futuro: continuar con una gestión no sostenible o intentar mantener un estado de equilibrio conjuntamente, que aunque fuese dinámico, diera sustentabilidad a toda la economía de la región.

En la actualidad, la autoridad y las inversiones privadas, junto a la Comisión Europea, han generado varios proyectos donde han incorporado fuentes alternativas de agua para intentar disminuir este déficit y han involucrado a los ciudadanos implementando

medidas de ahorro y eficiencia.

Así, vale mencionar a modo de conclusiones que finalmente la gestión dinámica tiene sentido si se basa y se complementa con ciencia y conocimiento (ciclos de las sequías, cambio climático e intensidad de las precipitaciones), medidas de ahorro y eficiencia, búsqueda de fuentes alternativas de agua, información y participación ciudadana y proyectos de recuperación y conservación de los acuíferos. 🌍

# La restauración hidrológica forestal como factor de recarga de acuíferos



Claudia Sangüesa\*

Artículo elaborado a partir de la ponencia realizada durante el Seminario 2016 "Explotación dinámica de acuíferos" de Alhsud Chile".

\* Claudia Sangüesa es ingeniero forestal y magíster en Ingeniería Agrícola con mención en Recursos Hídricos por la Universidad de Concepción. Actualmente se desempeña como coordinadora científica del Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental de la Universidad de Talca, participando como investigadora asistente en los proyectos en curso.

La Restauración Hidrológico-Forestal (RHFO) se refiere a una serie de actividades, acciones y proyectos enmarcados en una unidad hidrográfica. Dicha restauración se relaciona con las acciones necesarias para la conservación, defensa y recuperación de la estabilidad y fertilidad de los suelos, así como la regulación de escorrentías, consolidación de cauces fluviales y laderas, contención de sedimentos y defensa del suelo contra la erosión.

Así, la RHFO puede definirse como un proceso de reflexión sobre el territorio – cuenca y red de drenaje que se concreta en proyectos de actuación.

## ¿Cómo afecta la vegetación al ciclo hidrológico?

Primeramente, existe una cubierta aérea (la copa) compuesta por las hojas, la cual intercepta la energía cinética de las lluvias y

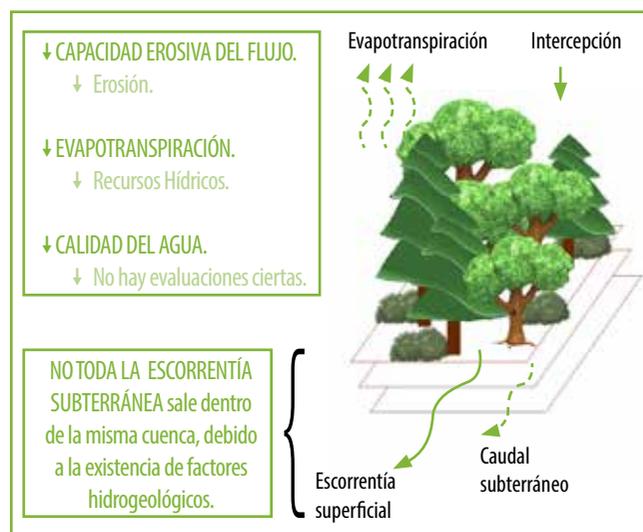
disminuye la energía de las gotas de agua y la erosión por salpicadura. Evita la fragmentación de agregados del suelo y disminuye el sellado superficial y la escorrentía superficial, aumentando la infiltración.

Otro aspecto es la cubierta viva o muerta en contacto con el suelo, que también disminuye la

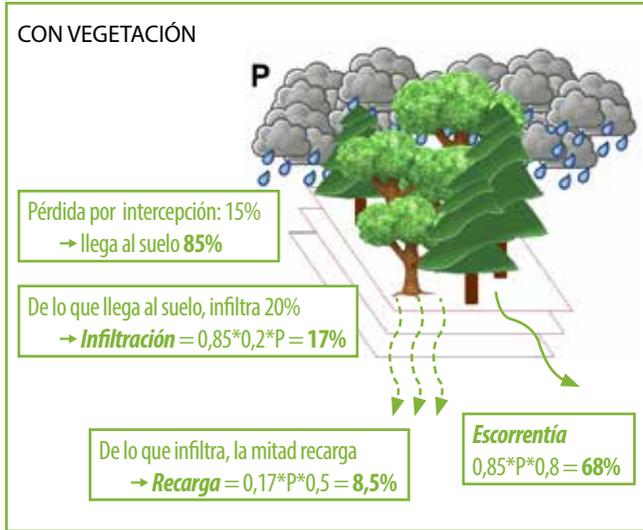
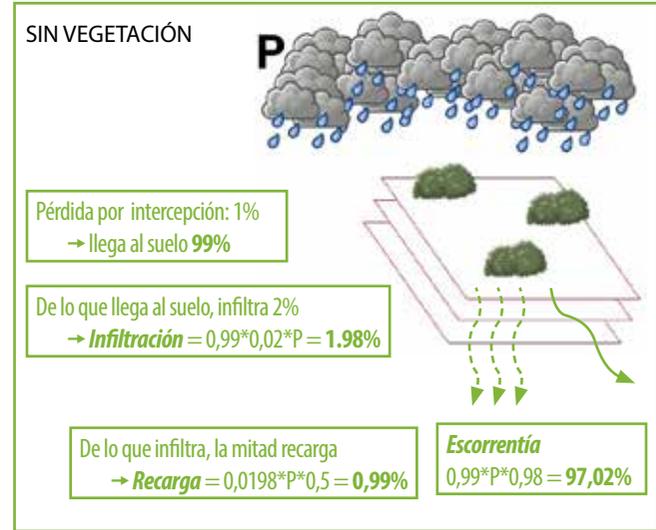
energía cinética con la que el agua llega al suelo, y al mismo tiempo, aumenta la resistencia a la circulación superficial del flujo, por lo que el agua ya no escurre tan fácilmente cerro abajo, favoreciendo la existencia de microorganismos.

La existencia de los sistemas radicales de las plantas, en tanto, favorecen de mejor forma

Figura 1: Esquema "proceso de evotranspiración – intercepción – escorrentía superficial – caudal subterráneo.



Fuente: Centro Tecnológico de Hidrología Ambiental (CTHA) – Universidad de Talca.

**Figura 2:** Simulación del proceso de precipitación-escorrentía.**Figura 3:** Simulación del proceso de precipitación-escorrentía.

la infiltración y calidad del agua, aumentando la estabilidad del suelo. A su vez, disminuyen la humedad del suelo por transpiración, así como el volumen total de recursos hídricos.

Así, en definitiva, la vegetación disminuye la escorrentía superficial y aumenta la escorrentía subsuperficial, la percolación y el tiempo de concentración, es decir, el agua disminuye su velocidad. A su vez, los caudales punta y tasas de crecida de los cauces tienden a disminuir.

Se puede concluir entonces que la vegetación disminuye la capacidad erosiva del flujo y de la erosión, mientras que la evapotranspiración aumenta. Finalmente, si bien no existen evaluaciones totalmente certeras en torno a la calidad del agua, al disminuir la retención de sedimentos, mejora la calidad

del agua en los cauces y el agua es más cristalina.

Es importante recalcar que no toda la escorrentía subterránea sale desde dentro de la misma cuenca debido a la existencia de factores hidrogeológicos (ver Figura 1). Y si bien en Chile se conoce muy poco del comportamiento de los acuíferos, sí es claro que la vegetación ayuda a la infiltración.

### Simulación del proceso de precipitación-escorrentía

Mediante un caso hipotético se simuló un proceso de precipitación – escorrentía (ver Figura 2) de una lluvia caída sobre un bosque (o suelo con vegetación) y se estableció –en forma conservadora– una pérdida por intercepción de un 15%, es decir, un 85 % de la lluvia llega al suelo. Luego, de este 85%, se estableció

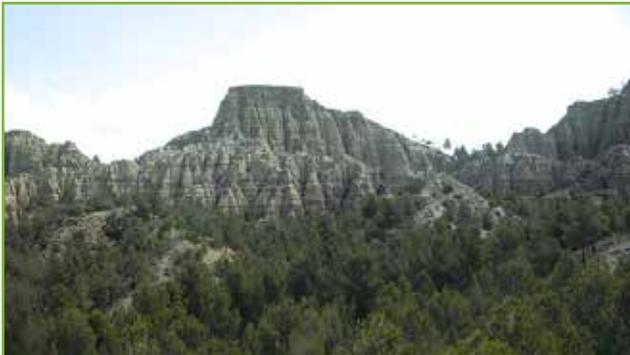
que un 20% infiltra. Es decir, un 17% de la lluvia logra infiltrar ( $0,85 * 0,2 * P = 17\%$ ). Y de lo que infiltra, la mitad logra llegar al acuífero con una recarga de un 8,5% ( $R = 0,17 * P * 0,5 = 8,5\%$ ), mientras que la escorrentía alcanza un 68% ( $E: 0,85 * P * 0,8 = 68\%$ ).

En un suelo sin vegetación (ver Figura 3), en tanto, la pérdida por intercepción es de un 1%. Es decir, un 99% del agua llega al suelo y de

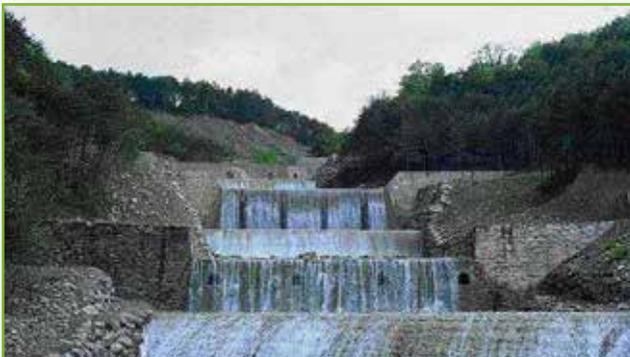
**Recuadro 1:** Simulación del proceso de precipitación-escorrentía en un suelo con y sin vegetación.

	Zona con alta cobertura de vegetación	Zona con baja cobertura de vegetación
<b>Intercepción</b>	15%	1%
<b>P que llega al suelo</b>	85%	99%
<b>Infiltración</b>	17%	2%
<b>Recarga</b>	8,5%	1%
<b>Escorrentía</b>	68%	97%

**Recuadro 2:** Ejemplos internacionales de restauración hidrológico-forestal.



Cabecera de la rambla de "El Cortijillo" en Granada, España.



Torrente de Arás, Huescas, España.



El Gastor, Cadíz, España.

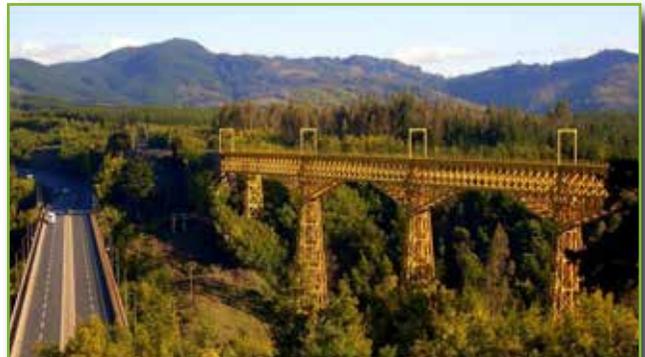


Cuenca del río Cuadrilla en Córdoba, España.

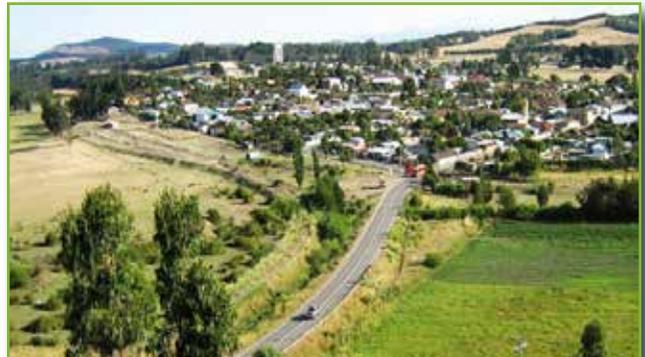
**Recuadro 3:** Ejemplos nacionales de restauración hidrológico-forestal.



Cerro San Cristóbal, Santiago, Chile.



Viaducto Malleco en Collipulli, Chile.

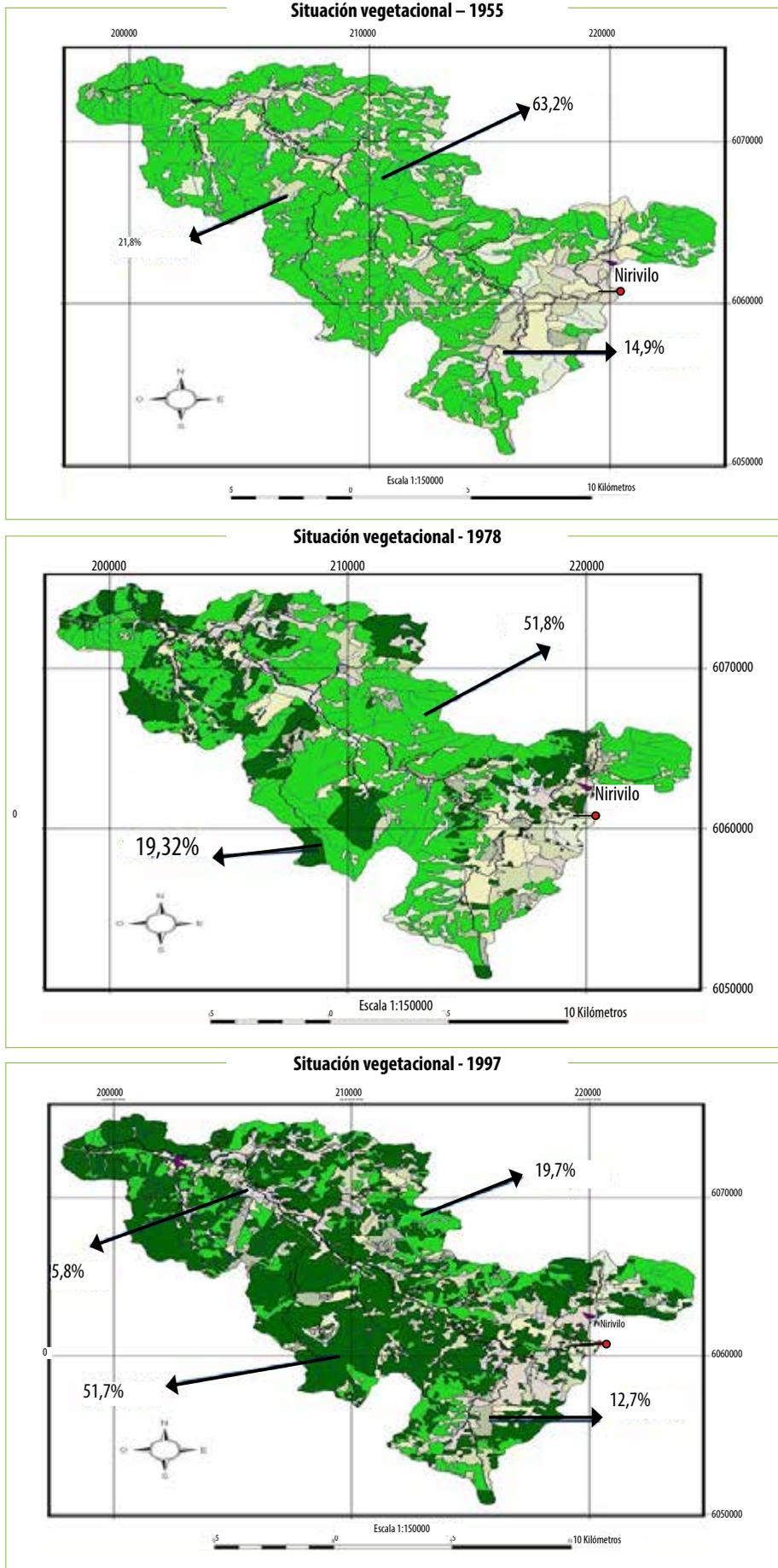


Comuna de Los Sauces en La Araucanía, Chile.



Desembocadura río Maule en Constitución, Chile.

**Figura 4:** Análisis de variación de reservas río Purapel (situación vegetacional en 1955, 1878 y 1997).



esta agua, la mayor cantidad escurre, mientras que apenas infiltra un 2% ( $I = 0,99 * 0,02 * P = 1,98\%$ ), si es que no se ha producido un sellamiento. Y de lo que infiltra, la mitad recarga ( $R = 0,0198 * P * 0,5 = 0,99\%$ ), mientras que la escorrentía alcanza un 97% ( $E = 0,99 * P * 0,98 = 97,02\%$ ).

Así, al observar los dos tipos de suelo se evidencia una gran diferencia entre ambos terrenos, cuyas cifras, a través del modelo simulado, dan cuenta en detalle de la función de la vegetación en la cuenca a través del *Recuadro 1*.

### Análisis de variación de las reservas río Purapel

En mayo de 2001 se realizó un estudio acerca de las reservas de agua en la cuenca del río Purapel (El Maule), cercana a Constitución. El análisis de la variación de las reservas mensuales de agua en el período 1960-2000 tenía por objetivo aportar al conocimiento del comportamiento de las aguas subterráneas en cuencas costeras de la Región del Maule.

Sus objetivos específicos, en tanto, fueron obtener cuantitativamente la variación de reservas mensuales de agua en el período 1960-2000 e inferir si las forestaciones masivas han incidido en la capacidad de almacenamiento de la cuenca, a través del análisis de la variación de reservas y de la ocupación forestal del suelo de la cuenca.

La cuenca del río Purapel es cuenca pequeña con aportes pluviales, cuya particularidad era que en

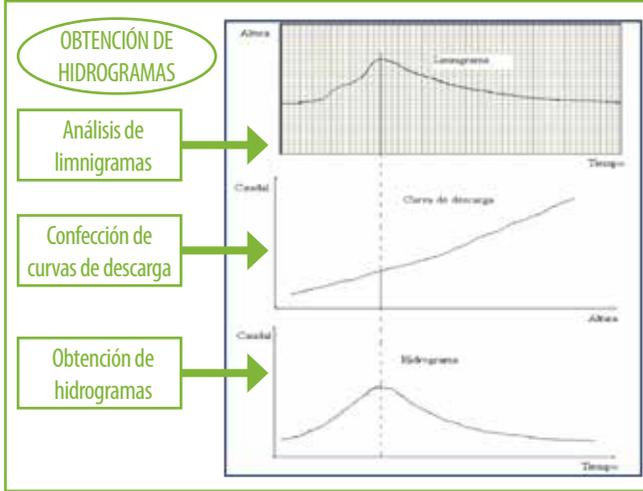
**Recuadro 4:** Reservas mensuales del Río Purapel en los períodos 1960 – 1979 y 1980-2000

RESERVAS MENSUALES 1960-1979												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1960	29,8	14,3	8,6	11,26	6,64	16,33	11,3	24,86	19,82	7,96	9,61	8,69
1961	0,33	0,17	0,32	0,73	0,58	0,73	1,95	7,9	40,66	12,35	21,76	10,26
1962	2,53	0,54	0,51	1,97	3,77	7,54	13,32	11,44	3,7	0,98	34,73	1,14
1963	0,5	0,4	0,51	1,97	3,77	7,54	13,32	11,44	3,7	0,98	34,73	1,14
1964	21,66	8,59	6,91	6,91	16,74	21,66	7,97	5,76	63,57	18,41	7,64	3,89
1965	0,47	0,12	0,12	0,12	0,82	0,82	2,43	0,91	36,55	20,36	97,95	66,93
1966	13,21	3,13	2,17	7,5	4,53	6,09	38,74	16,95	73,3	27,84	26,75	8,05
1967	27,84	2,49	1,06	2,38	14,61	4,51	18,14	9,45	26,4	86,66	41,44	32,66
1968	1,6	1,02	1,31	1,79	5,65	16,52	32,66	8,7	3,72	3,72	3,27	0,59
1969	3,23	0,52	0,02	0,02	0,02	1,39	9,66	19,88	16,71	19,19	4,45	0,6
1970	2,24	7,95	1,64	1,86	2,02	2,47	12,21	12,98	9,53	2,72	12,64	9,47
1971	2,99	2,17	2,17	11,9	10,2	21,2	20,21	13,22	12,79	2,53	8,23	3,32
1972	3,76	3,32	0,35	11,98	10,37	6,39	5,39	1,23	19,7	46,92	51,53	14,84
1973	8,27	7,95	7,77	11,9	10,2	21,2	12,1	12,8	19,7	29,7	120,31	82,26
1974	8,27	7,95	7,77	11,9	10,2	51,04	12,1	12,8	19,7	29,7	32,1	18,6
1975	19,86	16,1	16,57	19,39	20,71	43,74	13,31	10,44	97,95	52,03	13,6	4,82
1976	8,37	7,95	7,77	11,9	10,2	2,73	8,68	4,16	1,36	7,15	8,68	0,52
1977	8,27	7,95	7,77	11,9	10,2	21,2	12,1	12,17	6,98	11,42	33,83	24,8
1978	15,77	12,49	14,13	14,95	14,95	18,24	1,09	14,81	2,21	30,38	5,84	2,61
1979	4,99	5,67	11,77	11,77	11,77	23,56	23,56	33,08	7,27	84,45	34,16	24,44

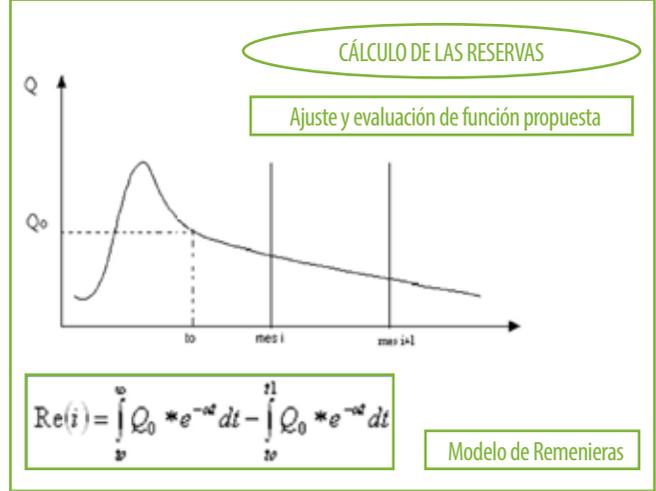
RESERVAS MENSUALES 1980-2000												
1980	16,64	8,64	4,68	32,62	20,9	58,07	99,62	130,39	0,00	118,67	178,51	136,67
1980	103,7	78,69	61,32	46,53	20,91	32,65	61,83	12,54	22,99	116,67	70,85	43,72
1980	26,55	101,87	11,07	96,61	84,69	7,35	84,69	33,76	54,2	32,29	21,6	1,55
1980	0,10	0,01	0,00	0,00	5,69	13,88	5,69	20,16	35,14	247,24	207,16	174,56
1980	146,26	122,55	103,86	87,02	73,33	7,77	73,33	24,93	81,1	90,86	189,1	107,5
1980	61,11	34,74	20,86	11,86	54,82	4,08	54,82	17,56	65,26	209,61	171,81	141,72
1980	116,16	95,21	79,55	5,49	1,88	5,36	1,88	3,91	0,00	13,67	19,01	108,12
1980	46,61	20,09	9,4	6,37	59,08	49,61	59,08	28,12	54,51	58,6	28	120,49
1980	85,36	60,47	43,8	99,12	0,00	6,18	0,00	12,22	29,05	182,49	136,79	103,49
1980	77,58	58,15	44,82	33,6	25,42	19,05	25,42	10,35	51,25	46,12	65,34	52,61
1980	42,06	33,63	27,48	13,82	10,69	31,93	10,69	2,56	9,07	9,54	1,92	4,38
1980	1,83	1,17	0,59	0,28	1,7	21,32	1,7	16,15	24,44	11,14	10,51	2,51
1980	29,02	27,77	26,65	4,84	20,18	133,79	20,18	27,15	69,85	340,01	236,17	165,98
1980	115,29	80,08	56,94	39,55	0,56	0,25	0,56	25,86	97,41	35,97	12,85	4,75
1980	32,72	22,77	16,42	11,43	11,89	11,07	11,89	12,91	34,48	91,6	58,44	37,83
1980	54,54	49,62	45,56	41,45	18,67	5,1	18,67	54,38	27,81	24,52	9,1	3,23
1980	1,11	0,38	0,14	17,06	145,84	141,41	145,84	8,56	29,05	14,35	3,16	0,73
1980	0,16	0,04	0,01	0,00	6,11	6,58	6,11	32,56	12,17	22,25	3,08	0,43
1980	0,06	0,01	0,00	0,00	9,18	3,52	9,18	0,53	0,21	103,39	83,72	68,26
1980	55,28	44,76	36,99	29,96	24,42	19,78	24,42	4,32	50,13	198,82	87,14	39,22
1980	17,19	7,53	7,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	200,40	138,47	21,62



**Figura 5:** Variación mensual de reservas de agua, río Purapel



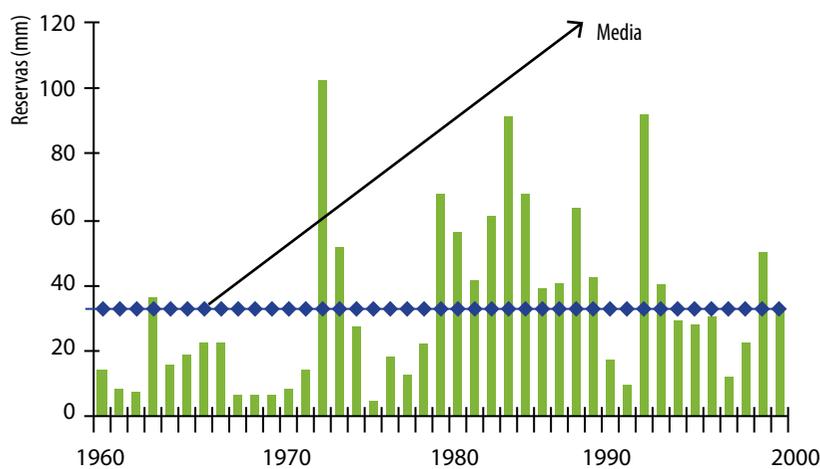
**Figura 6:** Análisis de variación de reservas río Purapel



**Recuadro 5:** Reservas mensuales del río Purapel en los períodos 1960 – 1979 y 1980-2000

VALORES EXTREMOS DE LAS RESERVAS													
DÉCADA		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
60	Mín.	0,335	0,123	0,02	0,02	0,642	0,642	1,952	0,912	3,699	0,985	3,268	0,591
	Máx.	29,8	14,3	8,597	11,26	16,74	16,52	38,72	24,86	252,6	86,66	97,95	98,32
	Med-	10,12	3,13	2,17	3,37	5,37	7,62	14,19	11,67	53,71	22,75	27,53	23,11
	C.V.	14,31	7,92	4,78	4,35	6,58	7,95	10,86	4,27	100,9	26,19	28,56	48,72
70	Mín.	2,241	3,175	0,347	1,861	2,024	2,468	1,091	1,225	1,358	2,53	8,226	0,518
	Máx.	15,77	16,1	16,57	19,39	20,71	51,1	23,56	33,08	97,95	84,45	120,3	82,26
	Med-	8,27	7,95	7,77	11,99	10,16	21,17	12,06	12,76	19,73	29,7	32,09	18,56
	C.V.	6,92	4,62	6,64	3,47	5,83	18,3	5,2	7,05	61,11	29,35	41,66	35,21
80	Mín.	0,101	0,007	5E-04	3E-04	1,879	4,076	3,393	3,908	0,003	13,67	21,6	1,546
	Máx.	146,3	122,5	103,9	96,91	84,69	58,07	99,62	130,4	81,1	247,2	189,1	174,6
	Med-	68,01	58,04	37,94	41,95	34,67	20,04	31,96	29,39	39,35	111,6	108,8	99,04
	C.V.	32	30,03	32,45	36,44	27,5	19,02	31,12	45,58	18,34	56,25	52,34	27,26
90	Mín.	0,055	0,007	0,001	1E-04	1,697	0,249	1,337	0,535	0,205	11,14	1,923	0,426
	Máx.	115,3	80,08	56,94	41,45	145,8	141,4	53,99	54,38	97,41	340	236,2	166
	Med-	32,21	26,02	21,08	15,84	24,92	37,48	14,75	18,5	35,46	85,16	50,61	32,73
	C.V.	40,09	27,88	20,97	16,19	74,85	76,86	18,28	15,18	24,88	136,4	106,6	83,25

**Figura 7:** Reservas finales versus reservas medias en el río Purapel.



1955 contaba con un 63% de bosque nativo y que no había plantaciones de especies exóticas. A partir de 1978 la situación vegetal varió y se incrementaron las plantaciones de especies exóticas, especialmente de pino con un 19%. Ya en 1997 se calculó más de un 50% de plantaciones de pino, mientras que el bosque nativo quedó relegado a apenas un 19% (ver *Figura 4*)

### Variación de las reservas de agua

En la cuenca del río Purapel claramente hubo una sustitución del bosque nativo. Hubo una alteración en la cobertura de suelo y se cambió un bosque nativo por una plantación exótica de alto crecimiento. Para estudiar las reservas de agua de la cuenca se confeccionaron las curvas de descarga a partir de los limnigramas y finalmente se obtuvieron los hidrogramas (ver *Figura*

*“La precipitación es la variable más influyente en el comportamiento de las reservas y parecería que la existencia de masas forestales incide en una mayor capacidad de almacenamiento de la cuenca.”*

5). Para lo anterior, la metodología para el cálculo de las reservas respondió a una función del modelo de Remenieras, cuyo resultado, observado en la *Figura 6*, da cuenta del segundo punto de inflexión de la curva de bajada, a partir de donde comienza a hablarse de caudales recesivos.

### Conclusiones del estudio del río Purapel

Las tablas de los *Recuadros 2 y 3* demuestran una alta

variabilidad en el volumen de almacenaje de las reservas del río. El gráfico de la *Figura 7*, en tanto, da cuenta de las reservas anuales, que evidencia que en los años '80 se presentan los mayores valores de almacenaje de la cuenca. Considerando que desde 1955 hasta 2000 hubo un fuerte cambio en el uso del suelo, se sigue demostrando que el mayor cambio analizado fue en las lluvias.

A través del estudio se tiende a concluir que en realidad es la lluvia la que más afecta las reservas de aguas subterráneas y no tanto la vegetación y uso de suelo. Considerando que la plantaciones que se hicieron fueron muy demandantes de agua, aun así las reservas no mostraron ese comportamiento.

Como conclusiones de esta investigación puede establecerse que la mayor reserva se registró en 1992 y la mínima se registró en 1998. A su vez, según la prueba U de Mann-Whitney, existen diferencias entre la década de 1980 y las restantes, por lo que al comparar los periodos definidos se aprecia diferencia entre ambos.

La precipitación es la variable más influyente en el comportamiento de las reservas y parecería que la existencia de masas forestales incide en una mayor capacidad de almacenamiento de la cuenca.

# Estimación de flujos de evaporación desde napas someras y del contenido de humedad del suelo utilizando métodos distribuidos de temperatura



Francisco Suárez\*  
(y otros autores\*\*)

Estudio presentado durante la Jornada Técnica Alhsud Chile: "Métodos de terreno y numéricos para la caracterización de la recarga y de la ocurrencia en agua subterránea".

\* Francisco Suárez es ing. civil hidráulico PUC, mag. en Ciencias de la Ingeniería PUC (2006) y Ph.D. en Hidrogeología U. of Nevada (2010). Es director de Alhsud Chile y profesor asociado de la PUC.

\*\*Investigadores:

Magdalena Lagos. Ing. Proyectos, Hidrogeología-DICTUC.

José L. Serna. Profesor Universidad Alas Peruanas.

José F. Muñoz. Profesor titular, PUC.

La evaporación desde napas someras es un componente importante del balance hídrico de muchas regiones, sin embargo, es un flujo complejo de medir. Por tanto, es importante evaluar nuevos métodos para cuantificar este proceso hidrológico.

En este estudio se propone un método para determinar tasas de evaporación desde napas someras, que combina el método activo para determinar contenidos de humedad en suelos – método AHFO, por sus siglas en inglés– con modelación numérica en la zona vadosa.

Aquí, el método AHFO permitió estimar contenidos de humedad con una resolución espacial de ~6.5 mm y con un error de 0.026 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. El modelo numérico, en tanto, arrojó como resultado un perfil del contenido de humedad ligeramente diferente que el obtenido experimentalmente, en

el cual las diferencias más grandes ocurrieron cerca de la superficie del suelo.

Debido a lo anterior, se requiere de una mejor precisión en la determinación de las propiedades hidrodinámicas del suelo y en la curva de calibración del método AHFO para lograr una estimación exitosa del contenido de humedad. Las escalas espaciales alcanzadas con el método AHFO son una ventaja importante del método propuesto, el cual que debe ser explorado con mayor profundidad para mejorar el análisis presentado en este trabajo.

## Introducción

Los flujos de evaporación en zonas donde existen napas someras son un componente importante del balance hídrico y dependen fuertemente del contenido de humedad en los primeros centímetros del suelo (Assouline et al., 2013; 2014; Hernández-López et al., 2016). Existen varias metodologías

para determinar el  $\theta$  en suelos (Topp et al., 1980; Klute, 1994; Desilets et al., 2010; Cristi et al., 2016). En la última década, las mediciones distribuidas de temperatura usando cables de fibra óptica (FO-DTS, por sus siglas en inglés) han demostrado que permiten obtener de manera indirecta flujos de agua y los perfiles del  $\theta$  (Sayde et al., 2010, 2014; Steele-Dunne et al., 2010; Ciocca et al., 2012; Striegl & Loheide, 2012; Benitez-Buelga et al., 2014; 2016; Dong et al., 2015; 2016).

Las mediciones de temperatura a través del método FO-DTS están basadas en la dispersión de la luz a lo largo de una fibra óptica, con resoluciones espaciales de 0.25-1.0 m, resoluciones temporales de 1-60 s, y con una precisión de  $\pm 0.01^\circ\text{C}$  en cables de hasta 10 kilómetro de largo (Hausner et al., 2011; Suárez et al., 2011a,b). Dos métodos han sido propuestos para cuantificar

el  $\theta$  usando FO-DTS (Steele-Dunne et al., 2010; Sayde et al., 2010): el método pasivo y el método activo (AHFO, por sus siglas en inglés).

Esta investigación se enfoca en el método AHFO, debido a que no depende de las condiciones meteorológicas de la zona de interés, sino que requiere del uso de elementos metálicos dentro del cable de fibra óptica, donde a partir de un potencial eléctrico se calienta el cable y la respuesta térmica de éste es relacionada con el  $\theta$  (Sayde et al., 2010; Ciocca et al., 2012; Striegl y Loheide, 2012; Serna et al., 2017). La ventaja del método AHFO radica en que solamente se requiere el cable de fibra óptica, que permite aplicar un pulso de calor y monitorear la disipación de energía térmica simultáneamente, con solo una calibración para todas las mediciones de temperatura y con una excelente resolución espacial.

Con el propósito de investigar nuevas técnicas de medición de la evaporación real, este estudio explora la aplicabilidad y los desafíos asociados al uso del método AHFO para determinar  $\theta$  y para utilizar esta información para inferir las tasas de evaporación real desde napas someras, donde la zona vadosa se encuentra hidráulicamente conectada entre la superficie del suelo y la profundidad a la cual se encuentra la napa, donde los gradientes de presión de vapor y los flujos debido a gradientes térmicos son despreciables (Nasrallah y Perre, 1988; Prat, 2002).

### **MATERIALES Y MÉTODOS** **Propiedades físicas e hidrodinámicas del suelo**

La distribución granulométrica del suelo empleado en este estudio fue realizada a través de un tamizado (Klute, 1994) y se utilizó para determinar su textura y

uniformidad. La curva de retención hidráulica se estimó experimentalmente a través del método de la evaporación (Peters y Durner, 2008) y los parámetros del modelo de van Genuchten (1980) fueron ajustados para ajustar los resultados del modelo a los datos experimentales.

Mediante el modelo de Mualem (Assouline y Or, 2013) fue representada la curva de conductividad hidráulica, la cual combina los parámetros de la curva de retención hidráulica y la conductividad hidráulica saturada para representar la conductividad hidráulica no saturada.

### **Determinación del contenido de humedad**

El método AHFO ha sido utilizado exitosamente para monitorear  $\theta$  a lo largo de cables de fibra óptica (Sayde et al., 2010, 2014; Ciocca et al., 2012; Striegl y Loheide, 2012; Serna et al., 2017). En este método, se correlaciona

empíricamente el  $\theta$  con la respuesta térmica del suelo frente a la aplicación de un pulso de calor, a través de un parámetro denominado temperatura acumulada,  $T_{cum}$  (Sayde et al., 2010):

$$T_{cum} = \int_0^{t_0} \Delta T(t) dt \quad (1)$$

Donde  $\theta$   $T(t) = T(t) - T(t = 0)$  es la diferencia de temperatura en una posición específica del cable entre el tiempo  $t$  y el tiempo donde se inició el pulso de calor ( $t = 0$ ) y  $t_0$  es el tiempo total de integración. Dado que los sistemas FO-DTS permiten monitorear la temperatura a lo largo de cables de fibra óptica, es posible calcular directamente  $T_{cum}$  a partir de mediciones de estos sistemas. En este trabajo, se correlacionó  $\theta$  y  $T_{cum}$  utilizando una expresión potencial (Serna et al., 2017):

donde  $\theta_r$  y  $\theta_s$  son los contenidos de humedad volumétricos residual y de saturación, respectivamente, los cuales son inferidos a partir de los parámetros de la curva de retención hidráulica. Ya  $a$  y  $b$  son parámetros empíricos que se obtienen al ajustar las estimaciones del  $\theta$  en base a mediciones independientes de esta variable. Así, se utilizaron las mismas condiciones hidráulicas que en la investigación de Serna et al. (2017), por lo que los parámetros que definen la ecuación (2) fueron los encontrados por estos investigadores.

### Determinación de las tasas de evaporación utilizando modelos numéricos

En zonas donde existe conectividad hidráulica entre la napa y la superficie del suelo, la evaporación puede ocurrir en la superficie del suelo o dentro del perfil de suelo a través de un proceso difusivo de remoción de vapor de agua. En las experiencias realizadas en esta investigación, este segundo mecanismo fue despreciable, por lo tanto, el movimiento de agua en un medio poroso parcialmente saturado se representó a través de la ecuación de Richards

$$\theta = \begin{cases} \theta_r & aT_{cum}^b \leq \theta_r \\ aT_{cum}^b & \theta_r < aT_{cum}^b < \theta_s \\ \theta_s & aT_{cum}^b \geq \theta_s \end{cases} \quad (2)$$

(1931).

Para resolver esta ecuación, es necesario conocer las propiedades hidrodinámicas del suelo, para lo cual se utilizó el modelo Hydrus1D (Šimůnek et al., 2016) con el objetivo de resolver numéricamente la ecuación de flujo, donde las condiciones de borde del modelo fueron especificadas en base a las condiciones de borde observadas en las experiencias de laboratorio.

La Figura 1 presenta un esquema conceptual de la metodología propuesta en este estudio. Un sistema DTS de alta resolución vertical se entierra en

el suelo (I) y se utiliza para medir el perfil de temperatura en el suelo (II). Luego, se aplica un pulso de calor en el cable de fibra óptica haciendo circular una corriente eléctrica a través de él, y el aumento de temperatura ( $\theta T$ ) se registra a distintas profundidades (III). Este  $\theta T$  se utiliza para calcular  $T_{cum}$  a través de la ecuación (1) (IV).

Luego, el perfil  $\theta$  del se estima utilizando la ecuación (2) (V). Finalmente, las propiedades hidrodinámicas del suelo y el perfil del  $\theta$  son utilizados como datos de entrada para resolver numéricamente la ecuación de Richards (1931), y un ejercicio de modelación inversa permite encontrar las tasas de evaporación (VI) al ajustar el perfil del  $\theta$  observado y simulado.

### Instalación experimental

La Figura 2 muestra un esquema de la instalación experimental que se construyó para evaluar el método de determinación de tasas de evaporación a partir de mediciones distribuidas de temperatura combinadas con modelación inversa.

La instalación consta de (1) una columna de suelo instrumentada con sensores TDR (time-domain reflectometry), donde se puede fijar el nivel de la napa y medir las tasas de evaporación; además de (2) un sistema FO-DTS de alta resolución vertical, que tiene un cable de fibra óptica con elementos conductores; y finalmente, de (3) un sistema eléctrico que permite circular una corriente eléctrica por el cable de fibra óptica.

Figura 1: Modelo conceptual de la metodología propuesta.

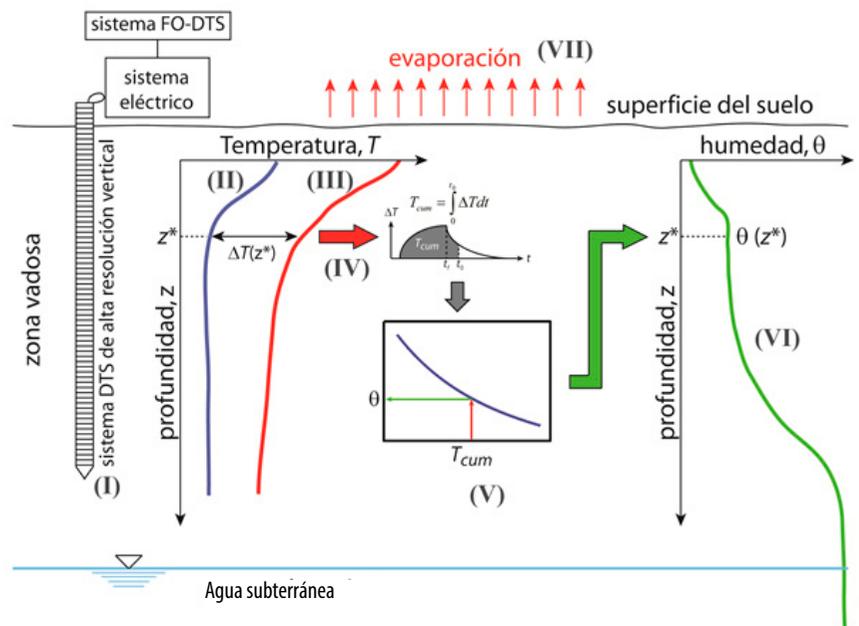
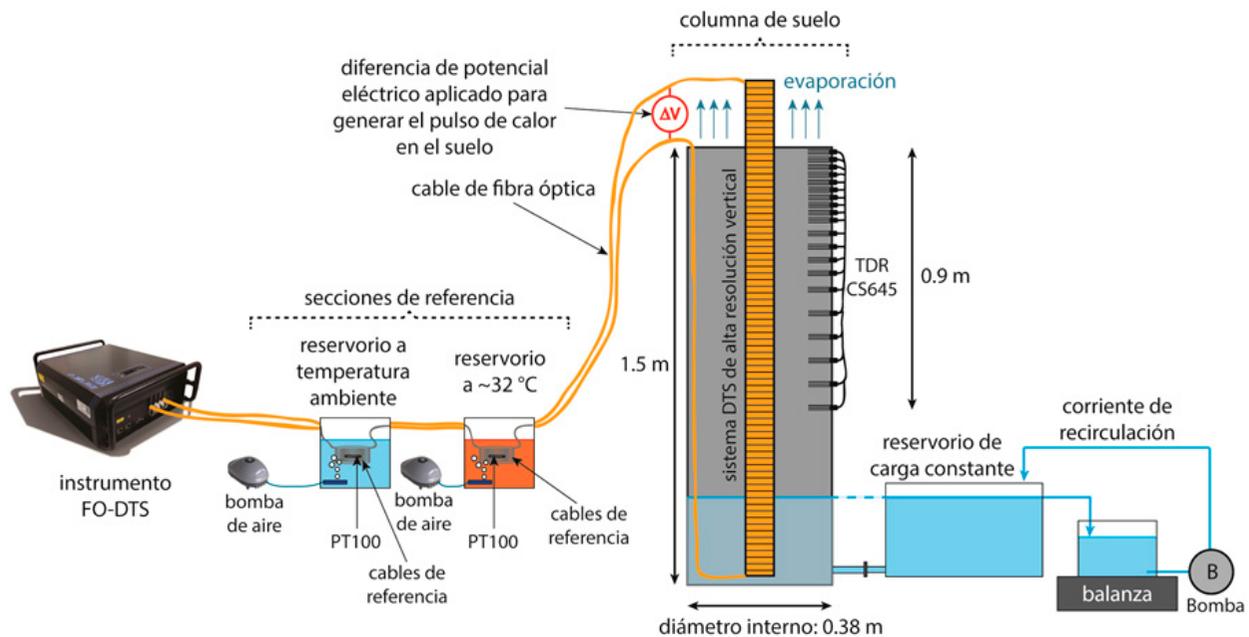


Figura 2: Esquema de la instalación experimental utilizada en esta investigación.



### Experiencias en columnas de suelo y condiciones de modelación numérica

En las experiencias presentadas en este estudio, la napa fue fijada a una profundidad de 1.2 m y la tasa de evaporación medida en el laboratorio fue de 2.2 mm día<sup>-1</sup>. Cada experiencia se realizó en régimen permanente y contó con tres repeticiones. Las temperaturas fueron medidas con una resolución espacial de ~6.5 mm en la dirección vertical, con una resolución temporal de 5 s y una resolución térmica de 0.3 °C, que permiten aplicar correctamente el método AHFO (Serna et al., 2017).

En la modelación numérica se utilizó un dominio de 1.5 m de profundidad y una discretización de 5 mm. La tasa de evaporación medida en el laboratorio fue empleada como

condición de borde superior, mientras que el nivel de la napa fijó la carga hidráulica en el fondo del dominio numérico. La condición inicial del modelo correspondió a un perfil de equilibrio hidráulico. La modelación se realizó en régimen transiente hasta alcanzar el régimen permanente. Todos los resultados presentados en este trabajo corresponden al régimen permanente alcanzado al finalizar las simulaciones.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Propiedades físicas e hidrodinámicas del suelo

El suelo empleado en este estudio correspondió a una arena altamente uniforme (96% arena; 2% limo; 2% arcilla; con coeficientes de uniformidad y curvatura de 2.7 y 1.2, respectivamente) (USDA, 2014). Los parámetros de la curva de retención hidráulica

que se obtuvieron fueron:  $\theta_r = 0.146 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ;  $\theta_s = 0.458 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ; inverso de la presión de burbujeo,  $\theta = 1.14 \text{ m}^{-1}$ ;  $n = 4.937$  (parámetro empírico); y conductividad hidráulica saturada,  $K_s = 0.76 \text{ m día}^{-1}$ . Cuando se asumió que el parámetro de conectividad de poros,  $l = 0.5$  (Mualem, 1976), el coeficiente de determinación del ajuste de la curva de retención de humedad fue de  $r^2 = 0.99$ . Los parámetros obtenidos para la curva de retención hidráulica también concuerdan con valores esperados para una arena (Rawls et al., 1982; Twarakavi et al., 2010).

#### Determinación del contenido de humedad utilizando el método AHFO

Al utilizar los parámetros propuestos por Serna et al. (2017) para calcular el perfil del  $\theta$ , se obtuvo una raíz del error cuadrático medio

(RMSE) de 0.026 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> y un  $r^2 = 0.91$ . Al realizar la validación del método AHFO se obtuvieron errores que fluctuaron entre 0.040 y 0.080 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> al variar las condiciones hidráulicas del experimento.

Estos errores se pueden disminuir mejorando el sistema eléctrico –que mostró que la intensidad de corriente varió levemente al aplicar el pulso de calor–, utilizando sistemas FO-DTS que tengan un mejor desempeño que el empleado en esta investigación (e.g., ver Sayde et al., 2014), considerando el efecto de posibles heterogeneidades en la curva de calibración empleada para relacionar  $\theta$  y  $T_{\text{cum}}$  (Sayde et al., 2014; Benítez-Buelga, 2016), y también incorporando el efecto que pueden tener el espaciamiento del cable y la armadura de éste (Benítez-Buelga, 2014).

### Determinación de las tasas de evaporación utilizando modelos numéricos

La Figura 3 presenta el perfil experimental del  $\theta$  y perfiles del  $\theta$  simulados para distintas tasas de evaporación. Los perfiles simulados y observados para las condiciones experimentales (evaporación de 2.2 mm día<sup>-1</sup>) son levemente distintos, especialmente en la superficie del suelo y en la franja capilar. En la superficie del suelo,  $\theta$  el simulado es mayor que el observado, mientras que en la franja capilar, el  $\theta$  simulado es menor que el observado.

Las simulaciones bajo distintas tasas de evaporación muestran que a medida que aumenta la evaporación, el perfil  $\theta$  del se asemeja a los valores observados. Sin embargo, a pesar de que la precisión en la determinación del  $\theta$  a través del método AHFO es adecuada, la sensibilidad del método propuesto no es lo suficientemente fina como para determinar de manera precisa las tasas de evaporación. Es más, existe un umbral de evaporación (de 8 mm día<sup>-1</sup> en el caso presentado en la Figura 3) donde el perfil del  $\theta$  no se modifica a medida que se aumentan las tasas de evaporación.

Esta limitación probablemente se debe a que la modelación desprecia la existencia de gradientes de presión de vapor y flujos de agua debido a gradientes térmicos. Por lo tanto, para mejorar las estimaciones en las tasas de evaporación a través de esta metodología, es necesario emplear modelos numéricos más avanzados que resuelvan

Figura 3: Perfil del contenido de humedad observado experimentalmente y simulado para distintas tasas de evaporación.

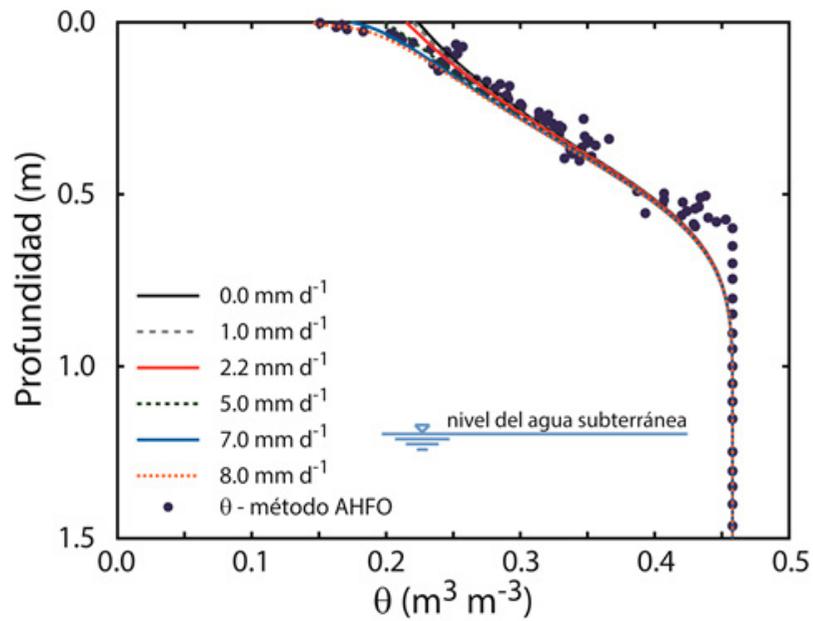
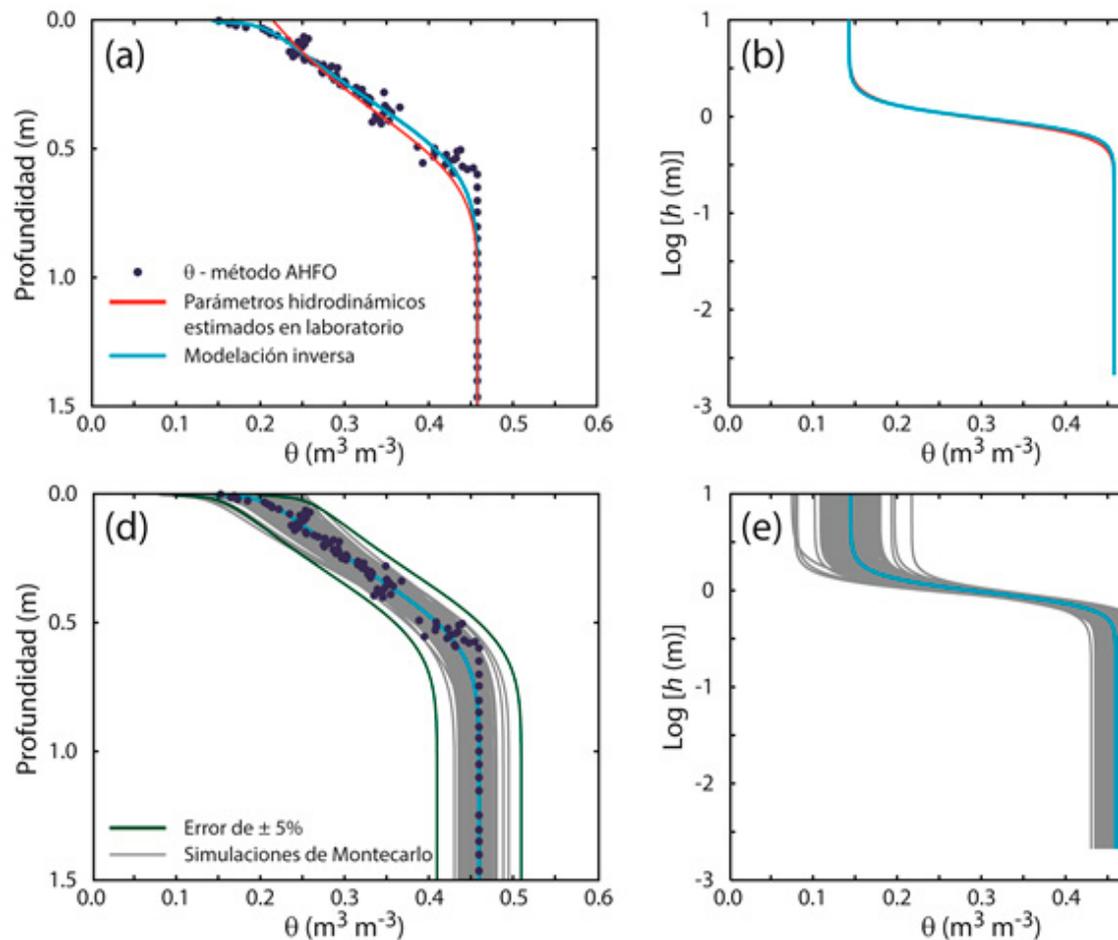


Figura 4: Resultados del análisis de incertidumbre a partir de modelación inversa y de simulaciones de Montecarlo.  $h$ : succión;  $K$ : conductividad



simultáneamente los flujos de agua líquida y de vapor de agua, acoplados con la transferencia de calor que ocurre en el subsuelo (e.g., ver Hernández-López et al., 2014, 2016).

La Figura 4 presenta un análisis de incertidumbre para explorar cuáles son los parámetros hidrodinámicos del suelo que más afectan la determinación de las tasas de evaporación a partir de la metodología propuesta. Este análisis se realizó a través de simulaciones de Montecarlo, donde se variaron los parámetros  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $n$  y  $l$ , mientras que  $\theta_s$  y  $K_s$  se asumieron constantes ya que están sujetos a una

incertidumbre menor en su determinación experimental.

Antes de realizar las simulaciones de Montecarlo, se ajustaron los parámetros de la curva de retención hidráulica a través de modelación inversa para representar de mejor manera el perfil del  $\theta$  obtenido experimentalmente.

Las Figuras 4 (a-c) muestran que al realizar la modelación inversa que permite obtener un perfil del  $\theta$  simulado más similar al experimental, la curva de retención hidráulica no varía significativamente, mientras que en la curva de conductividad hidráulica se observan cambios más relevantes. Estos cambios

están principalmente relacionados al parámetro  $l$ , el cual está asociado a la conectividad de poros, que es el único parámetro hidrodinámico que tiene una variación mayor que el 10% con respecto a su valor inicial.

Por otro lado, las simulaciones de Montecarlo muestran que en la zona cercana a la superficie del suelo es donde se espera tener errores mayores. Por lo tanto, para mejorar la precisión en la determinación de las tasas de evaporación, es necesario determinar con mayor precisión el parámetro  $l$ , que es el que genera una mayor sensibilidad de los resultados en la zona cercana a la superficie del suelo (ver Figuras 4 (d-f)).

### Conclusiones

Esta investigación presenta una metodología para determinar las tasas de evaporación combinando el método AHFO con modelación numérica en la zona vadosa para condiciones de napas someras, donde los gradientes de presión de vapor y de flujo de agua, debido a gradientes térmicos, son despreciables. Este método requiere la determinación de las propiedades hidrodinámicas del suelo, i.e., curva de retención hidráulica y conductividad hidráulica, para poder resolver la ecuación de flujo en un medio poroso parcialmente saturado.

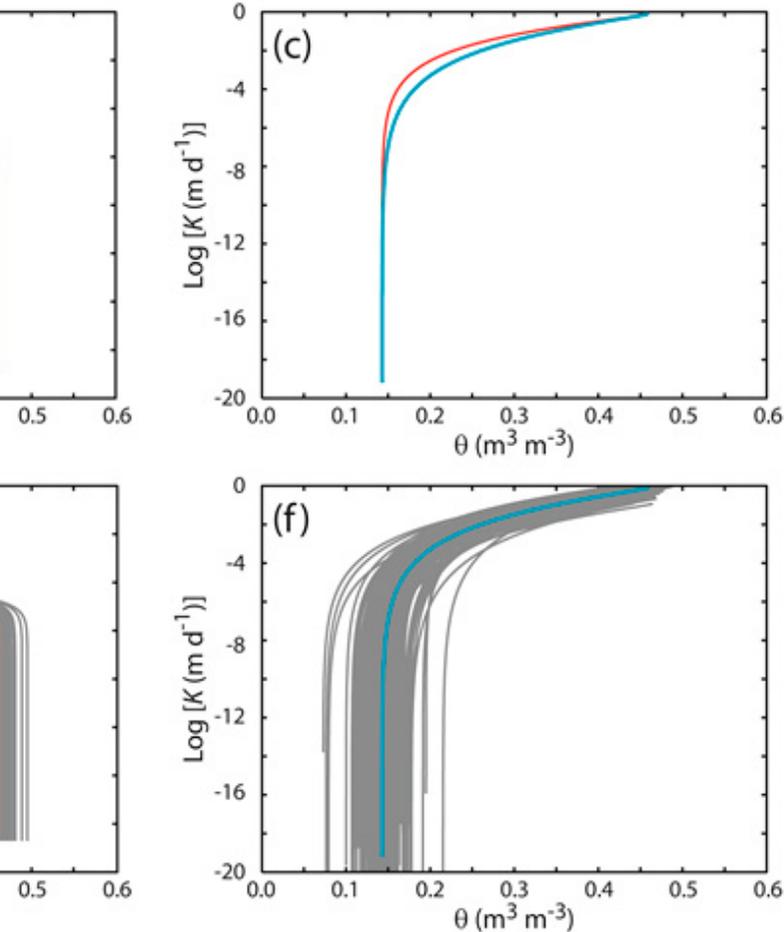
El método fue evaluado en una columna de suelo de laboratorio, donde se determinó el perfil del  $\theta$  a través del método AHFO con una precisión de  $0.026 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ( $r^2 = 0.91$ ). A través de modelación numérica,

y utilizando la tasa de evaporación observada en el laboratorio, se obtuvo un perfil de humedad levemente distinto que el observado experimentalmente, donde las mayores diferencias ocurrieron en la superficie del suelo.

A partir de un análisis de sensibilidad, se concluyó que a pesar de que la precisión en la determinación del  $\theta$  a través del método AHFO es adecuada, la sensibilidad del método no es lo suficientemente final como para determinar de manera precisa las tasas de evaporación. La principal limitación de la metodología propuesta está asociada a que se despreciaron los flujos de evaporación que ocurren debido a gradientes en la presión de vapor y de temperatura dentro de la columna de suelo.

No obstante, esta limitación puede ser superada si es que se utilizan modelos numéricos más avanzados que resuelvan simultáneamente los flujos de agua líquida y de vapor de agua acoplados con la transferencia de calor que ocurre en el subsuelo. Además, un análisis de incertidumbre mostró que es necesario determinar las propiedades hidrodinámicas con gran precisión, especialmente el parámetro de conectividad de poros,  $l$ , que tiene una influencia importante en el perfil de humedad que ocurre en la zona cercana a la superficie del suelo. Por otro lado, una de las mayores ventajas que presenta el método propuesto es la alta resolución espacial en la determinación del perfil hídrico del suelo. ☺

d hidráulica.



## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile por financiar el proyecto CONICYT/FONDECYT/1170850, al Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CONICYT/FONDAP/15110020) y al Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CONICYT/FONDAP/15090013) por apoyar este trabajo.

## Referencias

- Assouline, S., y D. Or. 2013. Conceptual and parametric representation of soil hydraulic properties: A review. *Vadose Zone Journal*, 12(4), doi:10.2136/vzj2013.07.0121.
- Assouline, S., S.W. Tyler, J.S. Selker, I. Lunati, C.W. Higgins, y M.B. Parlange. 2013. Evaporation from a shallow water table: Diurnal dynamics of water and heat at the surface of drying sand. *Water Resources Research*, 49(7), 4022-4034.
- Assouline, S., K. Narkis, R. Gherabli, P. Lefort, y M. Prat. 2014. Analysis of the impact of surface layer properties on evaporation from porous systems using column experiments and modified definition of characteristic length. *Water Resources Research*, 50(5), 3933-3955.
- Benítez-Buelga, J., C. Sayde, L. Rodríguez-Sinobas, y J.S. Selker. 2014. Heated fiber optic distributed temperature sensing: A dual-probe heat-pulse approach. *Vadose Zone Journal*, 13(11), doi:10.2136/vzj2014.02.0014.
- Benítez-Buelga, J., L. Rodríguez-Sinobas, R. Sánchez-Calvo, M. Gil-Rodríguez, C. Sayde, y J.S. Selker. 2016. Calibration of soil moisture sensing with subsurface heated fiber optics using numerical simulation. *Water Resources Research*, 52(4), 2985-2995.
- Ciocca, F., I. Lunati, N. Van de Giesen, y M.B. Parlange. 2012. Heated optical fiber for distributed soil-moisture measurements: A lysimeter experiment. *Vadose Zone Journal*, 11(4), doi:10.2136/vzj2011.0199.
- Cristi, F., V. Fierro, F. Suárez, J.F. Muñoz, y M.B. Hausner. 2016. A TDR-waveform approach to estimate soil water content in electrically conductive soils. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 160-168.
- Desilets, D., M. Zreda, y T.P.A. Ferré. 2010. Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resources Research*, 46(11), W11505.
- Dong, J., S.C. Steele-Dunne, T.E. Ochsner, y N. van de Giesen. 2015. Determining soil moisture by assimilating soil temperature measurements using the Ensemble Kalman Filter. *Advances in Water Resources*, 86, 340-353.
- Dong, J., S.C. Steele-Dunne, T.E. Ochsner, y N. van de Giesen. 2016. Estimating soil moisture and soil thermal and hydraulic properties by assimilating soil temperatures using a particle batch smoother. *Advances in Water Resources*, 91, 104-116.
- Hausner, M.B., F. Suárez, K.E. Glander, N. van de Giesen, J.S. Selker, y S.W. Tyler. 2011. Calibrating single-ended fiber-optic Raman spectra distributed temperature sensing data. *Sensors*, 11(11), 10859-10879.
- Hernández-López, M.F., J. Gironás, I. Braud, F. Suárez, y J.F. Muñoz. 2014. Assessment of evaporation and water fluxes in a column of dry saline soil subject to different water table levels. *Hydrological Processes*, 28(10), 3655-3669.
- Hernández-López, M.F., I. Braud, J. Gironás, F. Suárez, y J.F. Muñoz. 2016. Modelling evaporation processes in soils from the Huasco salt flat basin, Chile. *Hydrological Processes*, 30(25), 4704-4719.
- Klute, A. 1994. Methods of soil analysis, part 1: physical and mineralogical methods, *Agronomy Series*, 9, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Lagos, M. (2017). Challenges in determining soil evaporation fluxes using distributed temperature sensing methods in the presence of shallow groundwater tables. Tesis de Magíster, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Nasrallah, S.B., y P. Perre. 1988. Detailed study of a model of heat and mass transfer during convective drying of porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 31(5), 957-967.
- Peters, A., y W. Durner. 2008. Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, 356(1), 147-162.
- Prat, M. 2002. Recent advances in pore-scale models for drying of porous media. *Chemical Engineering Journal*, 86(1), 153-164.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek, y K.E. Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers*, 25(5), 1316-1320, doi:10.13031/2013.33720.
- Richards, L.A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Journal of Applied Physics*, 1(5), 318-333.
- Sayde, C., C. Gregory, M. Gil-Rodríguez, N. Tuffillaro, S. Tyler, N. van de Giesen, M. English, R. Cuenca, y J.S. Selker. 2010. Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. *Water Resources Research*, 46(6), W06201.
- Sayde, C., J.B. Buelga, L. Rodríguez-Sinobas, L.E. Houry, M. English, N. van de Giesen, y J.S. Selker. 2014. Mapping variability of soil water content and flux across 1-1000 m scales using the Actively Heated Fiber Optic method. *Water Resources Research*, 50, 1702-7317.
- Serna, J.L., J.F. Muñoz y F. Suárez. 2017. Evaluación del método activo para determinar contenidos de humedad en suelos. *Ingeniería del Agua*, 21(3), 165-178.
- Šimůnek, J., M.T. van Genuchten, y M. Šejna. 2016. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*, 15(7), doi:10.2136/vzj2016.04.0033.
- Steele-Dunne, S.C., M.M. Rutten, D.M. Krzeminska, M. Hausner, S.W. Tyler, J. Selker, T.A. Bogaard, y N.C. van de Giesen. 2010. Feasibility of soil moisture estimation using passive distributed temperature sensing. *Water Resources Research*, 46(3), W03534.
- Striegl, A.M., y S.P. Loheide II. 2012. Heated distributed temperature sensing for field scale soil moisture monitoring. *Groundwater*, 50(3), 340-347.
- Suárez, F., J.E. Aravena, M.B. Hausner, A.E. Childress, y S.W. Tyler. 2011a. Assessment of a vertical high-resolution distributed-temperature-sensing system in a shallow thermohaline environment. *Hydrology and Earth Systems Science*, 15(3), 1081-1093.
- Suárez, F., M.B. Hausner, J. Dozier, J.S. Selker, y S.W. Tyler. 2011b. Heat transfer in the environment: Development and use of fiber-optic distributed temperature sensing, In *Developments in Heat transfer*, Intech.
- Topp, G.C., J.L. Davis, y A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16(3), 574-582.
- Twarakavi, N.K., J. Šimůnek y M. Schaap. 2010. Can texture-based classification optimally classify soils with respect to soil hydraulics?. *Water Resources Research*, 46(1), W01501.
- United States Department of Agriculture (USDA). 2014. Keys to soil taxonomy (Twelfth ed.), United States of America: Natural Resources Conservation Service.
- van Genuchten, M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.

# Depósitos de relaves: Una perspectiva hidrogeológica para estimar infiltraciones y aplicación mediante modelo numérico 3D



*Rodrigo Herrera.*

*Consultor Senior en Modelación,  
Arcadis Chile,*



*Jose Lagos.*

*Jefe Especialidad Geología, Arcadis  
Chile,*



*Cristian Ortiz*

*Gerente de Recursos Hídricos,  
Arcadis Chile.*

*Herrera R, Lagos J, Opazo T (2017). Using MODFLOW-USG to simulate the rise of an existing tailing storage facility and estimate transient seepage. In Proceedings of the MODFLOW & MORE 2017 Modeling for sustainability and adaptation. Colorado School of Mines, Golden, Colorado, United States of America, pp 298–301.*

Durante los últimos 10 años se ha observado un aumento de los problemas ambientales asociados a la operación de los depósitos de relaves (DR), lo que ha generado un incremento en la fiscalización por parte de las autoridades ambientales competentes. Esto se ha traducido en el desarrollo de programas de cumplimiento ambiental y multas para titulares de proyectos mineros, con montos nunca vistos en Chile, que en algunos casos superan los 12 millones de dólares.

Uno de los principales problemas detectados se relaciona con infiltraciones desde los DR, que superan largamente lo declarado en los procesos de evaluación ambiental de los proyectos, lo cual ha generado efectos no previstos sobre el entorno inmediato a los depósitos.

La gran mayoría de los proyectos mineros que incluyen DR en Chile se ubican en zonas áridas del

norte del país. En general, todos ellos comparten dos características: (1) la recarga natural del sistema hidrogeológico es baja en relación a los volúmenes que infiltran, y (2) durante la evaluación ambiental del proyecto, la cuantificación de la potencial infiltración hacia el subsuelo fue subestimada, tal como demuestran los planes de seguimiento ambiental y manifestaciones superficiales de dichas infiltraciones. En efecto, actualmente las estimaciones más recientes muestran valores de infiltración sustancialmente mayores para las fases de operación de los depósitos.

Las causas que han provocado las discrepancias entre el caudal de infiltración estimado en la evaluación ambiental y la real son diversas. El análisis del funcionamiento hidrogeológico de un número significativo de DR ha permitido identificar las siguientes:

- Estimación de tasas de infiltración a través del

uso de balances de agua del DR, cuyo objetivo es en realidad el diseño de sistemas de recirculación de agua, por lo tanto, la infiltración tiende a minimizarse para evitar subdimensionar la capacidad de las bombas (objetivos diferentes);

- Definición de propiedades hidráulicas (ejemplo: permeabilidad) del suelo de fundación (típicamente depósitos aluviales) a partir de testeos hidráulicos (ej: ensayos Lefranc) que no son representativos de la transmisividad real del subsuelo, a una escala espacial comparable con la del depósito (escala kilométrica), subestimando su valor en hasta 50 veces;
- Errónea definición del caso conservador en la evaluación ambiental (supuesta mayor infiltración). En general, esta condición ha sido definida como la capacidad máxima del depósito (final del periodo útil), pero en la práctica es el inicio de la operación la etapa más crítica, ya que, es cuando la laguna se encuentra más cercana al terreno natural y el relave tiene menor densidad, y por lo tanto mayor permeabilidad;
- Estimación de infiltración basada en modelos en régimen estacionario, configurados para el supuesto caso conservador (erróneo). Esta forma de abordar el problema no reconoce la naturaleza

*Se concluye que el uso de una tecnología de modelación, típicamente aplicada a la hidrogeología, permitió calibrar la permeabilidad inicial del relave, lo cual es un avance significativo en este campo. Esta implementación tiene el potencial de ayudar a generar estrategias de depositación de relaves condicionadas por criterios ambientales, permitiendo que los Depósitos de Relaves realmente se transformen en IGM o IMR.*

transiente del fenómeno, especialmente en relación al cambio temporal que sufren las propiedades hidráulicas del relave (disminución de permeabilidad en el tiempo) y la relación entre la geografía de la cubeta natural y la depositación del relave;

- Depositación de relaves no se ajusta a lo ambientalmente evaluado, a saber:
  - Ingreso de una mayor cantidad de agua junto al relave, debido a que la proporción de sólidos ( $C_p$ ) es inferior a lo considerado en el diseño de operación en régimen permanente. Lo anterior es esperable debido al ajuste inicial de los parámetros de operación de las plantas, durante su puesta en marcha,
  - Los sistemas de recirculación de agua superficial no son capaces de mover

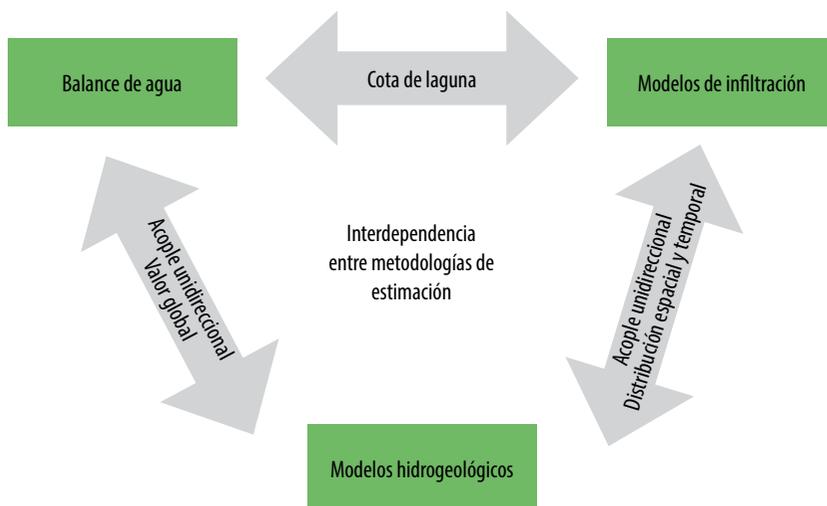
el agua de la laguna eficientemente, ya que se encuentran diseñados para una condición con una laguna de menor tamaño, generándose infiltración.

En este contexto, **mejorar la metodología de cuantificación de la estimación de infiltraciones se torna muy relevante**, tanto para propósitos operacionales –mejorando la eficiencia del uso del agua, especialmente en climas áridos–; como también para propósitos ambientales, minimizando los efectos no deseados sobre las aguas subterráneas para los DR existentes y los futuros.

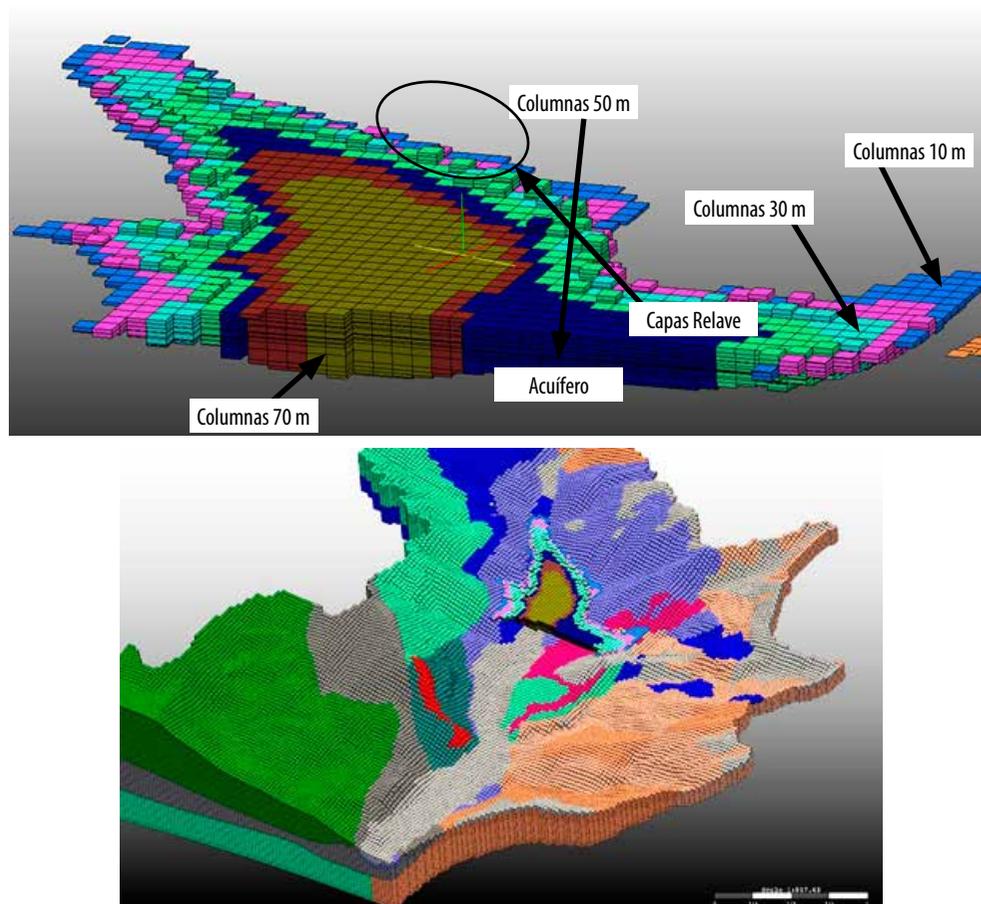
El principal problema es la imposibilidad de medición del fenómeno y por tanto, el mayor desafío radica en cómo mejorar la metodología de estimación de la infiltración. En términos generales, las metodologías disponibles se pueden clasificar en dos grupos:

- Estimaciones Indirectas: La estimación de infiltración se hace a partir de otras variables, como es el caso de los balances de aguas, donde la infiltración proviene de la diferencia entre entradas, salidas y el agua almacenada en el depósito. Otra alternativa consiste en un análisis hidrogeológico, en el cual se revisan las fluctuaciones del nivel de agua subterránea circundante al DR, y a través de modelación inversa estimar cuál sería la recarga necesaria para producir dicho efecto (este enfoque se limita a depósitos existentes).
- Estimaciones directas: Se simula el proceso físico que controla la infiltración. En este caso, el uso de modelos numéricos 1D o 2D es una práctica habitual y se denominan modelos de infiltración. La modelación puede considerar condiciones de flujo completamente saturado o variablemente saturado. Además, puede considerar la dependencia entre las propiedades hidráulicas del relave y las tasas de infiltración, debido al proceso de consolidación de éste. La *Figura 1* muestra la relación que existe entre las metodologías comentadas. Desde el punto de vista hidrogeológico, las infiltraciones desde DR se han tratado típicamente como un dato externo. Este input es sin duda de relevancia para la modelación hidrogeológica,

**Figura 1:** Interrelación entre metodologías de estimación de infiltraciones para DR.



**Figura 2:** Modelo de infiltración DR: enfoque integrado acuífero-depósito.



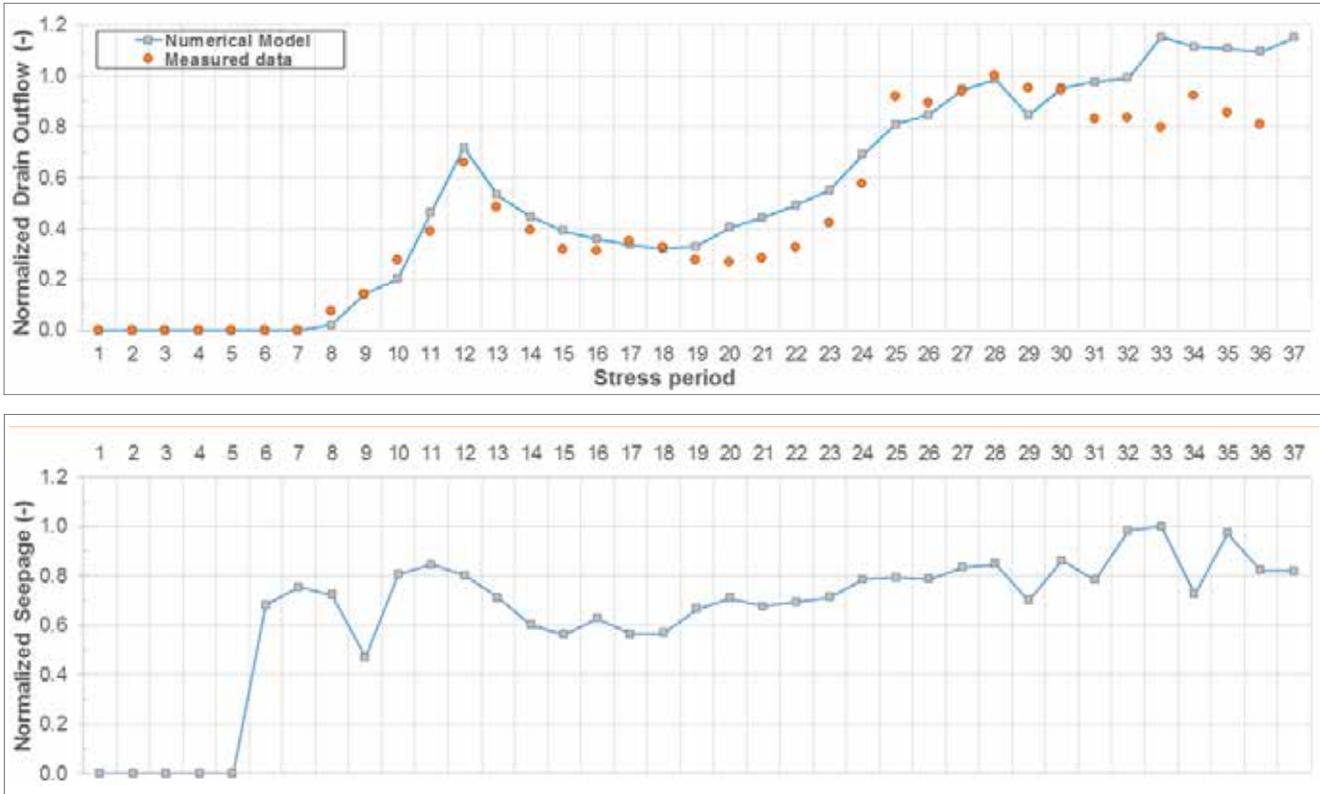
por el hecho de que la recarga antrópica (DR) puede ser igual o mayor a la recarga natural del sistema hidrológico, convirtiéndose en un elemento fundamental para el balance y la calibración de los modelos hidrogeológicos (acuíferos). Teniendo esto en mente, el equipo multidisciplinario de Arcadis desarrolló una nueva metodología que combina dos enfoques: modelo de infiltración y modelo hidrogeológico, incluyendo además una representación –si bien simplificada del proceso de consolidación del relave– funcional al objetivo buscado.

La integración de ambas metodologías se plasmó sobre un modelo hidrogeológico numérico 3D, el cual incorpora una completa representación del acuífero subyacente al DR, junto con una representación explícita del depósito en sí mismo, convirtiéndose en una herramienta de simulación integrada acuífero-depósito.

El modelo fue desarrollado y calibrado empleando información real de un depósito actualmente en operación. Consta de 37 capas: las 5 inferiores se utilizan para alojar al acuífero; y las 32 superiores permiten incorporar la operación del depósito (representando su geometría 3D, propiedades hidráulicas del relave y la ubicación y cota de la laguna de aguas claras).

Al inicio de la simulación las capas asociadas al DR se encuentran inactivas,

**Figura 3:** Ejemplo de resultados modelo de infiltración DR. Comportamiento del dren (arriba) y estimación de infiltraciones (abajo), ambos normalizados.



las cuales son activadas gradualmente en la medida de que el depósito crece de acuerdo a sus batimetrías históricas. Por otra parte, el modelo reconoce que una de las variables principales que controlan la infiltración es la consolidación, esto es el proceso de compactación del producto del peso propio del mismo relave.

Este proceso se introduce al modelo mediante factores de reducción de permeabilidad en el tiempo, asociados a columnas del relave de distinto espesor. Una vista del modelo integrado del tipo mencionado puede observarse en la *Figura 2*.

Las propiedades hidráulicas del acuífero –así como las iniciales del relave– fueron calibradas mediante la herramienta de calibración automática PEST (Model-Independent Parameter Estimation), con el objetivo principal de reproducir el comportamiento de niveles en pozos aguas abajo del muro y el comportamiento del caudal de los drenes construidos para asegurar su estabilidad, variando espacialmente las propiedades hidráulicas.

Esto permitió replicar de forma razonable el comportamiento medido en los drenes y además generar una estimación de infiltraciones para el depósito.

La *Figura 3* muestra dichos resultados, en términos de caudal normalizado en función del valor máximo.

La naturaleza 3D del modelo permitió capturar la respuesta transiente del caudal medido en los drenes del muro, demostrando que la metodología fue capaz de representar la interrelación entre el sistema de flujo subterráneo y la operación del depósito de relave.

En esta situación, la estimación de infiltraciones se encuentra controlada principalmente por la geomorfología de la cuenca donde se ubica el depósito y su relación con la ubicación y volumen de la laguna de aguas claras del DR, las

propiedades hidráulicas del aluvial y de los relaves (permeabilidad inicial y secuencia de consolidación).

**Se concluye que el uso de una tecnología de modelación, típicamente aplicada a la hidrogeología, permitió calibrar la permeabilidad inicial del relave, lo cual es un avance significativo en este campo.** Esta implementación tiene el potencial de ayudar a generar estrategias de depositación de relaves condicionadas por criterios ambientales (minimizar infiltraciones), **permitiendo que los Depósitos de Relaves realmente se transformen en Instalaciones de Gestión o Manejo de Relaves (IGM o IMR).** ©

# CAMBIO CLIMÁTICO Y AGUAS SUBTERRÁNEAS

04.10.2017

Centro de Extensión Cultural de la Universidad de Talca (sede Santiago).  
Calle Quebec n°415 (esquina Condell), Providencia (Metro Salvador).

[www.ahsudchile.cl](http://www.ahsudchile.cl)  
Inscripciones e información:  
[seminario2017@ahsudchile.cl](mailto:seminario2017@ahsudchile.cl)

**Valores:**  
Socios: \$30.000 (Cuota al día)  
Público General: \$50.000  
Estudiantes: \$15.000 (cupos limitados)  
Valores NO incluyen almuerzo.



Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea  
para el Desarrollo (ALHSUD) Capítulo Chileno A.G.  
Providencia 2330, oficina 63.  
[comunicaciones@alhsudchile.cl](mailto:comunicaciones@alhsudchile.cl) - [www.alhsudchile.cl](http://www.alhsudchile.cl)

 Alhsud Chile

 @alhsudchile

 Alhsud Capítulo Chileno

 alhsudchile