
Revisión del concepto de sustentabilidad de la explotación de aguas subterráneas en el contexto normativo chileno

O. Acosta

Resumen: Una vez satisfechas las necesidades vitales de la población, el agua subterránea es un recurso económico que contribuye al desarrollo de la sociedad, la cual debe ser capaz de compatibilizar su valor ambiental, social y económico. Para decidir la intensidad de su aprovechamiento, la comunidad debe llegar a un consenso sobre la distribución de los beneficios y costos asociados a los efectos de la explotación. La explotación sustentable será aquella que pueda mantenerse indefinidamente en cantidad y calidad, generando impactos en la naturaleza que la sociedad esté dispuesta a aceptar. Las disposiciones del Código de Aguas chileno tienen como finalidad resguardar la sustentabilidad de los acuíferos, dada su función de fuente de abastecimiento para múltiples usos, de lo cual deriva el motivo esencial de su conservación. El presente documento entrega una revisión conceptual de la temática y resume un conjunto de criterios para determinar si una explotación se realiza dentro de un marco de sustentabilidad.

Palabras clave: agua subterránea, sustentabilidad, derechos de agua, Chile.

Abstract: Once the population essential needs have been met, groundwater is an economic resource that contributes to the society development, which must be able to reconcile its environmental, social, and economic value. To decide the portion of groundwaters that should be used, the community must reach a consensus on the distribution of benefits and costs associated with the effects of exploitation. Sustainable exploitation will be the one that can be maintained indefinitely in quantity and quality, generating impacts on nature that the society is disposed to accept. The Chilean Water Code provisions are intended to protect the sustainability of the aquifers given its function as a water supply source for multiple uses, which is the essential reason for its conservation. This document provides a background review for conceptual understanding of the subject and summarizes a set of criteria to assess whether an exploitation is carried out within a sustainability framework.

Keywords: groundwater, sustainability, water rights, Chile.

1. INTRODUCCIÓN

Chile es el país del continente americano con una mayor proporción de su territorio ubicado en zonas áridas. Su desierto norte se extiende por 1600 km, desde la cuenca del río Lluta por el Norte hasta la cuenca del río Aconcagua en la zona centro-norte del país, caracterizándose por una importante escasez de recursos hídricos. En la tabla 1 se presenta una estimación de la escurrimiento total por unidad de superficie, y se aprecia su evolución de norte a sur.

Recibido: Febrero 24, 2021 / Aceptado: Junio 06, 2021
Publicado en línea: Octubre 30, 2021
© 2021

O. Acosta



Gestionare Consultores, Santiago, Chile. Alhsud
Capítulo Chileno. .

E-mail de correspondencia: oacosta@gestionare.cl

En muchas de estas zonas, la disponibilidad de aguas superficiales es en extremo limitada y presenta una alta variabilidad interanual, por consiguiente, el agua subterránea constituye la mayor fuente de agua dulce accesible y de disponibilidad permanente en el año. En las décadas pasadas, la explotación intensiva del agua subterránea contribuyó al desarrollo económico de Chile, con notables beneficios sociales para el país. La mayor extracción se ha concentrado en las zonas agrícolas del centro y norte, que disponen de agroclimas favorables para la agricultura comercial de exportación, y en las regiones del norte minero donde, en algunos casos, el agua subterránea es la única fuente hídrica disponible para el procesamiento de los minerales, el desarrollo agrícola y el abastecimiento humano [1].

El uso del agua subterránea en Chile se ha incrementado fuertemente desde mediados de la década de 1990, en concordancia con la evolución de la tasa nacional de crecimiento económico. En el presente, el consumo total de agua continental bordea los 11,000 hm³/año [2], de los cuales cerca de 3,300 hm³/año corresponden a agua subterránea (ver la tabla 2). Esta contribución actual de 30% del agua subterránea sobre el total del uso de agua dulce está marcada por la excepcional sequía de doce años de duración, que tuvo inicio en el 2010 y afecta a una parte importante de Chile continental, lo que ha generado una instensificación de su uso, actuando de respaldo de suministros que operaban principalmente con aguas superficiales. La preponderancia del agua subterránea como fuente de abastecimiento hídrico en algunas regiones al norte del río Maipo, es aún más significativa, al proveer cerca de 20 y 50% del suministro de ciudades como el Gran Santiago y el Gran Valparaíso, respectivamente, así como 100% en ciudades como Copiapó, Iquique y Arica [3]. En la tabla 3 se muestra una comparación entre el consumo de aguas subterráneas, estimado para Chile y otros cinco países seleccionados, y se indica el porcentaje que

representan estos recursos respecto del uso total de agua dulce en cada caso.

Tabla 1. *Escorrentía total por unidad de superficie en cuencas seleccionadas del norte y centro de Chile*

Cuenca	Latitud S	Superficie km ²	Escorrentía promedio L/s/km ²
Lluta	18°22'	3.437	≤ 0,5
San José	18°32'	3.194	
Salado	26°24'	7.528	
Copiapó	27°39'	18.703	
Huasco	28°42'	9.813	≤ 1
Elqui	29°58'	9.825	
Limarí	30°42'	11.696	
Choapa	31°51'	7.653	
Petorca	32°16'	1.988	
La Ligua	32°25'	1.980	
Aconcagua	32°46'	7.334	5 – 6
Maipo	33°42'	15.273	10 – 15

Fuente: elaboración propia desde DIRPLAN (2016).

Tabla 2. *Estimación del uso de agua continental en Chile y derechos de aguas otorgados (según catastro DGA)*

Derechos / Uso	Aguas superficiales		Aguas subterráneas		Total	
	m ³ /s	Hm ³ /a	m ³ /s	Hm ³ /a	m ³ /s	Hm ³ /a
Estimación de uso	246	7.752	≥104	≥3.286	350 ⁽¹⁾	11.038 ⁽¹⁾
Derechos otorgados ⁽²⁾	2.024	63.829	453	14.286	2.477	78.115

Fuente: elaboración propia desde DGA(2017)(1) y DGA (2016a)(2). Se consideraron derechos superficiales consuntivos permanentes y derechos subterráneos consuntivos definitivos. El uso del agua subterránea se estimó como 0.23 x derechos otorgados con base en el conocimiento del autor de múltiples casos reales (agric. norte/centro 0.20; agric. sur 0.10; otros usos 0.45).

Tabla 3. *Estimación del uso de agua subterránea en países seleccionados y porcentaje respecto del uso total de agua*

País	m ³ /s	Hm ³ /a	% del total
Arabia Saudí ⁽¹⁾	665	21.000	85%
Brasil ⁽²⁾	558	17.600	--
España ⁽¹⁾	221	7.000	22%
Egipto ⁽¹⁾	152	4.800	7%
Libia ⁽¹⁾	136	4.300	95%
Chile	104	3.300	30%

Fuente: Elaboración propia desde Custodio (2015a)(1) y Foster et al. (2021)(2). Se ha añadido una estimación preliminar del uso del agua subterránea para Chile, que podría ser hasta 20% inferior sin sequía.

De acuerdo con cifras oficiales de la Dirección General de Aguas (DGA), en Chile existen 47,569 pozos con derechos de aguas constituidos por la autoridad [5], de los cuales 3,730 contaban con algún tipo de monitoreo de extracciones y niveles al 31 de marzo de 2021 [8], cumpliendo con un programa estatal de monitoreo de extracciones implementado desde el año 2019. Además de estas obras existe un número muy significativo de pozos que no están comprendidos en el catastro oficial, incluyendo los pozos residenciales de uso doméstico. Conservadoramente, es posible estimar que la cuantía de dichas captaciones estaría en el rango 20,000-30,000, aunque se ha señalado que bien podrían igualar o, incluso, superar el número de los pozos reconocidos [9].

Si bien la explotación de las aguas subterráneas ha producido beneficios privados y sociales claramente identificables, también ha generado costos y conflictos sociales cuya compensación con frecuencia no es asumida con la debida diligencia por los actores públicos y privados directamente involucrados en la explotación. El pago de esos costos debe subsanar las externalidades negativas de la explotación del agua subterránea y evitar que sean terceros no beneficiados por el uso de estas aguas —o las siguientes generaciones—, quienes los paguen.

En aquellos territorios en que la extracción se ha realizado a tasas no sostenibles en el largoplazo, deberá considerarse una transición hacia una explotación sustentable del agua subterránea, compatible con la naturaleza, que en muchos casos supondrá un cambio de paradigma y requerirá incorporar nuevas fuentes hídricas, como la desalinización, el uso de aguas regeneradas o los trasvases, complementarias al aprovechamiento de las aguas subterráneas, que seguirán siendo una fuente basal de abastecimiento dada su ubicuidad y menor costo para la sociedad.

La correcta explotación del agua subterránea requiere la acción corresponsable del Estado y los usuarios organizados en las Comunidades de Aguas Subterráneas adscritas a las Juntas de Vigilancia, las que legalmente organizadas, pueden asumir el liderazgo en temas de planificación y gestión sustentable, promoviendo solución a los conflictos que se producen entre asociados y/o con terceros.

En la medida que se ha generalizado el uso intensivo de los acuíferos en Chile, ha surgido la necesidad de disponer de criterios que permitan definir objetivamente el concepto de sustentabilidad de la explotación de las aguas subterráneas, para ser utilizados como pautas que permitan gestionar sosteniblemente los acuíferos a largo plazo. El presente documento entrega una revisión del marco conceptual de la temática, y resume un conjunto de criterios para evaluar si la explotación de un determinado acuífero se realiza dentro de un contexto de sustentabilidad de largo plazo.

2. EL CONOCIMIENTO COMO REQUISITO PARA EL USO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La comprensión detallada de los procesos hidrológicos que afectan a las aguas subterráneas es algo esencial para diseñar e implementar pautas de gobernanza eficaces con el fin de realizar la explotación sustentable de los acuíferos. Es necesario conocer sus circuitos de escurrimiento, con sus

fases de retardo, compartimentalización y almacenamiento, así como las alteraciones que en su dinámica de flujo causan la variabilidad climática y la influencia antrópica.

El conocimiento sobre el funcionamiento hidrodinámico de los acuíferos deber ser todo lo exhaustivo posible, sin perjuicio de aceptar que su completitud se irá adquiriendo en fases sucesivas que no deben impedir la adopción de decisiones tempranas de gestión. En los casos en que se explote una fracción de reservas hidrogeológicas, recargadas en épocas pasadas de mayor pluviometría, como ocurre en el norte y centro-norte de Chile [10,11,12,13], los esfuerzos de obtener información a detalle deberían ser aún mayores para conocer no solo la cuantía de la recarga moderna, sino también el tiempo medio de residencia de las aguas que se están extrayendo en el presente. En el norte de Chile, es habitual la explotación de aguas recargadas hace milenios (tabla 4), las cuales son destinadas principalmente al abastecimiento de agua potable de la población, la actividad minera, y en menor medida para la agricultura.

Tabla 4. *Número de muestras de aguas subterráneas en el rango de edades aparentes radiométricas en miles de años (ka), en la Región de Tarapacá, norte de Chile*

Ubicación	Total	<5ka	5ka-10ka	10ka-15ka	>20ka
Altiplánicas	17	0	6	6	5
Precordilera	2	0	0	1	1
Depresión central	12	4	5	3	0
Total	31	4	11	10	6

Fuente: adaptado de Acosta y colaboradores (2013).

En Chile, hasta mediados de la década de 1990, la cuantificación del agua subterránea en cada unidad hidrogeológica se centró fundamentalmente en determinar el valor de la recarga media de largo

plazo, asimilándola al concepto jurídico de “disponibilidad”, establecido en el Código de Aguas. A partir de los últimos años de esa década comenzaron a utilizarse modelos numéricos de flujo subterráneo para evaluar descensos generales y otros impactos, que tuvieron trascendencia en la asignación de los derechos de aguas que aún podían ser otorgados. Sin embargo, en muchos casos no se logró estudiar y comprender adecuadamente la variabilidad temporal y espacial del fenómeno de recarga en cada acuífero, las dinámicas de intercambio con las aguas superficiales, la relación con los ecosistemas húmedos ni la interferencia de las actividades antrópicas. En general, no se contaba con una buena estimación de los parámetros hidráulicos de largo plazo de los acuíferos, pues solo es posible obtener tal información una vez que el sistema hidrogeológico es explotado con intensidad. Disponer de esta información resulta esencial para planificar una gestión sustentable de la explotación del agua subterránea, pero especialmente en aquellos acuíferos ubicados en zonas áridas, donde la recarga presenta una alta variabilidad interanual, pues se intercalan algunos años con recarga efectiva, entre otros muchos con recarga despreciable o, incluso, inexistente.

3. LOS CAMBIOS QUE PRODUCE LA EXPLOTACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Hacia fines de la década de 1970, la gran mayoría de los acuíferos de Chile se encontraban en régimen natural o cuasi-natural, sin apenas perturbaciones antrópicas (figura 1). El aprovechamiento de las aguas subterráneas era muy reducido; se estimaba que existían operativos cerca de 2000 pozos en todo el territorio nacional [14 citado en 9]. Recién a partir de la segunda mitad de la década de 1980, una creciente agricultura de exportación y la preparación de grandes proyectos mineros impulsaron con fuerza el desarrollo del agua subterránea, especialmente en las regiones del norte y

centro-norte, donde el crecimiento de las ciudades, a consecuencia de esta mayor actividad económica, demandó agua potable que también fue suministrada desde fuentes subterráneas [15].

Toda explotación de agua subterránea provoca un descenso de los niveles piezométricos de los acuíferos y, en algunos casos, también de la superficie freática [6]. Así, la variación habitual del nivel freático entre máximos y mínimos propios del régimen natural se ve gradualmente alterada por el agua extraída a través de las captaciones, que proviene, en primer término, del volumen almacenado en las inmediaciones de los pozos, y luego, de las fuentes de recarga del sistema hidrogeológico.

En la medida que la explotación del acuífero se va haciendo más intensiva, las descargas naturales se van reduciendo progresivamente, a consecuencia de la pérdida de carga del sistema, y también se genera recarga inducida desde los cauces superficiales hasta que se llega a una nueva situación de equilibrio. Pero el equilibrio solo se puede alcanzar si la extracción que se realiza es menor que la recarga media de largo plazo. De otro modo, no se llega a un nuevo equilibrio y se consumen reservas de agua permanentemente, hasta su agotamiento práctico o hasta que su extracción ya no puede continuar por razones físicas, de calidad o económicas [6].

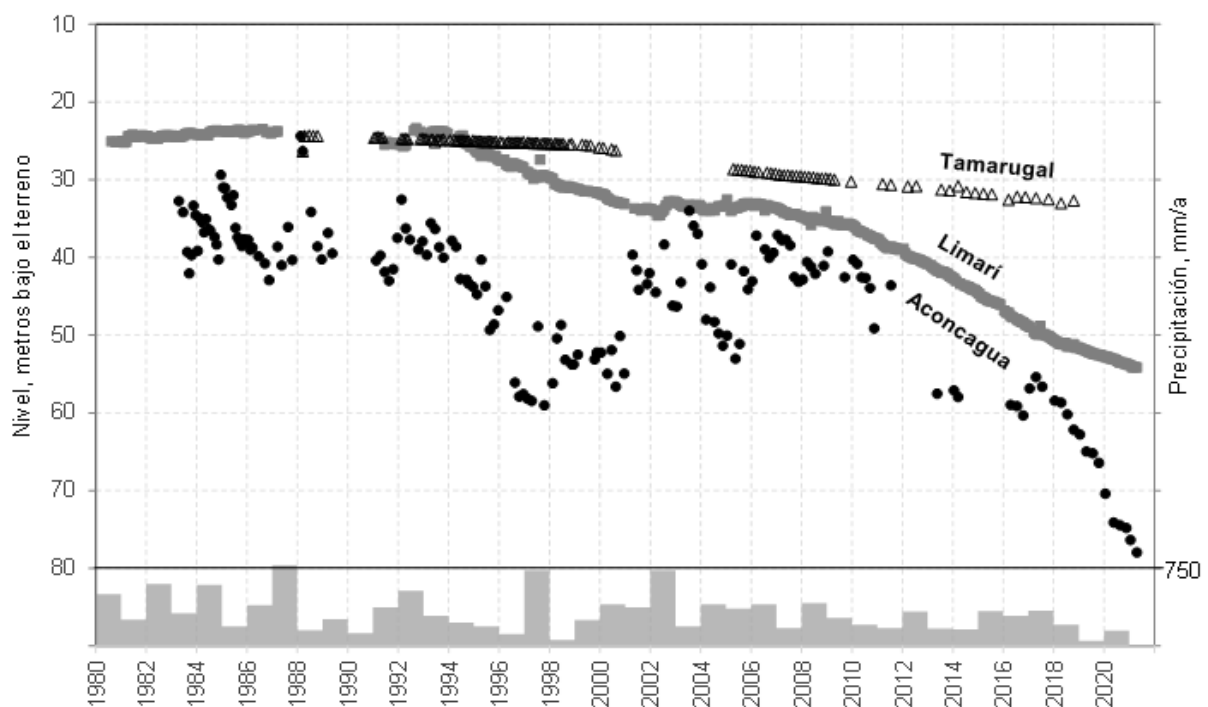


Figura 1. Hidrogramas de los pozos de control piezométrico de la Dirección General de Aguas, El Carmelo 2 (cuenca de la Pampa del Tamarugal), El Sauce 2 (cuena del río Limarí), y Misión de María (cuena de río Aconcagua), mostrando los niveles propios del régimen natural y su evolución posterior al inicio de la explotación intensiva de los acuíferos. En la parte baja del gráfico se presenta referencialmente la precipitación anual en la estación Quillota (Aconcagua).

No se debe confundir el fenómeno de descensos piezométricos de la fase transitoria hacia un nuevo equilibrio con una situación

de desbalance y consumo permanente de reservas. El reajuste del sistema acuífero puede tomar años o, incluso, décadas en

función del tamaño del acuífero y de la intensidad y distribución territorial de las extracciones. Cualquier análisis tendiente a evaluar el balance hídrico y el estado de un acuífero explotado debe considerar una ventana de tiempo apropiada, lo suficientemente larga como se detalla más adelante en este artículo.

4. DEFINICIONES SOBRE LOS RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El diseño de planes de gestión de aguas subterráneas, tendientes a conseguir una explotación sostenible, es una tarea esencialmente interdisciplinaria que requiere contar con un lenguaje técnico compartido por todas las especialidades y actores involucrados en su gobernanza. Por ello, cabe definir varios conceptos relativos a la explotación de las aguas subterráneas, algunos de los cuales se resumen a continuación, en línea con lo avanzado previamente por otros autores [6,16,17,18,19,20,21,22,23,24].

4.1 Definiciones sobre recursos y reservas

Acuífero: una o más formaciones geológicas que contienen o han contenido agua bajo la superficie de la tierra en condiciones de saturación hídrica, y que poseen la capacidad de almacenar y transmitir agua. Sin perjuicio de la titularidad del dominio de este subsuelo, las aguas subterráneas contenidas, o que fluyen por él, son bienes nacionales de uso público a los que se accede en conformidad con las disposiciones legales.

Sistema acuífero: conjunto de estratos permeables capaces de permitir la extracción de cantidades significativas de agua y otros de menor permeabilidad que, aunque pueden almacenar grandes cantidades de aguas subterráneas, no aportan caudales relevantes a las captaciones construidas en ellos. En general, también se utiliza simplemente el término “acuífero” para referirse a ellos, salvo que se quiera enfatizar la heterogeneidad de la estratificación geológica del “sistema” con partes donde el

agua se moviliza rápidamente y otras donde lo hace más lentamente, o bien, indicar que el agua puede estar contenida a diferentes grados de presión, dependiendo de la profundidad.

Sector hidrogeológico de aprovechamiento común (SHAC):

término incluido en la legislación de aguas en Chile, que corresponde a un acuífero o una parte de él, cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión en forma independiente. Su identificación y delimitación está a cargo de la DGA, que a la fecha ha definido 375 sectores a nivel nacional [8]. La división de un acuífero en varios SHAC se debe hacer con razones fundadas y su objetivo fundamental será facilitar la gestión de las aguas subterráneas y no lo contrario. Si bien la sectorización es una facultad discrecional de la DGA, ésta debe basarse en criterios objetivos y de conocimiento público. Los límites de los SHAC se establecen principalmente siguiendo criterios geológicos e hidráulicos que definen las divisorias hidrogeológicas naturales del acuífero, y secundariamente, aplicando divisiones basadas en características comunes de los aprovechamientos que se realizan en cada subunidad, por ejemplo, la separación de zonas con diferentes intensidades de explotación.

Recarga: es el agua que ingresa en la zona saturada del acuífero, procedente de la infiltración de la lluvia (recarga difusa), de la relación con las aguas superficiales (recarga puntual), de la escorrentía subterránea procedente de otros acuíferos (recarga subterránea), y de aportes permanentes de origen antrópico (retornos de riego, pérdidas de las redes de agua potable, obras de recarga artificial, etc).

Recursos renovables: corresponden a la recarga media de largo plazo al sistema acuífero, que comprende la recarga natural, más la recarga inducida por la explotación (que puede ser de cuantía relevante en acuíferos conectados con cursos de aguas

superficiales), y también los aportes de origen antrópico como los retornos de riego y otros consolidados en el tiempo como las pérdidas de las redes de agua potable.

Reservas dinámicas: agua subterránea almacenada en el acuífero a partir de una cierta profundidad que, una vez consumida, solo se repone mediante eventos de recargas favorables, asociados a años con hidrologías por sobre el promedio.

Reservas: agua subterránea almacenada en el acuífero a partir de una cierta profundidad, que es de muy lenta o nula renovación, y que no tiene su origen en la recarga actual, sino en eventos de épocas pasadas. Una vez extraídas, su reposición es de gran lentitud, pudiendo tomar varias décadas o incluso siglos.

Recursos explotables: es el caudal de aguas subterráneas extraíble desde un acuífero con un nivel de externalidades negativas, aceptables socialmente, el cual debería ser determinado en el marco de un proceso abierto y transparente con la comunidad. No corresponde a un valor particular que pueda ser calculado siguiendo una regla única, sino que depende del equilibrio entre beneficios y afecciones que cada sociedad decida establecer. Las afecciones por ponderar van desde la pérdida de capacidad de las propias captaciones por la interferencia cruzada entre ellas, hasta los efectos que se provocan en las descargas naturales (manantiales, ríos, humedales, etc.), y en los ecosistemas húmedos dependientes del agua subterránea.

4.2 Definiciones sobre tipos de explotación

Explotación intensiva: es la situación que se genera cuando permanentemente se extrae una parte significativa de la recarga actual, produciendo un cambio importante en el funcionamiento del sistema acuífero y de sus relaciones con los otros componentes del ciclo hidrológico. Se caracteriza por un importante grado de interferencia entre captaciones y/o por generar mermas en los caudales de los manantiales (vertientes), en el caudal base de los cursos superficiales

y en la extensión de lagunas y humedales. También se pueden producir cambios en la composición química de las aguas del acuífero.

En estos casos, como la explotación se realiza por un caudal igual o inferior a la recarga media actual, después de un cierto tiempo (años o incluso décadas), el sistema acuífero alcanza un nuevo estado de equilibrio. En este nuevo equilibrio, los niveles piezométricos del acuífero varían estacionalmente e, incluso, interanualmente, pero en el largo plazo no se aprecia una tendencia sostenida de descenso de niveles. Cabe señalar que, en años especialmente secos, y en consecuencia de baja o nula recarga a los acuíferos, la explotación intensiva podría conllevar la extracción puntual de reservas dinámicas.

Es una definición eminentemente técnica que deriva del balance hídrico de la unidad hidrogeológica, y no tiene asociada en sí misma una calificación positiva o negativa de la situación. La determinación del nivel de explotación intensiva que se considera como “sustentable” debe realizarse caso a caso, disponiendo de la mayor cantidad de información empírica posible. En cuencas altiplánicas del norte de Chile se ha determinado que explotaciones intensivas equivalentes a solo 25% de la recarga, podrían ser catalogadas como no sustentables, dados los cambios que generan en los ecosistemas húmedos dependientes del agua subterránea [25].

Este tipo de explotaciones son hidráulicamente sostenibles, aunque no exentas de algunas externalidades negativas para los usuarios y la naturaleza. Determinar si este tipo de explotación también es medioambientalmente sostenible, es una tarea muy importante que debería ser desarrollada en el marco de una evaluación colegiada de carácter técnico-político, como el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), en un proceso reglado, transparente y abierto a la participación de la sociedad involucrada.

La mayoría de los acuíferos relevantes de Chile, desde la Región Metropolitana al Norte, se encuentra en algún grado de explotación intensiva. Esta no es una situación inesperada, ya que así fue planificado por la Administración en las décadas de 1980 y 1990, ante el creciente número de solicitudes de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) subterráneas que se generó a raíz del acelerado crecimiento económico que experimentó el país. En efecto, la política pública que se implementó en esos años, y que sigue vigente a la fecha, considera como norma general que es posible otorgar como DAA al menos un caudal equivalente a la recarga media de largo plazo. Recién al inicio de 1997, luego de la entrada en pleno vigor de la Ley de Bases del Medioambiente, con la dictación del reglamento del SEIA, se comenzaron a implementar criterios de resguardo medioambiental que condicionaban el ejercicio de los derechos de aguas otorgados previamente, pero solo en aquellos proyectos que por disposición legal debían someterse al SEIA.

Explotación de reservas de agua subterránea: es un caso de explotación donde el caudal total extraído desde el acuífero permanentemente supera la recarga natural, más la recarga inducida por la explotación. En estos casos, no se puede llegar a una nueva situación de equilibrio y, entonces, el consumo de reservas almacenadas crece con el tiempo, así como el descenso de niveles del acuífero. En ocasiones, también se produce un deterioro de la calidad del agua del acuífero.

Este tipo de explotación no es sustentable en el largo plazo, pero sí es posible durante un período de tiempo determinado, en el contexto de una planificación adecuada que luego contemple fuentes hídricas complementarias al final de dicho período. Custodio [6], considera referencialmente que una explotación puede ser catalogada de consumo permanente de reservas cuando el tiempo de recuperación tras el cese de las extracciones sea mayor a dos generaciones

humanas, es decir, mayor a 50 años, pero no hay consenso sobre tal valor.

Cabe señalar que el consumo puntual y transitorio de reservas dinámicas para compensar variaciones estacionales o interanuales en la recarga, usando el acuífero como regulador de los recursos de agua, no puede ser catalogado de explotación permanente de reservas de agua subterránea [6].

El uso permanente de reservas de aguas subterráneas sucede en algunos lugares del mundo, especialmente en zonas áridas, incluyendo Chile, donde este tipo de explotaciones han sido excepcionalmente permitidas por la autoridad, como en la Pampa del Tamarugal, donde se autorizó la extracción de 5% de las reservas del acuífero en un período de 50 años [26].

Ahora bien, dataciones radiocarbónicas, realizadas en varios acuíferos del norte de Chile, indicarían que en una parte importante de los acuíferos situados al norte del río Copiapó, se están explotando reservas de aguas subterráneas. Este consumo de reservas que no ha sido autorizado estaría ocurriendo de facto probablemente a consecuencia de una sobrestimación de la recarga media en el proceso de entrega de derechos de aguas, o bien, por una subestimación del uso previsible de los derechos otorgados, situación que en todo caso requiere de mayor análisis.

Aunque con frecuencia se considera que el consumo de reservas es una situación a corregir o eliminar, la realidad es que ha favorecido el desarrollo económico y social de muchos territorios, y su esencial “no sostenibilidad” puede enmarcarse en una evolución transitoria hacia un uso sustentable y compatible con la naturaleza, basado en los beneficios obtenidos, hasta que se pueda cambiar el paradigma de abastecimiento, mediante la introducción de nuevas fuentes como reúso, desalinización o trasvases. La explotación de reservas de aguas subterráneas siempre debería realizarse en el marco de un plan diseñado

por especialistas, y estar acompañada de los debidos seguimientos y reevaluaciones periódicas.

Sobreexplotación: es una definición de amplio uso coloquial, empleada cuando se visualizan efectos que se califican como negativos, y que son atribuidos a la explotación de las aguas subterráneas, sin contar muchas veces con una revisión detallada y holística del fenómeno. Es un calificativo en el que normalmente priman apreciaciones subjetivas con énfasis en las dimensiones negativas de la explotación, sin considerar a la vez los beneficios sociales que produce el agua a disposición de la sociedad [18,27].

No es raro que se identifique como sobreexplotación la extracción por sobre la recarga [6], lo cual es incorrecto, ya que explotaciones muy por debajo de la recarga podrían, en determinados casos, generar efectos negativos que fuesen inadmisibles por parte de la sociedad [25,28,29].

De manera objetiva, se puede considerar que un acuífero está sobreexplotado cuando se está poniendo en peligro la subsistencia de los aprovechamientos existentes en el mismo, como consecuencia de estarse realizando extracciones anuales superiores al caudal medio de los recursos renovables, o que produzcan un deterioro grave de la calidad del agua. Asimismo, podría considerarse que un acuífero está sobreexplotado si el nivel piezométrico está sujeto a alteraciones que afecten significativamente los componentes de calidad y cantidad (objetivos ecológicos) de las aguas superficiales asociadas, o que produzcan perjuicios significativos en ecosistemas terrestres que dependan directamente de las aguas subterráneas [30].

Explotación sustentable: es aquella que se puede mantener indefinidamente en cantidad y calidad, logrando un equilibrio de largo plazo del sistema. Permite preservar la totalidad o la mayor parte de los servicios que provee el acuífero, generando unos efectos en los demás componentes del ciclo hidrológico y en la naturaleza que la sociedad involucrada está dispuesta a aceptar.

Explotación dinámica: es aquella situación en la que el esquema de explotación (caudales extraídos y puntos de extracción) se adecúa a las respuestas empíricas del sistema acuífero y de los demás componentes del ciclo hidrológico. Su propósito es mantener la explotación dentro del ciclo de la sostenibilidad y buscar reducir o retardar los efectos negativos de la explotación, con el objeto de maximizar el aprovechamiento del acuífero en beneficio de la sociedad. Requiere un rol activo de los usuarios organizados.

5. CONCEPTOS EN LA LEGISLACIÓN CHILENA SOBRE SOSTENIBILIDAD DE LA EXPLOTACIÓN

El Código de Aguas de 1981 incorporó normas específicas para las aguas subterráneas, las que habían estado ausentes en la legislación anterior [31]. Trece artículos específicos, junto con las disposiciones generales aplicables a todo tipo de aguas, establecieron las normas para la exploración y explotación de aguas subterráneas.

Sin embargo, estas disposiciones legales y su primera reglamentación, realizada mediante la Resolución DGA N° 207 de 1983, no lograron abordar adecuadamente el tema de la sustentabilidad general de la explotación en la asignación de los nuevos derechos de aguas. Recién con la dictación de la Resolución DGA N° 186 de 1996, que reemplazó a la Resolución DGA N° 203/83, se introdujeron cambios en los criterios administrativos orientados a atender la necesidad de sustentabilidad de la gestión de los acuíferos [9]. Así, por la vía reglamentaria, se incorporó como requisito de aplicación general al proceso de otorgamiento de nuevos derechos el análisis de la disponibilidad a nivel del acuífero, definiendo el caudal de explotación sustentable como aquel que permite un equilibrio de largo plazo del sistema, entregando respaldo físico a los DAA subterráneas otorgados.

Posteriormente, en el año 2005, el Código de Aguas fue reformado sustantivamente para, entre otras cosas, dar rango legal a

las disposiciones encaminadas a asegurar una gestión sustentable de las aguas subterráneas. Con ese diseño legal para la gestión de las aguas subterráneas—que sigue vigente hasta el presente—, el procedimiento de entrega de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas ha quedado definido por cuatro principios fundamentales:

- a) Las aguas solicitadas deben haber sido alumbradas y su disponibilidad comprobada tanto en la obra de captación (pruebas de bombeo) como en la unidad hidrogeológica (estudios para cuantificar la recarga media).
- b) La constitución del derecho solicitado debe ser legalmente procedente (publicidad de la solicitud, acertada inteligencia, posibilidad de oposición de terceros, distancia mínima entre captaciones 200 m, etc.).
- c) El ejercicio del derecho otorgado no puede menoscabar derechos de terceros constituidos con anterioridad, considerando la relación existente entre aguas superficiales y subterráneas.
- d) La constitución del derecho solo procede en la medida que la explotación total y acumulada del respectivo acuífero sea la apropiada para su conservación y protección en el largo plazo, considerando los antecedentes de recarga y descarga, así como las condiciones de uso existentes y previsibles.

Para la aplicación de estos principios, inicialmente la DGA procuró, como regla general, que la explotación máxima de los acuíferos no excediera el valor de la recarga media estimada (recursos renovables), posibilitando el logro de un nuevo equilibrio de largo plazo del sistema. Sin embargo, al mismo tiempo, desde el año 1996 en adelante [9], la Administración implementó procedimientos que permitieron otorgar derechos por un valor nominal muy superior a la recarga, fundados en información de los escenarios presentes y futuros previsibles de los usos efectivos de los derechos concedidos (uso existente y previsible). Se trató de criterios de optimización que

buscaban prevenir el riesgo de subutilización de los acuíferos, reconociendo que el uso real de los derechos concedidos era inferior a 100% del caudal nominal que se entregaba en los respectivos títulos. En los primeros años, esto se realizó aplicando “coeficientes de uso efectivo” y, luego de 2011, mediante una nueva metodología (consignada en la Resolución DGA N° 2455/11), que traspone directamente el “factor de sobreotorgamiento” de un “acuífero patrón” comparable al acuífero en análisis, en el cual no se haya “detectado o establecido afectación a derechos ni afectación a la fuente”. Un caso de aplicación de esta metodología se puede revisar en el Informe Técnico de la DGA [32], donde se traspuso un factor de sobreotorgamiento de 4.8 (acuífero patrón Llayllay), que permitió entregar DAA subterráneas (definitivos y provisionales) por un caudal total nominal que prácticamente quintuplica el valor de los recursos renovables en cuatro acuíferos del valle del Aconcagua (acuíferos San Felipe, Putaendo, Panquehue y Catemu).

De este modo, en los nueve acuíferos de la cuenca del río Aconcagua, se han entregado derechos de aguas subterráneas por un caudal total nominal de 47.5 m³/s [33], mientras que los recursos renovables con respaldo físico han sido estimados por la misma DGA en 15.1 m³/s [32,34]. Esta situación de aparente desbalance hídrico ha causado una creciente preocupación en la ciudadanía, tomadores de decisiones y actores políticos, que han entendido que sobreotorgamiento es sinónimo de sobreexplotación.

El Código de Aguas considera tres instrumentos para limitar o corregir el rumbo de la explotación de los acuíferos si está en riesgo su sustentabilidad. Siguiendo una lógica de gradualidad de las intervenciones, estos instrumentos administrativos son los siguientes:

- a) Reducción temporal del ejercicio de derechos concedidos (art. 62).
- b) Declaración de áreas de restricción que limitan la entrega de nuevos derechos definitivos (art. 63).

- c) Declaración de zonas de prohibición que impiden el otorgamiento de nuevos derechos definitivos y provisionales (art. 65).

Al año 2018, la aplicación de estas limitaciones había sido disímil; históricamente, la DGA no había dictado ninguna resolución declarando una reducción temporal, la que antes del 2018 solo podía decretarse si era solicitada por un usuario, pero en cambio, sí había decretado 156 áreas de restricción y 6 zonas de prohibición [5,8]. La primera zona de prohibición se declaró en el año 1983, en la cuenca estero El Membrillo, Región de Valparaíso; la segunda en 1993, en la cuenca del río Copiapó, Región de Atacama; y la tercera, en 1996, en la cuenca del río San José de Azapa, Región de Arica y Parinacota.

Es pertinente señalar que, a diferencia de la reducción temporal, las declaraciones de restricción y prohibición no tienen consecuencias prácticas sobre la explotación en curso, pues no la corrigen ni la ajustan, sino que se enfocan exclusivamente en el otorgamiento de nuevos derechos, que es lo que se ve limitado o impedido del todo, respectivamente. Por ello, resulta llamativo y digno de análisis que, a pesar de la situación de sobreotorgamiento antes mencionada, los usuarios nunca hayan solicitado la aplicación de la primera de las medidas (reducción temporal), único instrumento legal que efectivamente permite corregir el rumbo de la explotación en un acuífero o en una fracción de él.

Del mismo modo, también destaca el muy lento avance de la organización de las comunidades de aguas subterráneas que se generan por el solo ministerio de la ley, cuando se declara restricción y prohibición. Si bien a marzo de 2021 existían casi 200 sectores declarados bajo restricción (97), o prohibición (102), solo 14 de ellos contaban con organizaciones formales de este tipo. El Código de Aguas otorga a los directorios de las comunidades de aguas importantes atribuciones para la correcta distribución de las aguas, pudiendo incluso establecer prorratas que respeten la proporcionalidad

de los derechos de aguas e impedir que se extraigan aguas sin títulos (art. 186; art. 241, numerales 3, 4 y 5). Estas atribuciones legales de distribución, prorrato y fiscalización, depositadas en los propios usuarios organizados, si fuesen aplicadas adecuadamente permitirían corregir el rumbo de la explotación cuando está en riesgo la sustentabilidad del acuífero. Así ha sido explicitado por la vía reglamentaria desde 2005, al indicarse que las atribuciones de las comunidades de aguas subterráneas incluyen la promoción de la gestión sustentable del acuífero y la regulación de su explotación para prevenir los efectos de la sobreexplotación (Resolución DGA N° 341/05; D. S. MOP N°203/14).

Según Custodio [27], la gestión sustentable de las aguas subterráneas requiere que todos los usuarios involucrados se organicen para:

- a) Tener representación adecuada.
- b) Aceptar corresponsabilidades.
- c) Realizar parte de las tareas de gestión, vigilancia y observación.
- d) Aportar recursos financieros y humanos a la gestión.
- e) Proporcionar información veraz y actualizada.
- f) Autocontrol.

En este sentido, Peña [9], indica que la gestión de las aguas subterráneas no responde solamente a un marco normativo, sino a la forma concreta como se interpretan y se aplican las disposiciones legales vigentes, a las capacidades institucionales disponibles, a las políticas públicas implementadas y a la actuación práctica de la Administración y de los usuarios.

En la tabla 5 se presenta un resumen de los artículos del Código de Aguas que refieren conceptos relativos a la sustentabilidad de la explotación de las aguas subterráneas, incluyendo algunos comentarios respecto del alcance y aplicación de estas normas.

Tabla 5. Resumen de conceptos sobre sustentabilidad de acuíferos contenidos en el Código de Aguas de Chile

Artículo	Comentarios
Artículo 62. Si la explotación de aguas subterráneas por algunos usuarios afectare <u>la sustentabilidad del acuífero</u> u ocasionare perjuicios a los otros titulares de derechos, la Dirección General de Aguas, de oficio o a petición de uno o más afectados, podrá establecer la reducción temporal del ejercicio de los derechos de aprovechamiento, a prorrata de ellos, mediante resolución fundada. Esta medida quedará sin efecto cuando los solicitantes reconsideren su petición o cuando a juicio de dicha Dirección hubieren cesado las causas que la originaron.	Se trata de una restricción: • de carácter temporal; • que se aplica de forma proporcional (a prorrata) de los derechos considerados en la medida; • que se puede aplicar a la totalidad de la unidad hidrogeológica o a una fracción de ella; pertinente en la medida que se haya demostrado que las extracciones que se pretenden restringir son las que afectan la sustentabilidad del acuífero o a los otros titulares; de cuestionable aplicación si previamente la DGA no se ha hecho cargo de la situación de los usuarios sin título existentes en el área.
Artículo 63, inciso primero. La Dirección General de Aguas podrá declarar zonas de prohibición para nuevas explotaciones, mediante resolución fundada en <u>la protección de acuífero</u>, la cual se publicará en el Diario Oficial.	• Se conoce coloquialmente como “cierre del acuífero”; • restringe el otorgamiento de nuevos derechos de aguas subterráneas de cualquier tipo; realmente no afecta en nada el régimen de explotación vigente; presupone la creación de una comunidad de usuarios de aguas subterráneas que, sin embargo, no viene acompañada de recursos y medios, lo que dificulta su organización y posterior actuación.
Artículo 65, inciso primero. Serán áreas de restricción aquellos sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en los que exista el <u>riesgo de grave disminución de un determinado acuífero, con el consiguiente perjuicio de derechos de terceros ya establecidos en él</u>.	• Restringe el otorgamiento de nuevos derechos definitivos, pero a la vez, permite la entrega de derechos provisionales; realmente no afecta en nada el régimen de explotación vigente; presupone la creación de una comunidad de usuarios de aguas subterráneas que, sin embargo, no viene acompañada de recursos y medios, lo que dificulta su organización y posterior actuación.
Artículo 173 bis, numeral 2. (el monto de la multa podrá incrementarse hasta el 75%) c) Cuando a consecuencia de la contravención, se produzca un <u>descenso sostenido o abrupto de los niveles freáticos</u>.	• Puntualiza que el descenso sostenido o abrupto del nivel freático es algo indeseado; la norma no entrega una referencia temporal para el análisis, asunto esencial, dadas las variaciones estacionales normales que pueden ser abruptas, o las sostenidas que se producen en periodos de sequías interanuales.
Artículo 147 bis, inciso final. Sin perjuicio de lo dispuesto en los artículos 22, 65, 66, 67, 129 bis 1 y 141 inciso final, procederá la constitución de derechos de aprovechamiento sobre aguas subterráneas, <u>siempre que la explotación del respectivo acuífero sea la apropiada para su conservación y protección en el largo plazo, considerando los antecedentes técnicos de recarga y descarga, así como las condiciones de uso existentes y previsibles, todos los cuales deberán ser de conocimiento público</u>.	• Esta norma es clave en el logro de la sustentabilidad de los acuíferos; se incorporó al CDA en 2005, cuando una gran proporción de los derechos de aguas ya había sido entregada desde el río Maipo al Norte; el espíritu de la norma es el que debe prevalecer. Las incertezas propias de los estudios hidrogeológicos que sustentaron el otorgamiento de derechos imponen la obligación de revisar periódicamente el rumbo de la explotación de los acuíferos, evitando que ésta siga una trayectoria incierta e insegura que amenace su conservación y buen estado.
Artículo 299, letra a). Planificar el desarrollo del recurso en las fuentes naturales, con el fin de formular recomendaciones para su aprovechamiento y arbitrar las medidas necesarias <u>para prevenir y evitar el agotamiento de los acuíferos</u>.	• Esta norma entrega a la Administración un rol y una responsabilidad permanente en el logro de la sustentabilidad de los acuíferos.

De la interpretación armónica de estos preceptos se concluye que la legislación del ramo y su respectiva reglamentación consideran y resguardan la sustentabilidad del acuífero dada su función de fuente hídrica para los usuarios que se surten de él, de lo cual deriva la razón esencial de su necesaria conservación y protección en el largo plazo. Se considera algo indeseado que los acuíferos disminuyan gravemente, que se produzcan descensos sostenidos o abruptos del nivel freático, y que, en definitiva, éstos se agoten, situaciones que la Administración y los usuarios organizados debe prevenir y evitar.

Cabe indicar que, tratándose del otorgamiento de DAA subterráneas, el Código de Aguas no contempla disposiciones expresamente destinadas al resguardo de las funciones ecosistémicas que estas aguas pudiesen prestar en la naturaleza, como sí lo hace tratándose del otorgamiento de nuevos derechos de aguas superficiales, señalando que la concesión de estos últimos deberá velar por “la preservación de la naturaleza y la protección del medio ambiente” (artículo 129 bis 1). Sin perjuicio de lo anterior, la ley faculta a la Administración para imponer en la resolución que constituye cualquier tipo de derecho de aguas, especificaciones técnicas que condicionen su ejercicio “con el objetivo de conservar el medio ambiente o proteger derechos de terceros” (artículo 149 numeral 7). Esta potestad ha sido utilizada por el regulador para establecer instrumentos de resguardo ecosistémico, como los planes de alerta temprana que fijan puntos de control donde el nivel del acuífero no puede caer por debajo de un cierto umbral, producto de la explotación.

6. DEFINICIÓN DE CRITERIOS PARA DETERMINAR LA SUSTENTABILIDAD DE LA EXPLOTACIÓN

6.1 Revisión de la situación del balance hídrico de la unidad hidrogeológica

Es indispensable contar con el balance hídrico promedio anual del acuífero, actualizado con la mejor información

disponible, cuyo resultado ha de ser necesariamente validado y recalibrado, si es el caso, utilizando la información del comportamiento empírico del acuífero y demás componentes hídricos provenientes de las redes de monitoreo.

Como el balance medio anual puede enmascarar situaciones de graves déficits estacionales, se debe elaborar, además, el balance hídrico representativo de la peor situación estacional, que típicamente ocurre en la segunda mitad del estiaje, cuando las extracciones son máximas y las recargas son mínimas o inexistentes.

Una explotación podría ser catalogada de no sustentable o en riesgo de estarlo, cuando se comprueba que enfrentados los términos de recarga y descarga, se aprecia que existe un desbalance hídrico de largo plazo que no podrá ser revertido tras los períodos cíclicos de hidrologías húmedas previsibles.

6.2 Revisión de la trayectoria de los descensos del nivel freático

Se deben analizar periódicamente los resultados de la red de monitoreo de niveles estáticos, la que debería contar con un número suficiente de puntos de control y estar distribuida apropiadamente para ser representativa de los diversos sectores del acuífero. La frecuencia de monitoreo debe ser a lo menos mensual, aunque será de gran utilidad contar con mediciones más frecuentes, idealmente telemétricas, en las áreas de mayores fluctuaciones piezométricas por causas naturales o antrópicas.

Para realizar este análisis se requiere contar con series de datos suficientemente largas, en cualquier caso, mayores de 10 años e idealmente mayores de 20.

Una explotación podría ser catalogada de no sustentable cuando se comprueba que el nivel freático desciende en gran parte del acuífero en forma sostenida y permanente en el tiempo, con tasas anuales de descenso de trayectoria incierta que no muestren señales de una posible estabilización futura con los ciclos hidrológicos conocidos.

6.3 Constatación de la evolución de la capacidad productiva de los pozos

Cuando una explotación se realiza con caudales menores a la recarga media de largo plazo, los pozos de producción deberían poder mantener sus niveles de producción en el largo plazo (descontando las pérdidas de eficiencia por el envejecimiento de las obras). Por el contrario, una explotación podría ser catalogada de no sustentable cuando se comprueba que en gran parte del acuífero los pozos de producción muestran una pérdida de rendimiento sostenida en el tiempo, sin recuperación de estas mermas productivas tras los períodos anuales de recarga o luego de años húmedos

6.4 Revisión de la evolución de la calidad química del agua explotada

En determinadas situaciones, especialmente en acuíferos costeros o en sistemas acuíferos que presentan una estratificación de la calidad del agua a consecuencia de su mineralización por el contacto agua-roca, la explotación puede inducir un cambio de la calidad del agua extraída a umbrales indeseados, llegando a comprometer la sustentabilidad de los aprovechamientos que se realizan en la respectiva unidad hidrogeológica.

El estudio hidrogeoquímico que evalúe la evolución de la calidad del agua para estos efectos, debe ser capaz de discriminar si los cambios químicos se están produciendo debido a la extracción de agua en sí misma, o por otras actividades de origen antrópico que se desarrollen en la superficie.

6.5 Análisis de impactos en ecosistemas dependientes del agua subterránea

En las cuencas en que existen ecosistemas húmedos total o parcialmente hipogénicos, este es uno de los criterios más complejos de desarrollar, puesto que concurren varias disciplinas científicas en su evaluación. Además, el conocimiento científico detallado sobre el funcionamiento de los ecosistemas dependientes de las aguas subterráneas, así como sobre la cuantificación y valoración de los impactos ambientales, sociales y económicos que los pueden afectar, aún

es muy bajo en muchos países del mundo, incluyendo Chile.

La falta de líneas base del régimen natural de estos ecosistemas y de una apropiada comprensión de los flujos de agua que los sustentan hídricamente (lluvia, agua superficial, agua subterránea, régimen mixto), dificultan el establecimiento de relaciones directas de causalidad entre la evolución de su estado y la explotación que se realiza del acuífero. Para abordar esta compleja tarea, el primer paso siempre ha de ser una caracterización detallada de los impactos hidráulicos que la explotación puede estar causando en la superficie freática en las inmediaciones de los ecosistemas de interés. Éste es un insumo clave para un posterior estudio multidisciplinario que determine si las alteraciones en el nivel freático producen perjuicios significativos en los ecosistemas terrestres que dependen directamente de las aguas subterráneas.

En Chile en el marco del SEIA, se han realizado detallados y complejos estudios de este tipo, asociados a la evaluación ambiental de proyectos específicos, en los que se evalúan tanto los efectos ecosistémicos del proyecto en cuestión, como de la totalidad de los aprovechamientos del acuífero. Fuera de estos casos, en general, no se han realizado estudios de esta naturaleza y muchos acuíferos del país aún carecen de una evaluación ambiental detallada de los efectos sinérgicos del uso del agua subterránea.

7. CONCLUSIONES

El agua subterránea, fluyendo en sus circuitos de escorrentía natural, es un bien nacional de uso público, necesario para la naturaleza, y en algunos casos puede prestar servicios ecosistémicos intrínsecos de alta valoración social. Extraída de su fuente, esta agua es también un bien esencial para el abastecimiento de agua potable de millones de personas en Chile y el mundo, especialmente en zonas áridas y semiáridas, donde es la única fuente segura en cantidad y calidad, y de más bajo costo

relativo. Una vez satisfechas las necesidades vitales de las personas, el agua subterránea es un recurso económico que contribuye de manera insustituible al desarrollo de la sociedad, sobre todo en regiones áridas y semiáridas, como la extensa mitad norte del territorio chileno.

El objetivo principal de la gestión sustentable de las aguas subterráneas es compatibilizar su valor ambiental, social y económico. Las decisiones de gestión de los acuíferos comprenden importantes componentes socioeconómicas y políticas, además de las técnicas. Para decidir con qué intensidad se deben aprovechar las aguas subterráneas en cada acuífero, la sociedad organizada debe llegar a un consenso sobre la distribución equitativa de los beneficios, pero también de los costos asociados a los efectos negativos de la explotación.

Cualquiera sea el escenario futuro de las políticas públicas sobre la materia, se prevé que la actual explotación intensiva de los acuíferos en Chile es una situación que se mantendrá en el tiempo, puesto que no existe ninguna alternativa real a ella, tanto en cantidad, calidad, ubicuidad y costo.

Por lo tanto, el desafío de las próximas décadas será aplicar conceptos de explotación dinámica en todos los acuíferos explotados intensivamente, de modo tal que se asegure su explotación dentro del ciclo de la sustentabilidad, determinando caso a caso la cuantía de los recursos explotables que no provocará efectos indeseados en los aprovechamientos mismos y en terceros que puedan ser afectados por la explotación.

La explotación sustentable de los acuíferos será aquella que se pueda mantener indefinidamente en cantidad y calidad, logrando un equilibrio de largo plazo del sistema, preservando la totalidad o la mayor parte de los servicios que provee el acuífero, generando efectos en los demás componentes del ciclo hidrológico y en la naturaleza, que la sociedad involucrada esté dispuesta a aceptar.

De la interpretación armónica de los preceptos legales contenidos en el Código

de Aguas de Chile, se concluye que la legislación del ramo busca resguardar la sustentabilidad del acuífero dada su función de fuente de abastecimiento hídrico para múltiples usos, de lo cual derivaría la razón esencial de su necesaria conservación y protección en el largo plazo. En contrapartida, el Código de Aguas no contiene disposiciones expresamente destinadas a la cautela de las funciones ecosistémicas que las aguas subterráneas pudiesen prestar en la naturaleza.

La sustentabilidad medioambiental de la explotación en un sentido más amplio hasta ahora se ha analizado en el ámbito del SEIA, donde se procura la conservación de los ecosistemas directamente relacionados con estas aguas que podrían verse afectados por proyectos particulares. Evaluaciones similares deberían extenderse a todos los acuíferos que alimentan humedales de significancia ecosistémica, como una tarea fundamental de la planificación hidrológica de las cuencas a cargo de la Administración en conjunto con los usuarios organizados.

La explotación sustentable de las aguas subterráneas requiere la acción corresponsable del Estado y del colectivo de usuarios agrupados en las comunidades de aguas subterráneas, las que están llamadas a asumir el liderazgo de la planificación y gestión permanente con reglas claras y flexibles [35], todo ello con el apoyo de especialistas en los diferentes aspectos de las ciencias y técnicas involucradas [36,37].

La administración de las aguas subterráneas en un escenario de aprovechamiento intensivo resulta inviable sin una participación organizada de los usuarios [9,38], pero al mismo tiempo requiere de un marco normativo útil y de apoyo técnico, logístico e incentivos apropiados por parte del Estado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Carlos Ciappa, Francisco Echeverría, Eugenio Celedón, José Luis Delgado y al Dr. Emilio Custodio por la lectura del manuscrito y su desinteresado aporte

de ideas. Se agradece especialmente a la Dra. Laura Vitoria por las enriquecedoras discusiones durante el proceso de escritura del documento y a Humberto Peña por sus valiosos comentarios sobre las diversas temáticas tratadas en el artículo.

REFERENCIAS

- 1 Acosta, O. (2005). Intensive use of aquifer by mining activity in northern Chile. En A. Sahuquillo et al. (eds.), *International Association of Hydrogeologists Selected Papers*, 177-185.
- 2 DGA. (2017). Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. SIT N°419.
- 3 Acosta, O. (2018a). Cambio climático y aguas subterráneas. *Revista Vertiente, Alhsud Capítulo Chileno*, 19, 2-12.
- 4 DIRPLAN. (2016). Análisis de Requerimientos de Largo Plazo en Infraestructura Hídrica. Dirección de Planificación, Ministerio de Obras Públicas. Elaborado por INH.
- 5 DGA. (2016a). Atlas del Agua. Chile: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.
- 6 Custodio, E. (2015a). Aspectos hidrológicos, ambientales, económicos, sociales y éticos del consumo de reservas de agua subterránea en España: minería del agua subterránea en España. Barcelona: Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Universidad Politécnica de Cataluña.
- 7 Foster, S., Hirata, R., & Custodio, E. (2021). Waterwells: how can we make legality more attractive? *Hydrogeology Journal*, 29, 1365-1368.
- 8 *Revista del Campo*. (03/05/2021). Diario El Mercurio, Santiago, Chile.
- 9 Peña, H. (2019). Gestión sustentable del agua subterránea en Chile: tensión entre normativa y práctica. *Revista Vertiente, Alhsud Capítulo Chileno*, 20, 60-79.
- 10 JICA. (1993). The study on the development of water resources in northern Chile. Groundwater Report. Elaborado para la Dirección General de Aguas.
- 11 Acosta, O., Guimerà, J., Custodio, E., Ansón, I., & Delgado, J. L. (2013). Contribución al conocimiento de la hidrogeología de las cuencas intraandinas del N de Chile. En González et al. (eds.), *El Agua Subterránea como Recurso Estratégico. Congreso Argentino de Hidrogeología* (I: 118-125). La Plata, Argentina: Editorial Universidad de La Plata.
- 12 Corfo. (2019). Exploración de aguas subterráneas profundas y acuíferos periféricos en cuencas de la región de Valparaíso. Informe anexo isótopos y gases nobles. Elaborado por CSIRO Chile.
- 13 Herrera, C., Godfrey, L., Urrutia, J., Custodio, E., Jordan, T., Jódar, J., Delgado, K., & Barrenechea, F. (2020). Recharge and residence times of groundwater in hyper arid areas: The confined aquifer of Calama, Loa River Basin, Atacama Desert, Chile. *Science of the Total Environment*, 752, 141847.
- 14 Celedón, E. (1978). Aspectos Económicos del Uso de Aguas Subterráneas. Curso de Postgrado Aguas Subterráneas. SENDOS-OPS-AIDIS-Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- 15 Acosta, O. (2018b). Chapter Water and Mining. En G. Donoso (ed.), *Water Policy in Chile*. Part of book series Global Issues in Water Policy by Springer.
- 16 Collin, J. J., & Margat, J. (1993). Overexploitation of water resources: overreaction or an economic reality? *Hydroplus*, 36, 26-37.
- 17 Margat, J. (1992). Quel est le concept de surexploitation utile a la gestión des eaux souterraines. *Hydrogéologie*, 4, 145-152.
- 18 Custodio, E. (2002). Aquifer overexploitation, what does it mean? *Hydrogeology Journal*, 10(2), 254-277.
- 19 Custodio, E. (2010). Intensive groundwater development: A water cycle transformation, a social revolution, a

- management challenge. En L. Martínez-Cortina, A. Garrido, & E. López-Gunn (eds.), *Rethinking Water and Food Security*. Botín Foundation/CRC Press (pp. 259-298).
- 20 Custodio, E., Llamas, M. R., Hernández-Mora, N., Martínez-Cortina, L., & Martínez-Santos, P. (2009). Issues related to intensive groundwater use. En A. Garrido, & M. R. Llamas (eds.), *Water Policy in Spain*. CRC Press/Botín Foundation (pp. 145-164).
 - 21 Foster, S. S. D. (1993). Unsustainable development and irrational exploitation of groundwater resources in developing nations: an overview. En *Aquifer Overexploitation*. International Association of Hydrogeologists, Selected Papers 3 (pp. 385-402). Heise.
 - 22 Hernández-Mora, N., Llamas, M. R., & Martínez-Cortina, L. (2001). Misconceptions in aquifer overexploitation: Implications for water policy in Southwestern Europe. En C. Dosi (ed.), *Agricultural Use of Groundwater, Towards Integration between Agricultural Policy and Water Resources Management* (pp. 107-125). Kluwer Academic Press.
 - 23 Llamas, M. R., & Custodio, E. (eds.). (2003). *Intensive use of groundwater: Challenges and opportunities*. Lisse: Balkema Publishers.
 - 24 Martínez-Cortina, L., L. Mejías, M., Díaz-Muñoz, J. A., Morales, R., & Ruiz-Hernández, J. M. (2011). Cuantificación de recursos hídricos subterráneos en la cuenca alta del Guadiana. Consideraciones respecto a las definiciones de recursos renovables y disponibles. *Boletín Geológico y Minero de España*, 122(1), 17-36.
 - 25 Acosta, O., & Custodio, E. (2008). Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (Norte de Chile). *Bol Geol Min*, 119(1), 33-50.
 - 26 DGA. (1996). Determinación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en el sector del acuífero de la Pampa del Tamarugal. *Minuta Técnica SDT N°68*, Santiago, Chile.
 - 27 Custodio, E. (2015b). Conferencia Inaugural. Sustentabilidad de la explotación del agua subterránea. Congreso Anual Alhsud Capítulo Chileno, 19 de noviembre, Santiago, Chile.
 - 28 Acosta, O. (2010a). El Caso Coposa: Cómo pasar del conflicto ambiental a la gestión hídrica proactiva y transparente. En G. Delaveau y colaboradores (eds.), *Transparencia en el ámbito público privado: balances y desafíos pendientes*, Anuario Chile Transparente, Capítulo Chileno de Transparencia Internacional (pp. 117-123).
 - 29 Acosta, O. (2010b). A socially sustainable approach for intensive use of aquifers in northern Chile. En J. Wiertz (ed.), *Proceeding WIM2010 2nd International Congress on Water Management in the Mining Industry* (pp. 147-155). Santiago, Chile.
 - 30 López-Geta, J. A. (2007, 7 de noviembre). Estado actual de la implementación de las directivas en España. En J. Molinero et al. (eds.), *Las aguas subterráneas en España ante las Directivas Europeas: retos y perspectivas*. Santiago de Compostela.
 - 31 Código de Aguas. (1969).
 - 32 DGA. (2016b). Disponibilidad de recursos hídricos para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en el valle del río Aconcagua, sectores hidrogeológicos de San Felipe, Putaendo, Panquehue, Catemu y Llayllay. *IT DARH N°333, SDT N°387*.
 - 33 DGA. (2020). Plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca de Aconcagua. *SIT N°464*.
 - 34 DGA. (2015). Determinación de la disponibilidad de aguas subterráneas en el valle del río Aconcagua. *IT DARH N°163, SDT N°372*.
 - 35 Custodio, E. (2011). Conferencia Inaugural. Desafíos para la planificación y

gestión del agua subterránea en el siglo XXI. Actas del Congreso Ibérico de Aguas Subterráneas, AIH-GE, Zaragoza, España.

- 36 Codina, J. (2004). Las aguas subterráneas: una visión social. El caso de la Comunidad del Delta del Llobregat. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (España)*, 98(2), 323-329.
- 37 López-Gunn, E., & Martínez-Cortina, L. (2006). Is self-regulation a myth?: Case study on Spanish groundwater user association and the role of higher authorities. *Hydrogeology Journal*, 14(3), 361-375.
- 38 Custodio, E., & Llamas, M. R. (2003). Intensive use of groundwater: introductory considerations. En M. R. Llamas, & E. Custodio (eds.), *Intensive use of groundwater: challenges and opportunities*. Balkema.