

## GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN HÍDRICA EN ZONA ÁRIDA: CASO DE LA REGIÓN DE TARAPACÁ, NORTE DE CHILE.

### WATER RESOURCES INFORMATION MANAGEMENT IN ARID AREA: CASE OF THE REGION OF TARAPACÁ, NORTH OF CHILE

Elisabeth Lictevout<sup>1</sup>, Constanza Maass<sup>1</sup>, Damián Córdoba<sup>1</sup>, Venecia Herrera<sup>1,2</sup>, Reynaldo Payano<sup>1</sup>, Jazna Rodriguez<sup>1</sup> y Jose Aguilera<sup>1</sup>.

#### Resumen:

La Región de Tarapacá, localizada en el extremo norte de Chile, es una de las zonas más áridas del mundo, parte del desierto de Atacama. El contexto geográfico, climático, geomorfológico y geológico le confieren características hidrológicas e hidrogeológicas únicas que generan ambientes evaporíticos (salares) y acuíferos con recarga alóctona que representan el único recurso permanente. Desde la década de los noventa, con la instalación de los grandes proyectos de minería, el crecimiento poblacional y económico de la región ha generado una fuerte presión sobre los recursos hídricos, aumentando la demanda hídrica cual, en la actualidad, es mayor a la disponibilidad, dando pie a escenarios de competición y conflictos entre usuarios. En zona árida, la heterogeneidad temporal y espacial de las variables hidrometeorológicas y la complejidad de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos involucrados requieren disponer de una cantidad más importante de datos, tanto espacial como temporalmente, para generar modelos hidrológicos e hidrogeológicos predictivos. La Dirección General de Aguas (DGA) es la institución mandatada por el Estado para operar y mantener una red de monitoreo hidrométrica de escala regional. Esta red genera datos que permiten describir las características generales de los recursos hídricos y tendencias principales pero no permite una caracterización al nivel de cuenca o masa de agua. Los datos registrados presentan deficiencias tanto en cantidad como en calidad. Las carencias al nivel espacial y temporal, así como las deficiencias en la representatividad y fiabilidad de los datos no permiten tener un conocimiento suficiente de la situación de los recursos hídricos, cuantificarlos y predecir su evolución. Por consiguiente, actores privados han desarrollado su propia red hidrométrica y sus propios estudios respondiendo a objetivos sectoriales y locales. Generan una cantidad de datos no despreciable. Además, en Chile, se han registrado 43 organismos vinculados con la gestión del agua. Así, la información sobre los recursos hídricos es dispersa y de difícil acceso. En este contexto de incertidumbre en cuanto al nivel de conocimiento e información existente sobre los recursos hídricos de la región, el Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) de la Región de Tarapacá generó un diagnóstico de la información hídrica existente, en base a una recopilación, sistematización y análisis de los datos y estudios existentes. Los principales productos son un análisis crítico y una herramienta de gestión y transferencia de la información. El análisis integral de todos los datos generados en la zona, tanto por actores públicos como privados permite reducir la incertidumbre de los estudios y modelos. Compartir esta información en una plataforma de gestión de la información permitiría optimizar recursos y mejorar la gestión conjunta de los recursos hídricos. En este contexto, mejorar el conocimiento de los recursos hídricos constituye una precondition para su gestión eficiente y por ende al desarrollo sostenible de la región.

**Palabras clave:** Recursos hídricos, zona árida, Región de Tarapacá, diagnóstico, red de monitoreo hidrométrica, gestión del agua.

#### Abstract

The Tarapacá Region, located in the extreme north of Chile, is one of the most arid areas in the world, part of the Atacama Desert. The geographical, climatic, geomorphological and geological characteristics lend the region unique hydrological and hydrogeological features that generate evaporitic environments (salt flats) and large aquifers with allochthonous recharge. Groundwater represents the only permanent water resource. Since the nineties, with the onset of large mining projects, the constant population and economic growth generated strong pressure on water resources, increasing demand, today higher than water supply, boosting scenarios of competition and conflict over water uses. In arid area, the temporal and spatial heterogeneity of hydrometeorological variables and the complexity of hydrological and hydrogeological processes involved, require the availability of a larger amount of data, both temporarily and spatially to generate predictive hydrological and hydrogeological models. The Chilean Water General Directorate (DGA) maintains and operates a regional scale hydrometric network, as a legal obligation under the Chilean Water Code. The monitoring network allows the description of general characteristic of water resources and trends at regional and national level but does not allow the characterization

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH). Universidad Arturo Prat. CONICYT REGIONAL/CIDERH. R09I1001. Elisabeth.lictevout@ciderh.cl; +56 (57) 2530800

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias de la Salud. Universidad Arturo Prat.

at water basin or water body level. Recorded data present deficiencies concerning both the quantity and the quality. Gaps in space-time data and deficiencies of data representativeness and reliability do not allow an accurate knowledge of the water resources situation and evolution. Thus, private actors developed their own hydrometric network and their own studies, responding to their own needs. It represents a non-negligible amount of Data. Moreover, in Chili, 43 organisms linked with water resources management were registered. Thus, the water resources information is dispersed and difficult to access. In this context of uncertainty about the level of knowledge and existing information on water resources in the region, the Water Resources Research and Development Center – CIDERH of Tarapacá Region, established in 2010, produces an assessment of the existing information, based on a review, systematization and analysis of water resources data and studies. The main results are a critical analysis and an information management and transfer tool. An integrated analysis reduces the uncertainty of studies and models. To share this information on a platform that manages the information would optimize resources and improve the joint management of water resources. In this context, a thorough knowledge of water resources is a precondition to its efficient use and therefore to the sustainable development of the region.

**Key words:** Water resources, arid area, Tarapacá Region, water assessment, water management, hydrometric monitoring network.

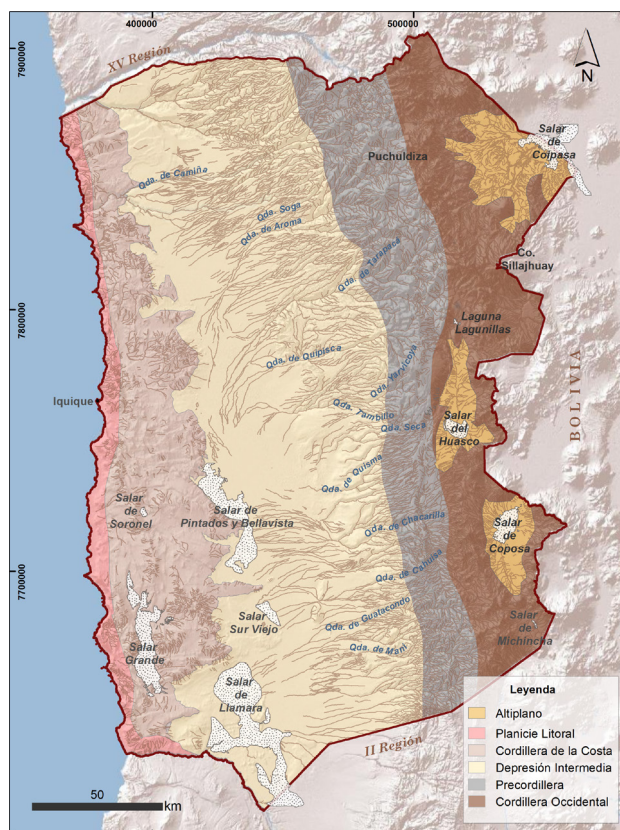
## INTRODUCCIÓN

La Región de Tarapacá, ubicada en el extremo norte de Chile, es una de las zonas más áridas del mundo. Se caracteriza por presentar cuencas cerradas o endorreicas en el Altiplano (cuencas altiplánicas) y en la Depresión Central (cuenca Pampa del Tamarugal) y cuencas arreicas en la zona costera. Es limitada al norte y al sur por cuencas exorreicas que desembocan al mar (Camiña y Río Loa; figura 1).



**Figura 1:** Mapa de las zonas hidrográficas de la Región de Tarapacá

De oeste a este, se definen cinco elementos geomorfológicos: Planicie litoral y Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera, Altiplano y Cordillera de los Andes (figura 2).



**Figura 2:** Unidades geomorfológicas de la Región de Tarapacá

Las precipitaciones, casi nulas en el Litoral, la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, aumentan gradualmente con la altura en la Precordillera hasta alcanzar en el Altiplano un promedio anual de 150 a 180 mm (PUC, 2009; GCF, 2010). La evaporación juega un papel predominante en el balance hídrico, ya que supera ampliamente las precipitaciones al alcanzar un promedio entre 2.000 y 3.000 mm/año en el Litoral, la Cordillera de la Costa y la Depresión Central, y entre 1.000 y 2.000 mm/año en el Altiplano (PUC, 2009; GCF, 2010). Dominan ambientes evaporíticos (salares) y napas subterráneas con recarga alóctona que conforman el único recurso permanente (Lictevout et al., 2013). Estas napas se recargan

lateralmente desde las zonas de precipitación en el Altiplano y Precordillera mediante movimientos muy lentos del agua (Dingman & Galli, 1965; Margaritz et al. 1990; Grilli et al., 1999). Se ha estimado que gran parte de los recursos hídricos subterráneos de la región se generaron durante una fase húmeda comprendida entre los 17.000 y 11.000 años y crecidas durante el Holoceno (últimos 11.000 años) hasta la actualidad (Aravena, 1995; Margaritz et al., 1990; Grilli et al., 1999). Lo anterior lleva a considerar parte del agua subterránea de la región como no renovable (Grilli et al., 1999; Tröger et al., 2004). Los flujos superficiales alcanzan la Depresión Central de forma esporádica durante eventos hidrometeorológicos extremos. Los recursos hídricos superficiales y subterráneos de la Región de Tarapacá presentan un amplio intervalo de valores de salinidad natural, entre 50 y 350.000 (contenido de Sólidos Totales Disueltos - STD) así como elementos tóxicos y/o nocivos para la salud. Se han identificado áreas con elevadas concentraciones de Arsénico (As), Boro (Br) y Manganeseo (Mn), principalmente en todas las aguas del Altiplano y algunas quebradas (Aroma, Chacarilla y Guatacondo). La distribución de estos elementos de origen natural (sedimentos volcánicos de la cordillera de los Andes) es altamente heterogénea (Ayala et al., 1994; DGA, 1978). Esta heterogeneidad temporal y espacial de las variables hidrometeorológicas e hidrológicas es característica de las zonas áridas, a la cual se añade a la complejidad de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos involucrados.

Desde las décadas de los noventa, con la instalación de los grandes proyectos de minería, el crecimiento poblacional y económico de la región ha generado una fuerte presión sobre los recursos hídricos, aumentando la demanda. De hecho, el norte de Chile presenta una demanda hídrica mayor a la disponibilidad (Banco Mundial, 2011), dando pie a escenarios de competición y conflictos entre usuarios – minería, abastecimiento de la población, agua ancestral y agricultura, medioambiente. Se ha generado conflictos entorno al uso de ciertos cuerpos de agua, además y resaltado la existencia de áreas naturales altamente sensibles. El rubro con el caudal otorgado más alto lo constituyen las compañías mineras seguido por la empresa sanitaria (abastecimiento de la población). La estimación del consumo de agua (extracciones) y de los respectivos usos, basada en la información contenida en el Catastro Nacional de Agua de la Dirección General de Aguas (DGA), organismo del Estado encargado de gestionar y administrar el recurso hídrico, muestra un alto grado de incertidumbre debido a que la información se encuentra incompleta y desactualizada. Dicha incertidumbre afecta la estimación de la descarga, y por ende, el balance hídrico de las cuencas y acuíferos. De acuerdo a los estudios analizados (JICA, 1995; DICTUC, 2005, 2007<sup>a</sup> y 2007<sup>b</sup>; DGA, 2009 y 2011),

todos los acuíferos explotados (con extracciones) de la región muestran un balance negativo (las descargas superan la recarga), si bien tal afirmación no se puede cuantificar, por una parte, por no disponer de información actualizada y, por otra parte, por existir incertidumbres en la estimación de la recarga y las descargas. Esta situación se materializa con un descenso continuo y paulatino de los niveles estáticos.

En la actualidad, los usuarios e instituciones públicas generan datos y realizan estudios de acuerdo con sus propias necesidades, de manera puntual y sectorial. El Banco Mundial y Gobierno de Chile (2013) han registrado 43 organizaciones vinculadas con la gestión del agua. El acceso a la información (datos, estudios, etc.), dispersa en las diferentes entidades públicas, privadas y académicas, es un proceso difícil y lento. La información generada por actores privados no es accesible o no es conocida, aunque sea de ámbito público.

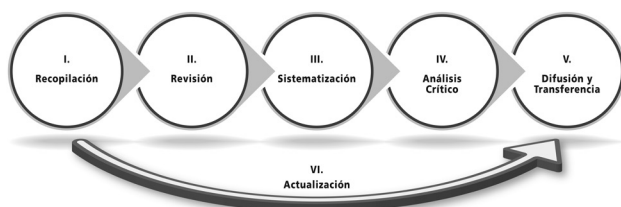
Esta situación ha generado a un clima de incertidumbre y desconfianza por parte de las autoridades e instituciones públicas, incluso de actores privados. El desconocimiento de la cantidad y calidad de la información existente no permite caracterizar y cuantificar los recursos hídricos disponibles y su evolución en el tiempo acorde con los escenarios de desarrollo actuales. Dificulta o impide una toma de decisión informada, tanto por parte de los usuarios del recurso, como de las autoridades.

En este contexto se creó en 2010 el Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) de la Región de Tarapacá. La primera etapa del Centro fue la realización de un diagnóstico de la información disponible sobre los recursos hídricos de la Región, con el objetivo de realizar un análisis cualitativo, cuantitativo, espacial y temporal de la información existente; además se identificaron brechas de información y se creó una herramienta de gestión y transferencia de la información, dirigida a toda persona o institución con actividades vinculadas al recurso hídrico.

## METODOLOGÍA

La metodología desarrollada consistió en un proceso de seis etapas, las cuales se detallan de manera cronológica en la figura 3: 1) Recopilación exhaustiva de estudios, datos, cartografías y la identificación de los actores generadores de datos en la región, incluyendo entidades públicas, privadas y académicas de ámbito local, nacional e internacional; 2) Revisión de la información; 3) Digitalización y sistematización en un Sistema de Información Geográfica (SIG); 4) Análisis cualitativo y cuantitativo de la información disponible, a escala regional y por unidad hidrográfica; 5) Difusión y transferencia de los resultados y 6) Actualización de la información.





**Figura 3:** Etapas metodológicas

## 1. Recopilación de la información

La primera etapa consistió en una búsqueda y recopilación exhaustiva de información referente a los recursos hídricos y otros temas afines de la región, con especial interés en los ámbitos de la hidrología, hidrogeología, hidroquímica, geología y geomorfología. Esto se realizó por medio de la revisión de bibliotecas, centros de documentación, bases de datos y páginas web, desde instituciones públicas, empresas privadas y entidades académicas. Se obtuvieron en total 306 documentos, incluyendo estudios, artículos de revistas científicas, tesis, memorias de congresos, catastros, cartografías, Planes de Seguimiento Ambiental (PSA), informes de monitoreo y Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA). A escala temporal, se recopiló información desde la década de 1890 hasta la fecha, destacándose una mayor frecuencia de documentos en temas hídricos, a partir de la década de 1960. La recopilación de bases de datos alfanuméricas, cartografías y coberturas geográficas o *shapefiles*, incluyó por una parte información hidrometeorológica y agrometeorológica, catastros de pozos, monitoreo de empresas privadas e información sobre Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA), y por otra, información de carácter espacial sobre la hidrografía, geografía, geología y geomorfología de la región. En esta etapa, se realizó una base de datos de las entidades generadoras de datos en la región.

## 2. Revisión de la información

Se revisó el contenido de la información recopilada, con especial énfasis en los objetivos, metodología y resultados estipulados en cada documento, así como en el tipo y cantidad de datos generados, el área de estudio y el contexto de formulación de la información. Todo esto se integró en una ficha técnica por documento, la cual se construyó como una herramienta de trabajo para las siguientes etapas de sistematización y análisis de la información; permitió sintetizar la información más relevante en cuanto a fuente generadora de datos e información. En este sentido la etapa de revisión tuvo dos objetivos:

- La priorización de la información con la realización de 211 fichas técnicas de los documentos considerados más importantes en términos de calidad (aporte de información nueva) y cantidad de información (generación de datos).

- La trazabilidad de la información: se realizó un seguimiento en cuanto al contenido, origen, localización, método de obtención, tiempo de medición, vigencia y forma de acceso a la información. Se realizaron reuniones de trabajo con todos los actores generadores de datos con el objetivo de aclarar dudas y confirmar los datos sistematizados.

En esta etapa se consideró toda la información existente, independiente del nivel de precisión, confianza y representatividad, ya que la validación de estos criterios depende del objetivo para el cual se pretende usar los datos.

## 3. Digitalización y sistematización de la información

Se sistematizó la información recopilada y revisada de acuerdo a tres unidades: un Centro de Documentación, un Sistema de Información Geográfica (SIG) y fichas **síntesis por zona hidrográfica**. El Centro de Documentación se creó en las oficinas del CIDERH como una unidad de información especializada en el tema de los recursos hídricos de la región. Para esto se ordenaron todos los documentos recopilados en un sistema de clasificación documental de acuerdo a la temática, tipología, año de formulación y área de estudio del documento. Asimismo se le asignó a cada ejemplar un código único de identificación. Se elaboró un SIG en el formato geodatabase (GDB) mediante el programa ArcGIS 10, utilizando como sistema de referencia espacial las coordenadas UTM, el datum WGS 84 y el huso 19 sur. Para esto se seleccionaron y estandarizaron bases de datos con componente espacial identificadas en la etapa de revisión, a partir de las cuales se crearon capas de información referentes a estaciones de monitoreo del recurso hídrico así como de otros elementos hidrológicos, geológicos, geomorfológicos y de índole legal.

## 4. Análisis crítico

Se analizó de forma integral la cantidad y calidad de información disponible a escala regional y por zona hidrográfica, priorizando la información de relevancia. Se generó un diagnóstico en cuanto a las brechas de información y necesidades de información y conocimiento. El análisis espacial y temporal se realizó con la herramienta SIG, lo que permitió clasificar las unidades hidrográficas de cada zona de acuerdo al nivel de información.

## 5. Difusión y transferencia

Esta etapa tuvo como objetivo transmitir y poner a disposición de la comunidad los resultados del trabajo. En esta línea se creó el “*Observatorio del Agua*”, herramienta web de uso público integrado por un SIG web y por un Centro de Documentación asistido

mediante un catálogo en línea. La creación del SIG *web* se realizó mediante la exportación de SIG a la plataforma *ArcGIS online*. Por otro lado, el catálogo en línea del Centro de Documentación se elaboró mediante el programa *ASP VBScript*, permitiendo crear un sistema de consulta de toda la documentación disponible en el centro. Finalmente, se editó un libro que se difundió ampliamente a todos los actores regionales, nacionales e internacionales.

## 6. Actualización

Finalmente, considerando que la generación de información es un proceso dinámico, se contempla una actualización constante con la nueva información que se genere en la región, o en su defecto, se integrará información existente no considerada. Específicamente, se definió la necesidad de actualización constante del “*Observatorio del Agua*” y del trabajo de análisis regional y por zona hidrográfica.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Región de Tarapacá ha sido objeto de una gran cantidad de estudios: con más de 300 documentos recopilados a la fecha, sistematizados, integrados y analizados en conjunto, se construyó una imagen actualizada del conocimiento de los recursos hídricos de la región, focalizando en la trazabilidad de la información, es decir, en la reconstrucción de la historia completa de la información: ¿Quién la generó y quien la posee? ¿Cuándo se generó? ¿Por qué se generó? ¿Cómo se generó (metodología)? ¿Dónde se encuentra? ¿Cuál es su disponibilidad y accesibilidad?

Si bien es destacable la cantidad de información recopilada, se identificaron brechas tanto en la calidad como en la cantidad de información disponible, al nivel espacial y temporal. Todos los estudios existentes se basan en los datos generados por la red de monitoreo de la DGA, la cual presenta deficiencias que generan incertidumbres tanto a nivel de calidad y cantidad de los datos generados, como a nivel temporal y espacial. **A nivel espacial**, existen cuencas y acuíferos que no presentan datos ni estudios o presentan un nivel muy escaso de información, a pesar de tener características hidrológicas e hidrogeológicas importantes (figuras 4, 5, 6 y 7): en la zona altiplánica, de un total de diez cuencas (PUC, 2009), siete no tienen estaciones fluviométricas DGA (cuatro cuencas no tienen ninguna estación fluviométrica) y nueve no tienen pozos de monitoreo DGA (6 cuencas no tienen ningún pozo de monitoreo). En la zona Pampa del Tamarugal, de un total de 10 cuencas, seis no tienen estaciones meteorológicas DGA (cinco cuencas no tienen ninguna), nueve cuencas no tienen estaciones fluviométricas DGA (ocho no tienen ninguna), nueve cuencas no tienen pozos de monitoreo DGA (siete no tienen ninguno). En la zona Salar de Llamara, de un total de 3 cuencas (DICTUC, 2006), dos no tienen estaciones

meteorológicas y fluviométricas. No existen pozos de monitoreo de la DGA. Existe un vacío de información hidrogeológica en todas las cuencas y acuíferos de la región, a excepción de los acuíferos con interés productivo (Pampa del Tamarugal, Lagunilla, Coposa y Minchincha). Las cuencas y subcuencas en las cuales se registraron datos y que fueron objeto de estudios, presentan información no siempre confiable, representativa y suficiente:

- **A nivel temporal**, en la región existen algunos registros de precipitación, caudal superficial, niveles de acuíferos y calidad del agua de varias décadas de duración. Aunque escasos, representan una fuente de información muy valiosa que permite analizar estadísticamente el comportamiento de las variables. Sin embargo su registro continuo es todavía escaso con interrupciones durante eventos hidrometeorológicos extremos o fallos tecnológicos.
- **La representatividad** de los datos generados por la red de monitoreo de la DGA no siempre está asegurada: la localización de las estaciones de monitoreo responde en prioridad a criterios de seguridad y acceso; los pluviómetros están ubicados en el fondo de los valles, en los poblados, lo que resulta en un vacío de información meteorológica en cabecera de cuencas y en la presencia de obstáculos que interfieren con la cantidad de lluvia captada por el pluviómetro (árboles, cerros, cables, etc.). Las estaciones fluviométricas (registro de caudales superficiales) no están diseñadas para medir los caudales de crecida, incluso, en varios casos, no miden la totalidad del flujo base: fluctuación del lecho del flujo base, división en varios brazos de escurrimiento, secciones no bien definidas, presencia de bocatomas para riego. Los pozos de monitoreo no están localizados en lugares estratégicos, tanto al nivel hidrogeológico (cierre de cuencas y subcuencas, límites de acuíferos) como a nivel de monitoreo de extracciones. Existen acuíferos explotados que no son monitoreados por la institución pública responsable.
- **El acceso a la información** generada por la DGA se realiza mediante la entrega de ficheros Excel disponibles tres meses después del levantamiento de la información registrada. Esta información es validada por la oficina nacional de la DGA pero no es procesada ni se entrega analizada.

La información hidrogeológica presenta muchos vacíos que impiden realizar una caracterización y cuantificación precisa de la disponibilidad de agua en los diferentes cuerpos de agua de la región, aun cuando los acuíferos albergan el único recurso permanente que sostiene el desarrollo regional. No están bien definidos los límites de los acuíferos y se desconoce la evolución de los niveles piezométricos. Los flujos subterráneos subsuperficiales y profundos, y sus in-

teracciones con el recurso superficial, no han sido descritos y hasta ahora han sido considerados como compartimentos independientes. En consecuencia, no existe una comprensión del mecanismo de recarga desde la Precordillera y el Altiplano a donde ocurren las precipitaciones hacia la Depresión Central (Lictevout et al., 2013). Los flujos profundos han sido descritos por algunos estudios (JICA, 1995; Karzulovic & Garcia, 1979) que analizaron la composición isotópica del agua subterránea y superficial (Margaritz et al., 1990; Risacher et al., 1998). Sin embargo, las dificultades metodológicas y el carácter puntual de los estudios, no permitieron comprobar la existencia de estos flujos, aunque la presencia de aguas termales en la Precordillera (Mañiña, Pica, Chuzmisa) entre 1500 y 3500 m s.n.m. demuestra circulaciones hídricas profundas. En general, no se ha dado la importancia suficiente al conocimiento de la geología de los acuíferos de la región (Pampa del Tamarugal, Pica, Salar de Llamara y acuíferos del Altiplano y acuíferos aluviales de las quebradas). A pesar de que se realizaron modelos numéricos de los acuíferos con intereses productivos, no se considera la geología como un factor determinante en las características hidrogeológicas del modelo, ya que no se ha tomado en cuenta la heterogeneidad espacial, vertical y horizontal (anisotropía) (Lictevout et al., 2013). Se considera que la insuficiencia de datos de entrada repercute directamente en la calidad del modelo e introduce una gran incertidumbre sobre los resultados. Por otro lado, el conocimiento de ciertos parámetros hidrológicos se considera insuficiente como es el caso de la evaporación, de la evapotranspiración y de la escorrentía. La evaporación juega un papel predominante en el balance hídrico al superar ampliamente las precipitaciones, pero no existe una metodología satisfactoria para estimar esta variable con menor incertidumbre: la bandeja de evaporación presenta problemas tecnológicos y logísticos (el agua se congela en el Altiplano y su relleno se dificulta en zonas de difícil acceso y poca población); el domo no permite una medición continua sino puntual, cuando la variación diaria y estacional de la evaporación es grande. Los sensores dan una estimación indirecta. Las incertidumbres sobre estos parámetros afectan directamente la estimación del balance hídrico y de la recarga actual de los acuíferos (cantidad de agua que se infiltra y que se evapora). Existen pocas estaciones de monitoreo de la calidad de agua, especialmente en lugares estratégicos (cerca de actividades contaminantes). No existe información sobre enfermedades hídricas. Debido a que se identifican áreas con elevadas concentraciones de As, Br y Mn, principalmente en todas las aguas del Altiplano y en varias quebradas, es necesario el monitoreo de las concentraciones de vanadio (V), zinc (Zn) y selenio (Se) por su relación con el arsénico. También es necesario el monitoreo de la calidad del agua según las normas de vigilancia de las aguas continentales: programas de tres años en cuatro estaciones climáticas. La estimación del consumo de agua (extraccio-

nes) y de los respectivos usos, basada en la información contenida en el Catastro Nacional de Agua de la DGA, presenta altas incertidumbres y se intuye una diferencia notable entre el caudal otorgado y el consumo real, ya que la DGA por limitaciones internas no ha podido poner en marcha un programa de control de extracciones de los DAA, derecho real otorgado de manera gratuita y a perpetuidad. Asimismo, se desconoce el uso asignado a cada DAA y las transacciones de DAA que ocurren después del otorgamiento (propietario actual del DAA). Esto conlleva una restricción importante para la estimación de los balances hídricos de la región.

La heterogeneidad espacial y temporal de las variables hidrometeorológicas y la complejidad de los procesos hidrogeológicos involucrados requieren disponer de una cantidad suficiente de datos tanto al nivel espacial que temporal para reducir la incertidumbre. Son necesarias series muy largas de tiempo (varias décadas) para aproximarse a un promedio que tenga representatividad estadística; también es necesario una cobertura que tenga en cuenta la heterogeneidad espacial, ubicando las estaciones de monitoreo en lugares estratégicos para obtener datos representativos de la variables. En caso de la precipitación, las variaciones locales se visualizan en distancias a veces inferiores a 10 kilómetros. En los estudios actuales, la insuficiencia en la cantidad de datos se compensa por información generada en otras cuencas.

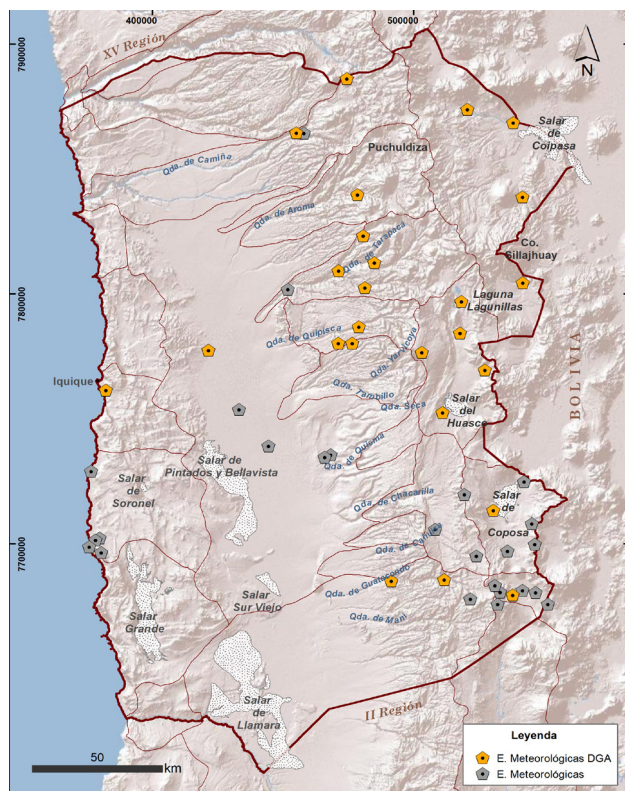
La mayoría de los estudios se generaron de forma puntual, de acuerdo a necesidades sectoriales. Muchos se basan y se limitan al análisis de los datos generados por las estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA. Entre los estudios que generaron datos de forma más integral, se destaca JICA-DGA (1995), DICTUC (2008) y PUC (2009). Los datos generados por estaciones de monitoreo pertenecientes a instituciones privadas y académicas raramente se han analizados en conjunto. A parte de la red de monitoreo hidrometeorológica de la DGA existen redes privadas, cuyos datos son difícilmente accesible aunque sean de ámbito público (registrados en el marco de una Resolución de Calificación Ambiental, por ejemplo). En este trabajo, se realizó una recopilación exhaustiva de todos los puntos en los cuales se genera información meteorológica, fluviométrica, hidrogeológica y de calidad de agua, tanto de fuente pública, académica como privada. Resultó en la elaboración de una imagen clara de quién generó información, quien la posee, cuándo se generó, por qué se generó, cómo se generó, dónde se encuentra y cuál es su disponibilidad y accesibilidad.

En resumen, se observa que, a nivel regional, se encuentran vigentes 18 estaciones meteorológicas DGA versus 50 estaciones meteorológicas privadas, académicas y otras instituciones públicas (figura 4). Existen 12 estaciones fluviométricas de la DGA versus 10 estaciones fluviométricas pertenecientes a empresas privadas (figura 5). Existen 39 pozos de monitoreo de la DGA versus 515 pozos monitorea-

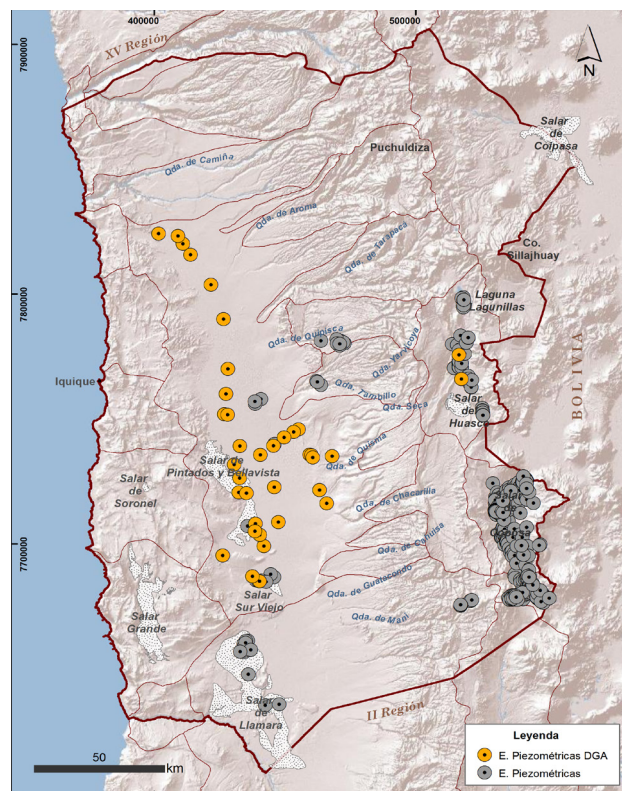


dos por empresas mineras (figura 6). Finalmente la DGA cuenta con 17 estaciones de monitoreo de calidad de agua (subterráneo y superficial) versus 179 pertenecientes a entidades privadas (figura 7). Aun-

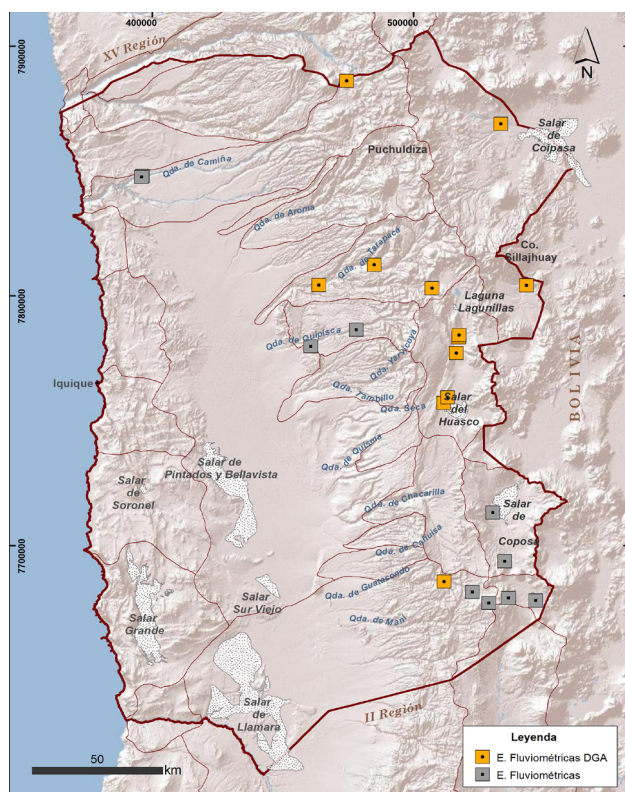
que no repartido espacialmente de manera homogénea (se ubican en las zonas de interés particulares), analizados en conjunto con la red pública, reducirían la incertidumbre de los modelos y estudios.



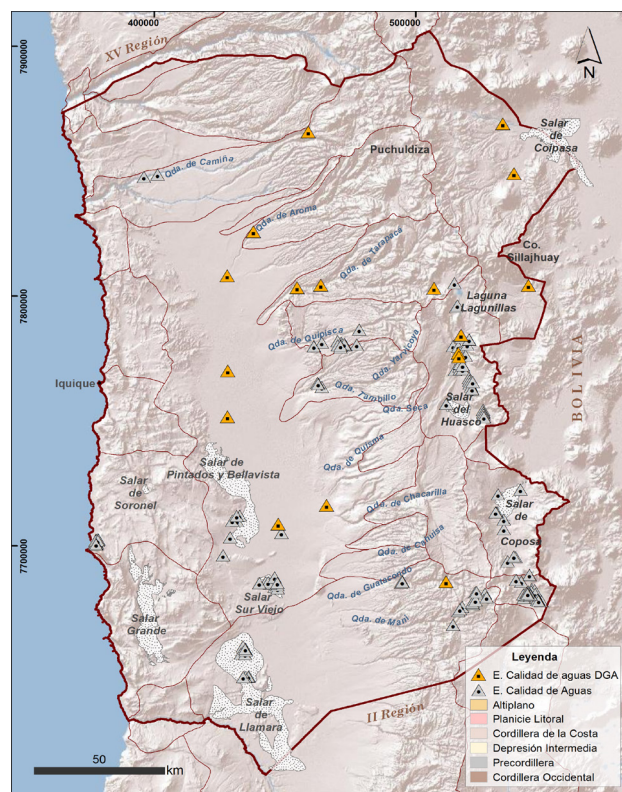
**Figura 4:** Mapas de las estaciones meteorológicas de la Región de Tarapacá



**Figura 6:** Mapas de las estaciones piezométricas de la Región de Tarapacá



**Figura 5:** Mapas de las estaciones fluviométricas de la Región de Tarapacá



**Figura 7:** Mapas de las estaciones calidad de agua de la Región de Tarapacá



## El Observatorio del Agua, herramienta local y regional de gestión de la información hídrica:

Uno de los principales productos del trabajo fue la creación de una herramienta para la gestión y transferencia de la información hídrica. El *Observatorio del Agua* se compone de dos unidades: un *Centro de Documentación* y un *SIG web* y se presenta como una herramienta de uso público para toda la comunidad. El acceso a esta se realiza por medio del *sitio web* [www.ciderh.cl](http://www.ciderh.cl). La herramienta *web* nace como respuesta al tercer objetivo específico del estudio: “*Crear una herramienta de gestión y transferencia de la información, dirigida a toda persona o institución con actividades vinculadas al recurso hídrico*”. Pensada inicialmente como una necesidad imperativa de tener información y datos para realizar las investigaciones del Centro, se desarrolló en respuesta a la necesidad regional de tener acceso a esta información para poder abordar la gestión de sus recursos hídricos. El observatorio es una herramienta dinámica y publica para gestionar (recopilar, sistematizar, analizar) y transferir la información de los recursos hídricos de la Región de Tarapacá y está dirigida a todos los grupos de interés. No muestra datos sino la trazabilidad de la información hídrica, buscando mejorar el acceso a la información y facilitar los procesos de investigación y gestión.

El desarrollo actual y futuro de la herramienta apunta a un objetivo más amplio. El Observatorio se está transformando en una plataforma que recibirá, sistematizará, analizará y transferirá datos hídricos generados en la región. Mediante motores de búsqueda y filtros de información, se busca mejorar más aún el acceso a la información por parte del usuario, presentando datos y metadatos, de forma estandarizada para cada estación de monitoreo.

## CONCLUSIÓN

En zona árida, la heterogeneidad temporal y espacial de las variables hidrometeorológicas y la complejidad de los procesos hidrológicos e hidrogeológicos involucrados requieren disponer de una cantidad más importante de datos, tanto espacial como temporalmente, para generar modelos hidrológicos e hidrogeológicos predictivos que permitan conocer el estado actual de los recursos hídricos y su evolución en el tiempo, de acuerdo al nivel y modelo de desarrollo. Constituye una precondition para lograr una gestión eficiente e integrada del agua, aún más en una zona de extrema aridez. Los diferentes actores necesitan diferentes tipos de datos y diferentes precisiones según el uso destinado a los datos y según el nivel de análisis (local, regional, nacional). En la actualidad, en el norte de Chile, no existe un conocimiento actualizado del estado de los recursos hídricos de la región, su evolución y predicción a corto, medio y largo plazo. La información existente no permite construir este conocimiento. El nivel de conocimiento y la información generada en la región permite des-

cribir las características y tendencias generales para un análisis a nivel nacional. Sin embargo, no es suficiente para la planificación y gestión a nivel regional y menos a nivel local (cuenca o acuífero). Los datos generados son insuficientes para la cuantificar recursos y predecir la evolución de los diferentes compartimentos hídricos. Es necesario evaluar el coste de operar y mantener una red de monitoreo versus la utilidad y accesibilidad de la información generada para usuarios, autoridades, instituciones públicas y privadas relacionadas con el recurso hídrico. Esta relación justifica la necesidad de compartir la información por los diferentes actores en la región lo que permitiría reducir costes y optimizar recursos: coste de instalación de estaciones, operación y mantenimiento, procesamiento y validación de datos. Aun así, la colaboración y participación de los usuarios en la gestión del agua es una etapa obligatoria hacia una mejor gestión y a un desarrollo sostenible. Además, adquirir, integrar y asimilar el conocimiento histórico permitirá dar la visión necesaria para planificar el futuro.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. 1994. Análisis redes de vigilancia calidad aguas terrestres estadística hidroquímica nacional, Etapa I, Primera región. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 48 p.
- Aravena R. 1995. Isotope Hydrology and Geochemistry of Northern Chile Groundwaters. Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines, 24 (3) : 495-503.
- Banco Mundial. 2011. CHILE: Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. 92 p.
- Banco Mundial y Gobierno de Chile. 2013. Estudio para el mejoramiento del marco institucional para la gestión del agua. 220 p.
- Lictévout, E., C. Maass, D. Córdoba, V. Herrera & R. Payano. 2013. Recursos Hídricos de la Región de Tarapacá: Diagnóstico y sistematización de la información. CIDERH-UNAP, Santiago, Chile. 226 p.
- Dingman R. & C. Galli. 1965. Geology and Ground-Water Resources of the Pica Área, Tarapacá Province, Chile. Geological Survey Bulletin 1189, Washington, United States of America. 129 p.
- Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). 2005. Estudio hidrogeológico conceptual y numérico del funcionamiento de la cuenca del salar de Coposa. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, Santiago, Chile.
- Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). 2006. Actualización de la estimación de la recarga acuíferos de Pampa Tamarugal y Llamara.



- En: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa Anexo VII.2 Hidrología. Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), Santiago, Chile.
- Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). 2007a. Modelación de la evolución del nivel de la napa en la Pampa del Tamarugal. En: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa Anexo VIII.2 Hidrogeología. Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), Santiago, Chile.
- Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC). 2007b. Modelación de la evolución del nivel de la napa en el salar de Llamara. En: Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Pampa Hermosa Anexo VIII.3 Hidrogeología. Pramar Ambiental-Sociedad Química y Minera de Chile (SQM), Santiago, Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA). 1978. Calidad de Agua Primera región. Chile. 130 p.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2009. Reevaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Llamara SDT N° 281. Santiago, Chile. 10 p.
- Dirección General de Aguas (DGA). 2011. Actualización de la oferta y la demanda de recursos hídricos subterráneos del sector hidrogeológico de aprovechamiento común Pampa del Tamarugal SDT N° 311. Santiago, Chile. 46 p.
- Hernández, S. 2005. Sistematización, espacialización y análisis de datos isotópicos en muestras de agua del norte de Chile, SDT N° 221. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 186 p.
- GCF Ingenieros Ltda. 2010. Metodología para la estimación de recarga de cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica en el norte de Chile, XV, I, II y III regiones, SIT N°221. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 167 p.
- Geohidrología Consultores Ltda. 2012. Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos, Región de Tarapacá, S.I.T. n°290. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 345 p.
- Grilli, A., E. Aguirre, M. Duran, F. Townsend & A. Gonzáles. 1999. Origen de las aguas subterráneas del sector Pica-Salar del Huasco, provincia de Iquique, I región de Tarapacá. XIII Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS, Antofagasta, Chile. 18 p.
- Japan International Cooperation Agency (JICA); Pacific Consultants International & Dirección General de Aguas (DGA). 1995. The study on the development of water resources in northern Chile (El estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte norte de Chile). Gobierno de la República de Chile, Chile.
- Karzulovic, J. & F. García. 1978. Evaluación de los recursos hídricos de la provincia de Iquique. Antecedentes básicos. Dirección General de Aguas (DGA), Chile. 211 p.
- Magaritz, M., R. Aravena; H. Peña, O. Suzuki & A. Grilli. 1990. Source of Groundwater in the Desert of Northern Chile: Evidence of Deep Circulation of Groundwater from the Andes. Ground Water 28: 513-517.
- Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC). 2009. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de aguas en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II y III. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile.
- Risacher, F., H. Alonso & C. Salazar. 1998. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas I, II, III Regiones, Chile. Santiago, Chile. 345 p.
- Tröger U. & D. Gerstner. 2004. Estudio de investigación de la situación hidrogeológica en la formación Altos de Pica, SDT N° 174. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. 27 p.