



Gobierno
de Chile

GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

DIAGNÓSTICO DE DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN CUENCAS ALTO - ANDINAS DE LA REGIÓN DE ATACAMA, FASE 3

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

AMPHOS 21

S.I.T. N° 398

Santiago, Noviembre 2016

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Miguel Ángel Caro Hernández

AMPHOS 21

Jefe de Proyecto
Hidrogeóloga Pilar Enguita L.

Profesionales

Geólogo Martín Lizama D.
Ingeniero Civil Reynaldo Payano A.
Geólogo Iker Fernández A.
Hidrogeólogo Jordi Escorcía T.
Geógrafo Diego Pérez T.
Ingeniero Civil Nicolás Jimenez C.
Hidrogeóloga Gemma Sendra L.
Geoquímico Oscar Benavente Z.
Geólogo Javier López R.
Geógrafa Katherine Labrin M.
Geólogo Dante Paredes D.
Ingeniero Civil Dimitri Dionizis R.
Coordinadora Logística Paola Inserrato A.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. TRABAJOS DE TERRENO	4
3. INSTRUMENTACIÓN INSTALADA.....	8
4. GEOLOGÍA	11
5. GEOFÍSICA.....	14
6. HIDROQUÍMICA	17
7. HIDROLOGÍA	23
8. HIDROGEOLOGÍA Y MODELOS CONCEPTUALES.....	34
9. DISEÑO CONCEPTUAL, FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE TRASVASE	37
10. CONCLUSIONES	39

Índice de Figuras

Figura 1-1: Ubicación geográfica del área de estudio.	3
Figura 2-1: Distribución de puntos visitados/catastrados durante las campañas de terreno.	5
Figura 2-2: Distribución de puntos para muestreo hidroquímico e isotópico.	6
Figura 3-1: Estación Meteorológica Nevado Tres Cruces instalada en la Fase 2, DGA-Arcadis, 2015.9	
Figura 3-2: Estación Meteorológica instalada en el Salar de la Isla (acoplada a lisímetro ISL-1) durante la Fase 3, DGA-Amphos 21, 2016.....	10
Figura 4-1: Resumen de la información geológica recopilada.	12
Figura 4-2: Mapa resumen de la cartografía preliminar del tipo de suelos de salar	13
Figura 5-1: Resumen Prospecciones Geofísicas en la zona de estudio.	16
Figura 6-1: Distribución de la hidroquímica histórica y la referente a este proyecto.	18
Figura 6-2: Mapa regional con la distribución de Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	21
Figura 6-3: Diagramas de Piper característicos de las aguas en la cuenca Salar de Pedernales (arriba) y Salar de Maricunga (abajo)	22
Figura 7-1: Isoyetas de precipitación media anual [mm/año] en las cuencas Alto-Andinas.	26
Figura 7-2: Estimación de la recarga total en las cuencas Alto-Andinas.....	27
Figura 7-3: Estimación de la escorrentía total en las cuencas Alto-Andinas.....	28
Figura 7-4: Estimación de la evaporación mínima y máxima preliminar en las cuencas Alto-Andinas.	29

Figura 8-1: Mapa resumen con la distribución de los pozos/piezómetros, puntos monitoreados durante las Fases 2 y 3 e isopiezas generadas a partir de la piezometría.....	35
Figura 8-2: Mapa resumen de conexiones laterales subterráneas inter-cuencas.	36
Figura 9-1. Disposición de las alternativas para trasvase. 1: Alternativa trasvase (DGA-Arcadis, 2015); 2: Alternativa trasvase (DGA-Amphos 21, 2016)	38

Índice de Tablas

Tabla 2-1: Resumen de puntos catastrados en las campañas de terreno (Fase 3)	4
Tabla 7-1: Resumen balances hídricos por cuenca en régimen natural.	30
Tabla 7-2: Resumen balances de oferta y demanda en las cuencas alto-andinas.....	33

1. Introducción

El presente documento resume los contenidos y resultados del estudio “Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama, Fase 3”, realizado por Amphos 21 Consulting Chile Ltda. (en adelante Amphos 21) para la División de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas (DGA).

Este proyecto nace de la iniciativa de complementar y generar información de carácter hidrológico e hidrogeológico para mejorar el conocimiento de las cuencas alto-andinas de la Región de Atacama. Estas limitan al Norte con la Región de Antofagasta, al Sur con la cuenca del Río Copiapó, al Este con la República de Argentina y al Oeste con las cuencas exorreicas del Río Salado, Quebrada Pan de Azúcar y Quebrada de Taltal (Figura 1-1).

La DGA encargó la realización de otros estudios previos orientados a la elaboración de una metodología ágil y robusta para la estimación de la recarga que se produce en el altiplano y en la precordillera del norte de Chile. Estas actividades fueron desarrolladas por diversas empresas consultoras y fueron abordadas, parcialmente, en la Fase 1 y 2 de este proyecto, según se detalla a continuación:

- Fase 1: DGA-Aquaterra Ingenieros Ltda. (2013) apuntó a la disponibilidad de recursos hídricos en algunas cuencas, pero también se determinó que no fue posible validar esta disponibilidad debido a la falta de información hidrométrica e hidrogeológica.
- Fase 2, DGA-Arcadis (2015) realizó balances hídricos preliminares en las 34 cuencas alto-andinas de la III Región, además de instalar instrumentos meteorológicos en los salares de Pedernales, Maricunga y Laguna del Negro Francisco con la finalidad de caracterizar de forma más precisa la descarga y recarga de estas 3 cuencas. También, se realizaron prospecciones geofísicas, mediciones de nivel y calidad de aguas subterráneas para el mejor conocimiento de las unidades acuíferas señaladas.

El objetivo general del estudio, en esta Fase 3, es el levantamiento de información hidrológica e hidrogeológica de mayor precisión para la profundización de la evaluación de recursos hídricos disponibles en cuencas alto-andinas de la Región de Atacama y la valoración de un posible trasvase de agua hacia la cuenca del río Copiapó. El presente documento también ha considerado la información recabada a lo largo de las Fases 1 y 2,

teniendo como finalidad dar continuidad y mejorar la evaluación desarrollada previamente.

De forma de entregar una visión global del estudio, en este resumen ejecutivo se destacan los trabajos y conclusiones más relevantes del trabajo ejecutado en las tres Fases sucesivas, en un período de 3 años. Para un mayor detalle se pueden revisar los informes finales específicos de cada una de las etapas.

Para una mejor comprensión, el resumen se ha estructurado según los siguientes apartados:

- Trabajos de terreno.
- Instrumentación instalada.
- Geología.
- Geofísica.
- Hidroquímica.
- Hidrología.
- Hidrogeología y Modelos Conceptuales.
- Diseño y Conceptual, Factibilidad Técnica y Económica de Trasvase.

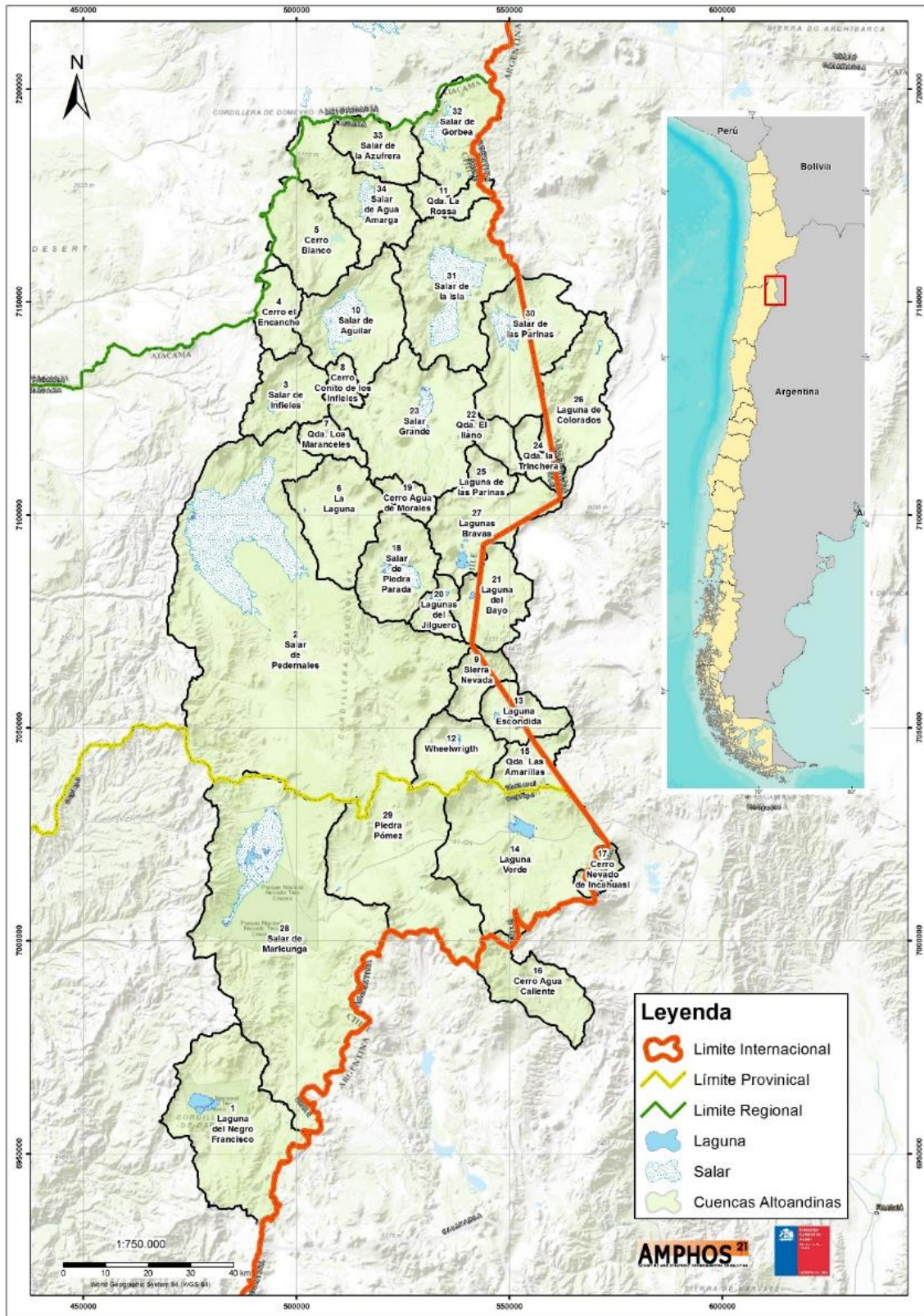


Figura 1-1: Ubicación geográfica del área de estudio.

2. Trabajos de Terreno

Los trabajos de campo desarrollados en esta Fase 3 consistieron en cuatro grandes actividades, las cuales se sintetizan a continuación.

1) Catastro de pozos y monitoreo de niveles piezométricos

En esta fase se realizaron 2 campañas de terreno que cubrieron la práctica totalidad de las cuencas alto-andinas que presentaban pozos o piezómetros, excluyendo aquellas ubicadas en Argentina, tal como se indica en la Tabla 2-1 y se muestra en la Figura 2-1.

Tabla 2-1: Resumen de puntos catastrados en las campañas de terreno (Fase 3)

N° de Campaña	Totalidad de puntos visitados/catastrados	Puntos en los cuales se pudo medir nivel de agua
1 ^a	154	88
2 ^a	84	79

2) Muestreo hidroquímico e isotópico

En concreto, se realizaron campañas de muestreo hidroquímico e isotópico en paralelo con el monitoreo de niveles piezométricos. Se obtuvo un total de 35 muestras para análisis químico y 35 muestras para análisis isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en cada una de las campañas, totalizando 70 muestras. La ubicación de las muestras se presenta en la Figura 2-2, donde se aprecia que representan de forma homogénea la zona de estudio.

Las muestras se obtuvieron de pozos, manantiales (surgencias) y aguas superficiales. En todos los puntos se registraron parámetros fisicoquímicos *in-situ* de CE (Conductividad Eléctrica), TDS (Sólidos Disueltos Totales), pH (potencial de hidrogeniones) y T (temperatura).

3) Instalación de sensores hidrométricos

Con el apoyo de Ingeniería y Proyectos Ltda. (I&P) se realizó la instalación de lisímetros y estación meteorológica (acoplada a uno de estos), cuyo detalle se resume en el siguiente capítulo.

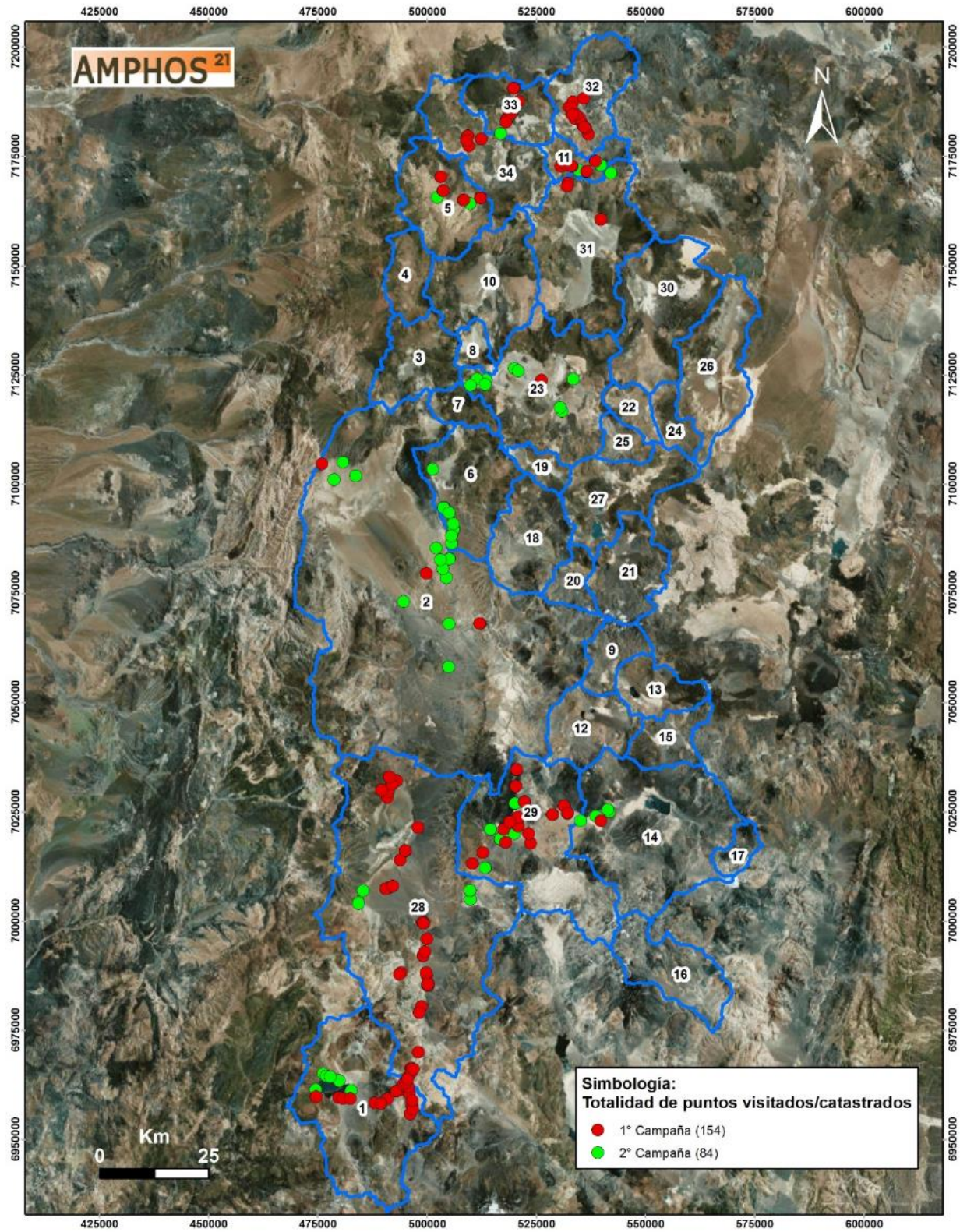


Figura 2-1: Distribución de puntos visitados/catastrados durante las campañas de terreno.

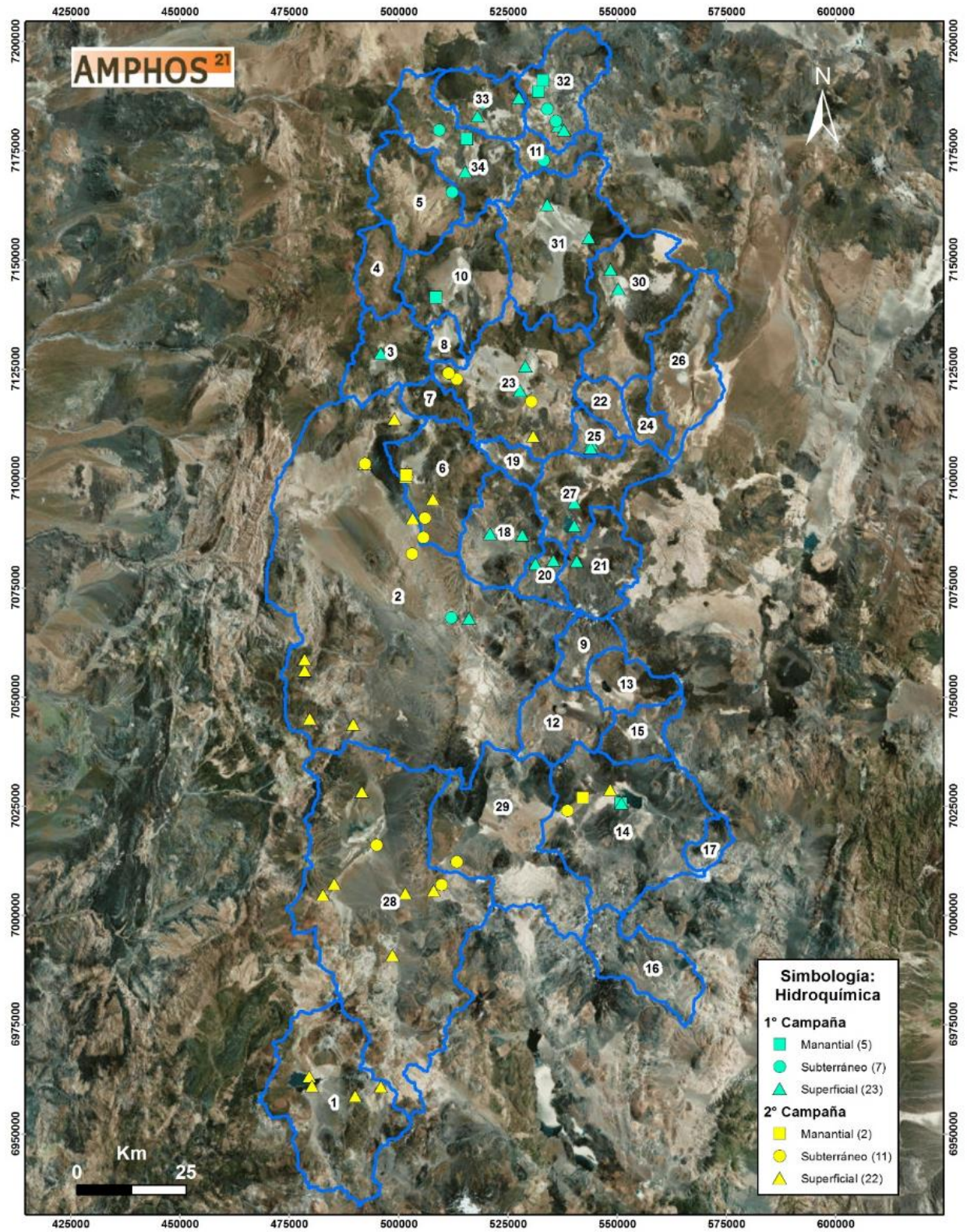


Figura 2-2: Distribución de puntos para muestreo hidroquímico e isotópico.

4) Prospección geofísica.

Con el objetivo de robustecer los modelos conceptuales, se diseñó y supervisó un levantamiento geofísico en el borde oriental del Salar de Maricunga y en Pampa Pantanillo, límite entre la cuenca del Salar de Maricunga y Laguna del Negro Francisco. El trabajo fue ejecutado en colaboración con la empresa Geodatos mediante el método de Transiente Electromagnético (TEM) y de Gravimetría.

3. Instrumentación Instalada

A lo largo del proyecto en su conjunto, se han instalado diversos equipos y sensores hidrometeorológicos en las cuencas alto-andinas consistentes en 17 lisímetros y 2 estaciones meteorológicas completas que permiten medir variables hidrológicas tales como radiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura, precipitación líquida/sólida, presión atmosférica y humedad relativa. Los datos que aportarán estos equipos serán claves para los futuros estudios y tomas de decisiones sobre los recursos hídricos de la Región de Atacama. Estas cuencas, históricamente, se han caracterizado por presentar escasa o nula información instrumental de alto estándar de carácter público, siendo las entidades privadas las únicas que contaban con algún tipo de instrumentación.

Los sensores hidrométricos instalados durante la Fase 2 (DGA-Arcadis, 2015) fueron:

- ✓ 1 estación meteorológica (Nevado Tres Cruces).
- ✓ 11 lisímetros (10 permanentes y 1 de prueba).

Por su parte, durante la Fase 3 de este proyecto se instalaron:

- ✓ 1 estación meteorológica integrada al lisímetro ISL-1.
- ✓ 7 lisímetros.
- ✓ Cercos y protección adecuada para 10 de los 11 lisímetros de la anterior Fase 2, además de los 7 cercos respectivos a los equipos de la presente Fase 3.

Adicionalmente, se descargó la información contenida en los *dataloggers* de los sensores instalados en la Fase 2 (estación meteorológica más lisímetros) y se cubrió la telemetría de los datos asociados a la estación meteorológica DGA Nevado Tres Cruces por el período de duración de la Fase 3.

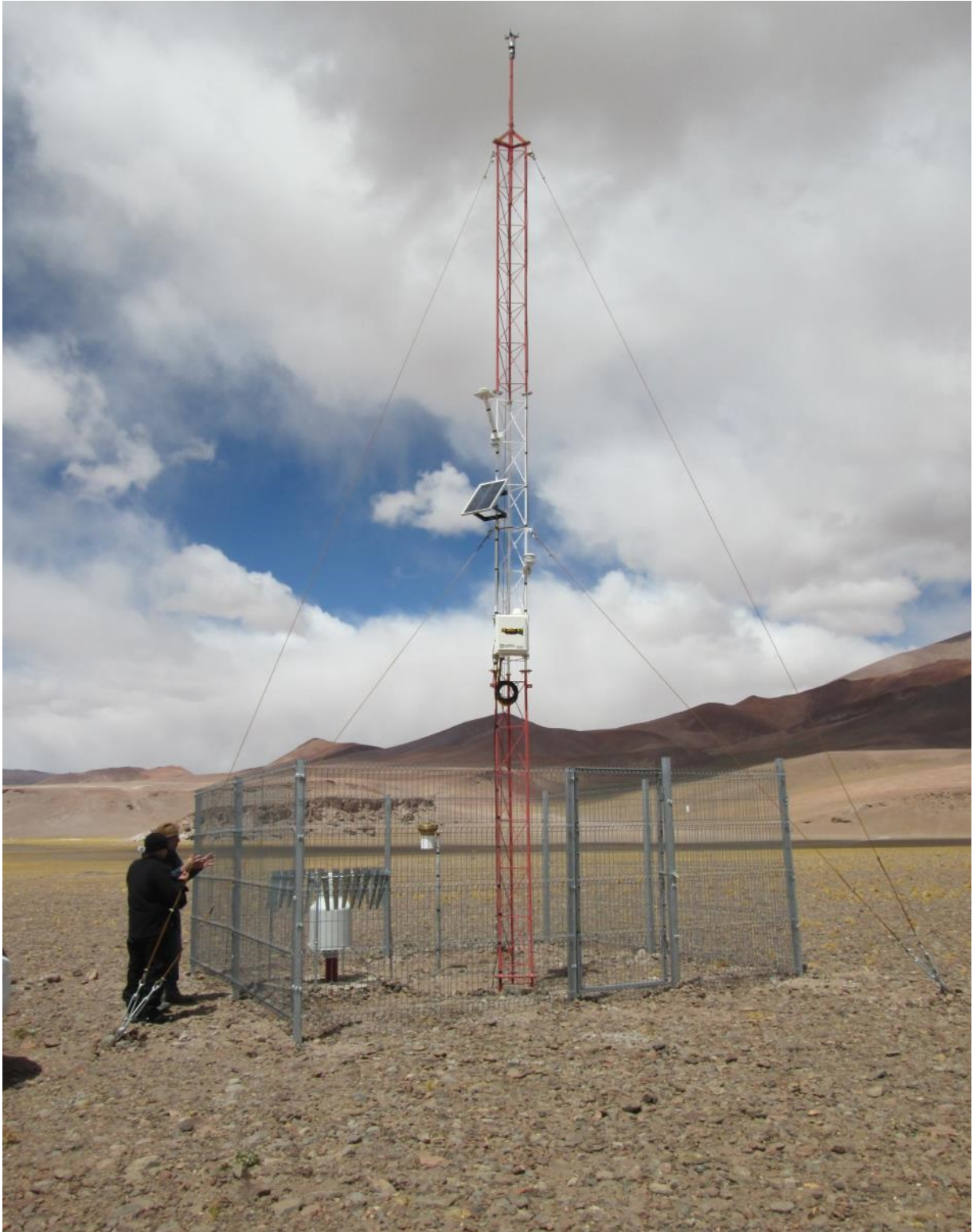


Figura 3-1: Estación Meteorológica Nevado Tres Cruces instalada en la Fase 2, DGA-Arcadis, 2015.



Figura 3-2: Estación Meteorológica instalada en el Salar de la Isla (acoplada a lisímetro ISL-1) durante la Fase 3, DGA-Amphos 21, 2016.

4. Geología

Las principales tareas referentes a geología realizadas durante esta fase del estudio son las siguientes:

- Caracterizar la geología de cada una de las 34 cuencas de estudio a partir de los mapas geológicos oficiales del SERNAGEOMIN y SEGEMAR (Figura 4-1). Esta actividad se ha basado en una clasificación en Depósitos no consolidados, Rocas Estratificadas, Rocas Intrusivas y Conjuntos Volcánicos, según corresponda.
- Describir la geología estructural local para todas las cuencas de estudio.
- Recopilar todas las columnas litológicas disponibles de los pozos distribuidos en las cuencas. En los informes individuales se han expuesto las más representativas.
- Recopilar perfiles geológicos históricos a partir de los mapas geológicos oficiales. Además, se han elaborado nuevos cortes a partir de columnas litológicas representativas en cuencas donde no se contaba con este tipo de información.
- Concentrar y representar toda esta información en un proyecto SIG de modo de poder facilitar su visualización.

Finalmente, se ha confeccionado una cartografía preliminar de tipos de suelo del salar, cuya finalidad es asociar las tasas de evaporación conocidas de los lisímetros, instalados a lo largo de este proyecto, con su respectiva tipología de suelo distinguiendo las siguientes (Figura 4-2):

- a) Suelo 1: Salino Reciente.
- b) Suelo 2: Transicional entre 1 y 3.
- c) Suelo 3: Núcleo Salino.
- d) Suelo 4: Suelo Salino-Clástico.

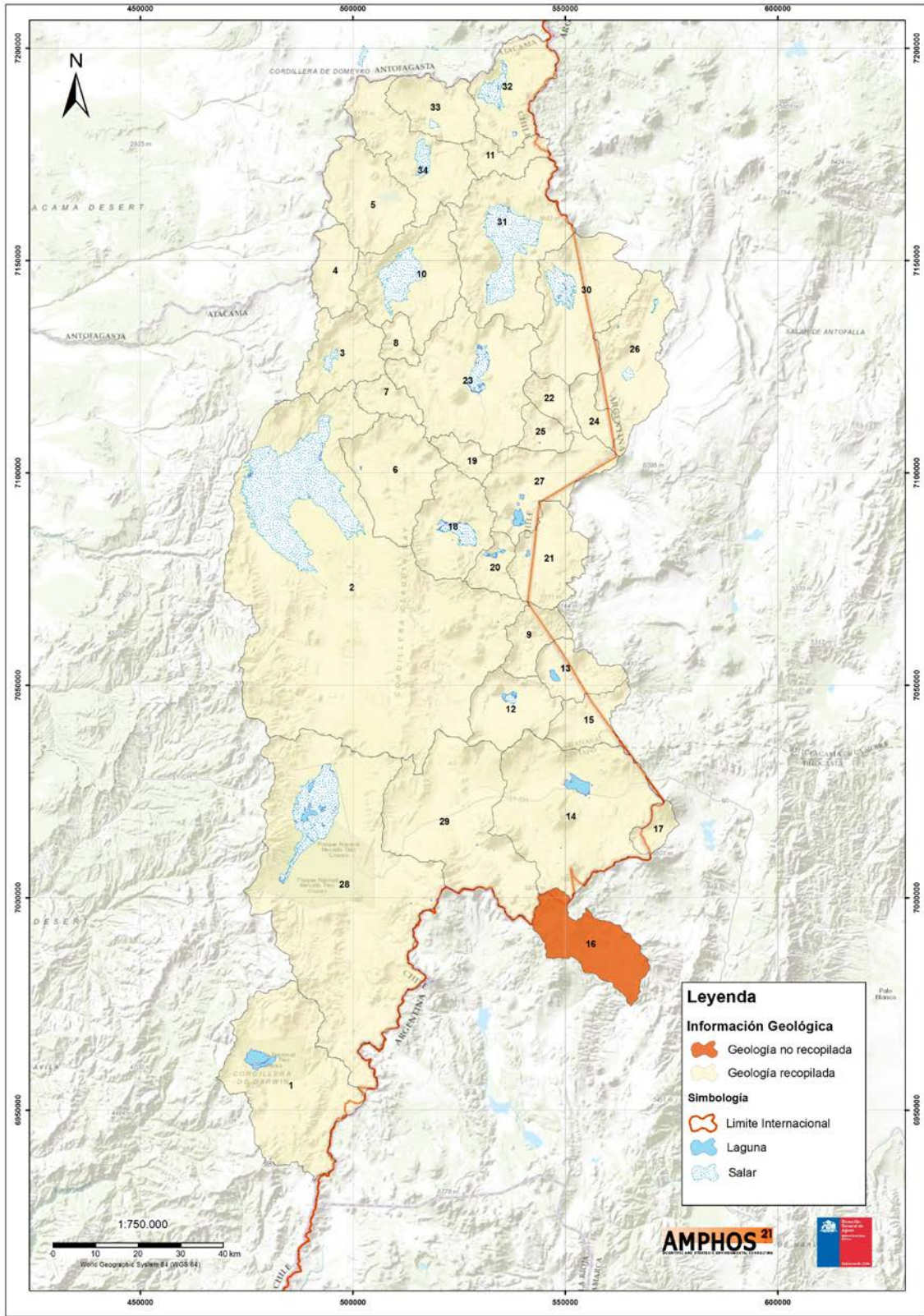


Figura 4-1: Resumen de la información geológica recopilada.

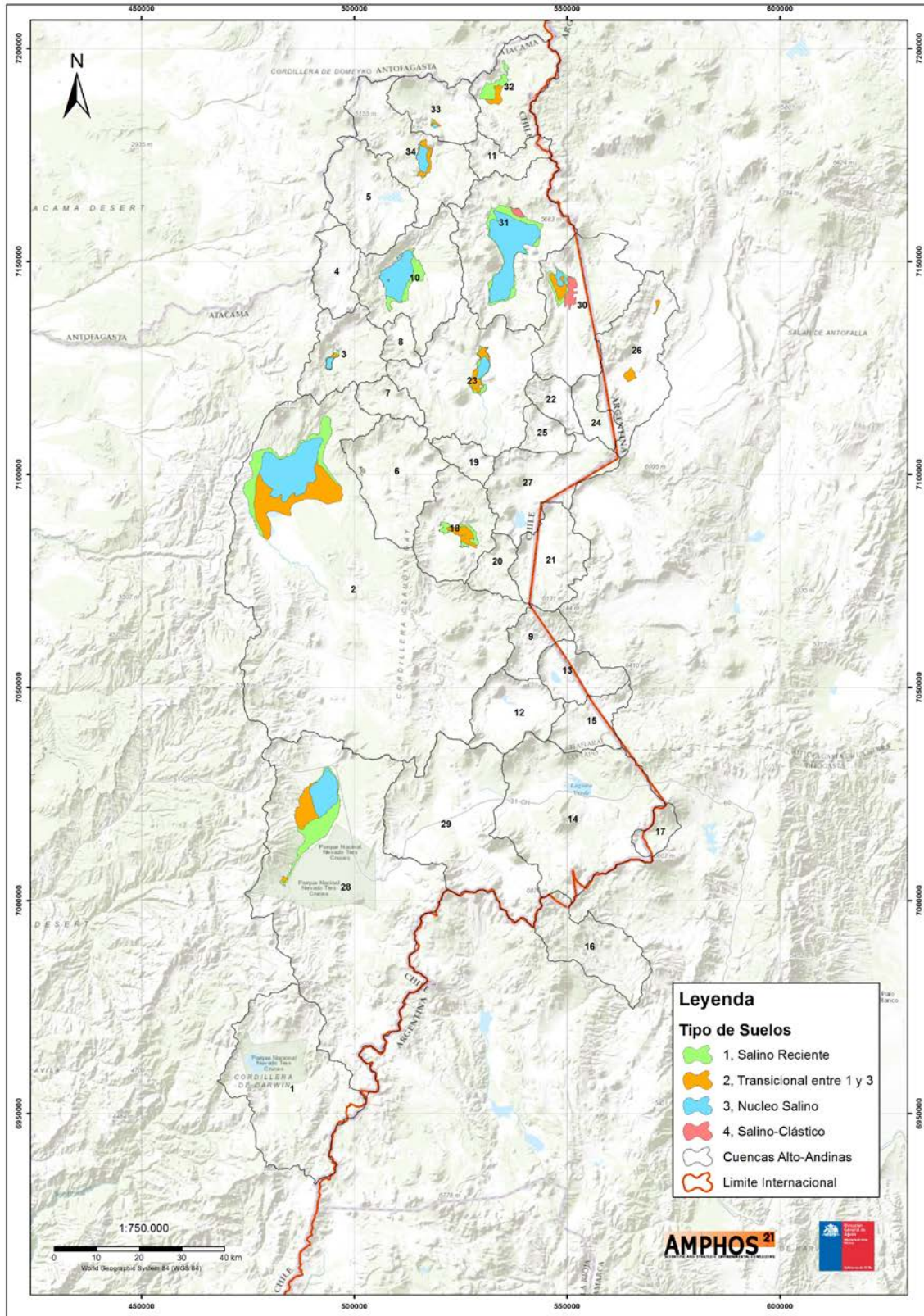


Figura 4-2: Mapa resumen de la cartografía preliminar del tipo de suelos de salar

5. Geofísica

En este apartado se distingue entre la geofísica histórica y la ejecutada durante el transcurso del presente proyecto (Fases 1, 2 y 3).

En este estudio se ha realizado una extensa recopilación de la geofísica histórica a partir de diversos documentos e informes tales como EIA´s de proyectos mineros, estudios gubernamentales y expedientes de exploración facilitados por la DGA, entre otros. A partir de esta actividad se puede destacar lo siguiente:

- Se ha proyectado la totalidad de la geofísica histórica en un proyecto SIG. Para facilitar su visualización, ésta se ha ordenado y clasificado según métodos: TEM, NanoTEM, SEV y Gravimetría.
- En cada uno de los informes individuales, se ha confeccionado un mapa de distribución geográfica y tabla resumen con las prospecciones geofísicas realizadas en la cuenca en cuestión.
- De la información recabada, se ha utilizado la información más relevante de las prospecciones geofísicas para validar y esclarecer conexiones laterales intercuenas, así como la geometría y nivel freático de los diferentes acuíferos existentes de modo de complementar los modelos conceptuales hidrogeológicos.

Por otra parte, durante las Fases 1, 2 y 3 se ejecutaron prospecciones geofísicas del tipo Transiente Electromagnético (TEM) y Gravimetría, todas ellas distribuidas en el sector centro-sur del área de estudio. A continuación, se presenta un resumen de las prospecciones geofísicas de cada una de las Fases de este proyecto, cuya distribución espacial se presenta en la Figura 5-1.

➤ **Fase 1, DGA-Aquaterra (2013)**

En la primera fase se realizaron prospecciones de Transiente Electromagnético (TEM), a cargo de la empresa Geodatos, distribuidas en las cuencas Laguna Verde, Piedra Pómez, La Laguna y Laguna del Negro Francisco, totalizando 20 estaciones.

➤ **Fase 2, DGA-Arcadis (2015)**

Durante esta fase del proyecto, se ejecutaron un total de 100 estaciones TEM a cargo de la empresa Geodatos, distribuidas en 16 perfiles geofísicos y localizadas en 2 cuencas: Laguna del Negro Francisco y Salar de Maricunga.

➤ **Fase 3, DGA-Amphos 21 (2016)**

En esta última fase se instalaron, por una parte, 58 estaciones TEM en el sector oriental del Salar de Maricunga distribuidas en 7 perfiles; por otra parte, se instalaron 40 estaciones TEM y 60 gravimetrías en el sector Pampa Pantanillo formando 6 perfiles. La interpretación de la información generada junto con la calibración estratigráfica de pozos cercanos permitió:

- Esclarecer la configuración del acuífero en el corredor del río Astaburuaga en Pampa Pantanillo, advirtiendo un acuífero libre con potencias máximas del orden de 130 - 300 m en su parte central y presentando un nivel basal sinuoso que implicaría variaciones en el espesor de la unidad acuífera. Adicionalmente, en el sector norte, se identificó un núcleo de muy baja resistividad, interpretado como coladas de lava, las que actuarían como una barrera hidrogeológica entre las cuencas de la Laguna del Negro Francisco y Maricunga, controlando el flujo preferente tanto subterráneo como del río Astaburuaga hacia el SW.
- Caracterizar el borde oriental del Salar de Maricunga, pudiendo determinar profundidad del basamento (140-350 m) y variaciones en sentido Norte-Sur del salar.

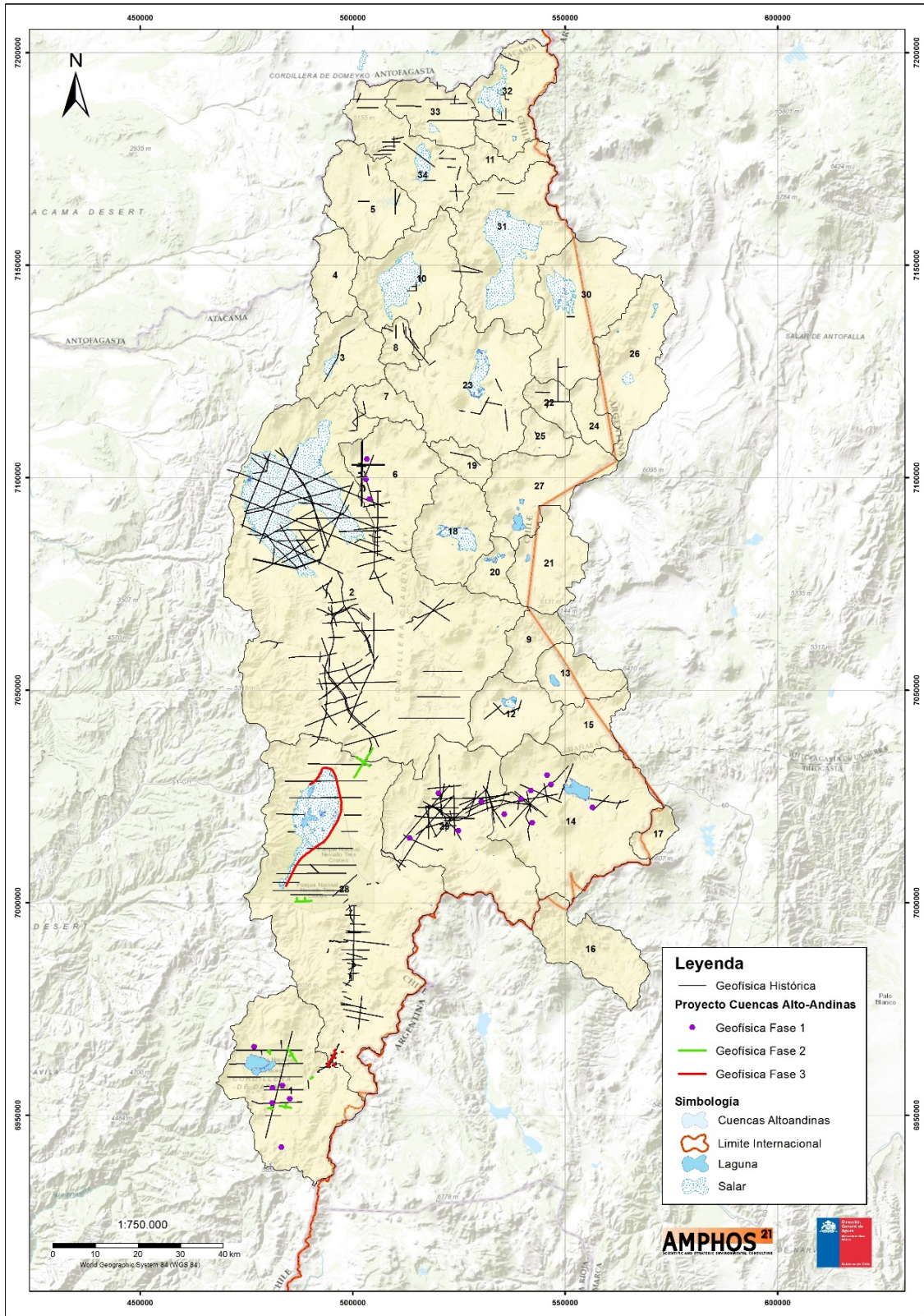


Figura 5-1: Resumen Prospecciones Geofísicas en la zona de estudio.

6. Hidroquímica

Los aspectos generales más relevantes asociados al estudio hidroquímico de las 34 cuencas son presentados a continuación (ver Figura 6-1 para complementar el texto):

- En primer lugar, se recopiló la información disponible a partir de diversos documentos como EIAs de proyectos mineros, mapas del SERNAGEOMIN, tesis y otras publicaciones. De estos, destaca en relevancia, abundancia y calidad el estudio realizado por Risacher et al. el año 1999, denominado "Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones – Chile". Hasta el momento, es el único estudio de carácter regional que abarca las cuencas nor-orientales de más difícil acceso.
- A partir de la extensa información recabada, se procedió a seleccionar aquellos estudios cuya analítica fuera adecuada para su incorporación a la base de datos creada durante la presente Fase 3 del proyecto, además de validarla mediante un balance iónico. De los casi 650 puntos analizados, se consideraron aproximadamente 580 analíticas que fueron incorporadas a la base de datos utilizada para el análisis del capítulo de Hidroquímica de los informes individuales. La mayoría de los puntos se concentra en las cuencas centro-australes de la zona de estudio.
- Durante la Fase 2 del proyecto, se contempló un muestreo hidroquímico en las cuencas de Pedernales, Maricunga y Laguna del Negro Francisco.
- Por su parte, durante la Fase 3 se realizó un muestreo ampliamente distribuido en la zona de estudio (21 cuencas), abarcando zonas extremas y de difícil acceso que solamente habían sido comprendidas por el estudio de Risacher et al., 1999.
- En general, las aguas de las cuencas alto-andinas presentan concentraciones de sulfatos, cloruros, arsénico y boro superiores al límite establecido en la norma de Riego NCh1333 y NCh409, por lo que no cumplen con las normas establecidas para potabilidad y riego.

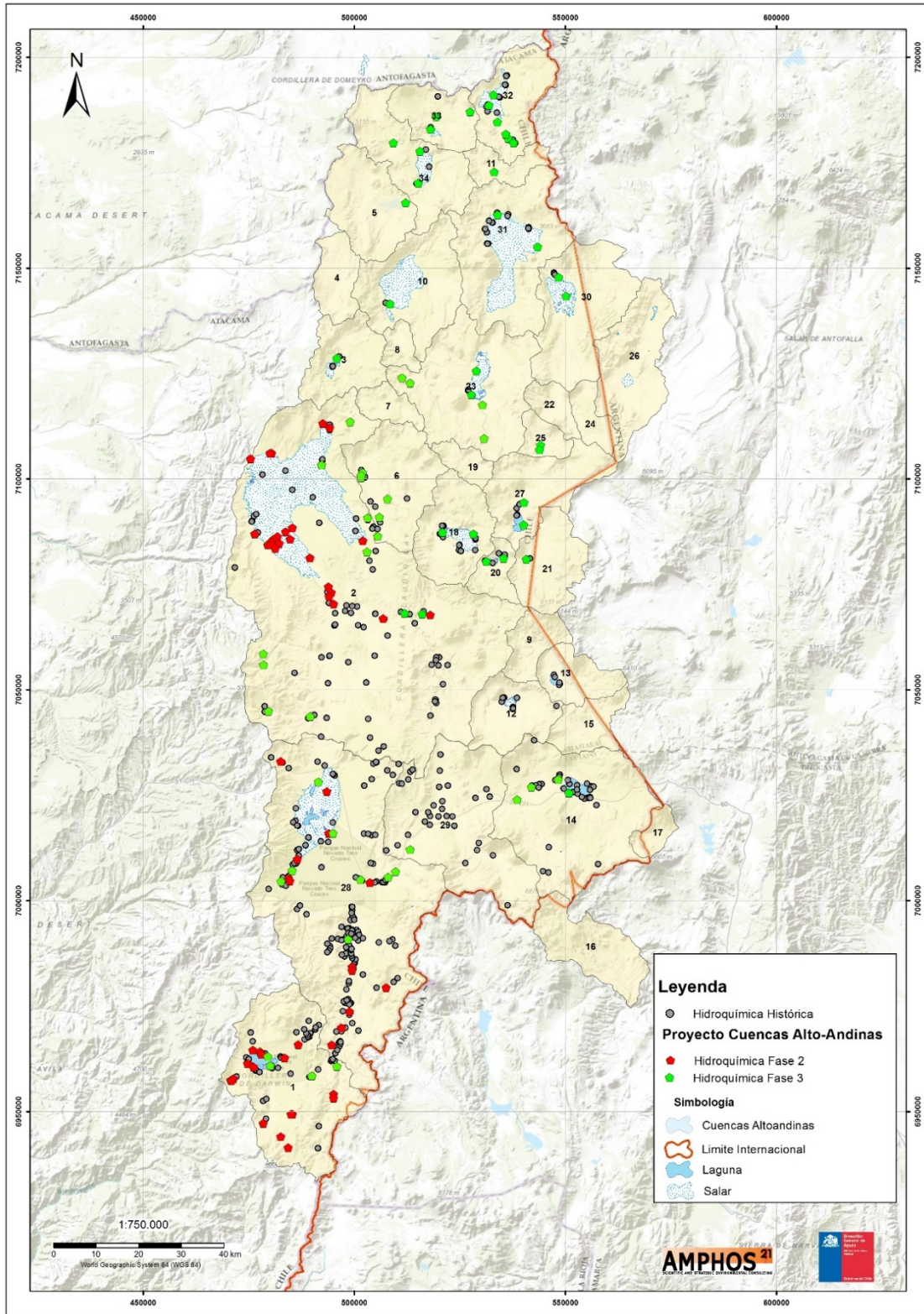


Figura 6-1: Distribución de la hidroquímica histórica y la referente a este proyecto.

➤ **Síntesis de procesos en la evolución química del agua**

A nivel regional, se han detectado procesos comunes que afectan a la evolución química de las aguas de las cuencas Alto-Andinas.

La recarga en las cuencas se origina, principalmente, a partir de precipitaciones durante el invierno altiplánico tanto de forma sólida (nieve), en las partes altas y montañosas de la cuenca, como líquida (lluvia) en las partes topográficamente más bajas.

La precipitación en forma de lluvia genera escorrentías aguas abajo de las laderas hasta infiltrarse en el acuífero saturado, mientras que la nieve se acumula durante los meses más fríos. Durante el periodo de deshielo, la nieve retenida en las montañas sobre las unidades hidrogeológicas de baja permeabilidad (UH-E y UH-F) se transforma en agua líquida.

El agua de deshielo se retiene en las fracturas y discontinuidades de las formaciones volcánicas como ignimbritas y coladas de lava, unidades geológicas predominantes en estas cuencas. Si las fracturas son favorables y están conectadas, el agua puede fluir entre ellas y circular lentamente de forma subsuperficial a través de la parte más alterada y meteorizada de las rocas hasta recargar el acuífero, el que generalmente corresponde a un acuífero detrítico somero y/o fracturado (UH-A y UH-C).

El agua de recarga es bastante diluida, presenta una baja conductividad eléctrica (0-1.000 μS) y, a medida que circula y entra en contacto con la roca y los sedimentos, se va cargando de iones mediante procesos de hidrólisis de silicatos y disolución de sales sulfato-cloruradas (Figura 6-2). De esta forma, el agua se enriquece en sodio, calcio, sulfato, arsénico, boro y otros elementos y la facie hidroquímica más representativa es sulfato-clorurada cálcico-sódica-magnésica (Figura 6-3). Este proceso de enriquecimiento iónico también se produce a medida que aumenta el tiempo de residencia del agua subterránea en el acuífero saturado.

En la mayoría de las cuencas endorreicas estudiadas, la descarga del acuífero saturado se produce hacia los salares o lagunas de forma subterránea o mediante manantiales-vertientes cuyas aguas descargan superficialmente al salar o laguna. Normalmente, los salares y las lagunas se encuentran en las partes bajas de la cuenca, donde ocurren procesos de reconcentración mineral debido a la evaporación intensa de las aguas superficiales y a la disolución de sales evaporíticas. Dichas aguas de descarga son, predominantemente, de facies clorurada-sódica y tiene una conductividad eléctrica muy elevada (>100.000 μS). Además, contienen altos contenidos de litio, potasio y cloruros;

iones considerados conservativos a lo largo de la línea de flujo. Las aguas superficiales expuestas a la evaporación intensa se encuentran muy enriquecidas en los isótopos más pesados del oxígeno y del hidrógeno en relación a las aguas de recarga, de composición más ligera y cercana a la línea de aguas meteórica.

En general, los resultados isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ muestran la existencia de dos ambientes de recarga distintos: uno correspondiente a las zonas más altas de las cuencas con un ambiente mucho más frío y húmedo, y otro de menor altitud y mayor temperatura. Sin embargo, el gran rango de altitudes en las 34 cuencas estudiadas dificulta la separación de las muestras por su composición isotópica de la molécula del agua.

Caso particular: Salar de Gorbea

De las 34 cuencas estudiadas en el presente proyecto y en más de 100 salares estudiados en el altiplano de los Andes Centrales (Bolivia, Chile y Argentina, entre los 19° y 27° S) por Risacher et al., 2002 y Risacher et al., 2003, los únicos que presentan lagunas/salmueras ácidas son los salares de Gorbea e Ignorado (ubicado inmediatamente al sur del Salar de Gorbea).

El origen de esta acidez se ha atribuido a la superposición de dos factores: (1) la extrema alteración hidrotermal de rocas volcánicas, que componen el basamento de la cuenca, que reduce la capacidad de *buffer* de éstas y (2) el alto contenido de azufre en el área.

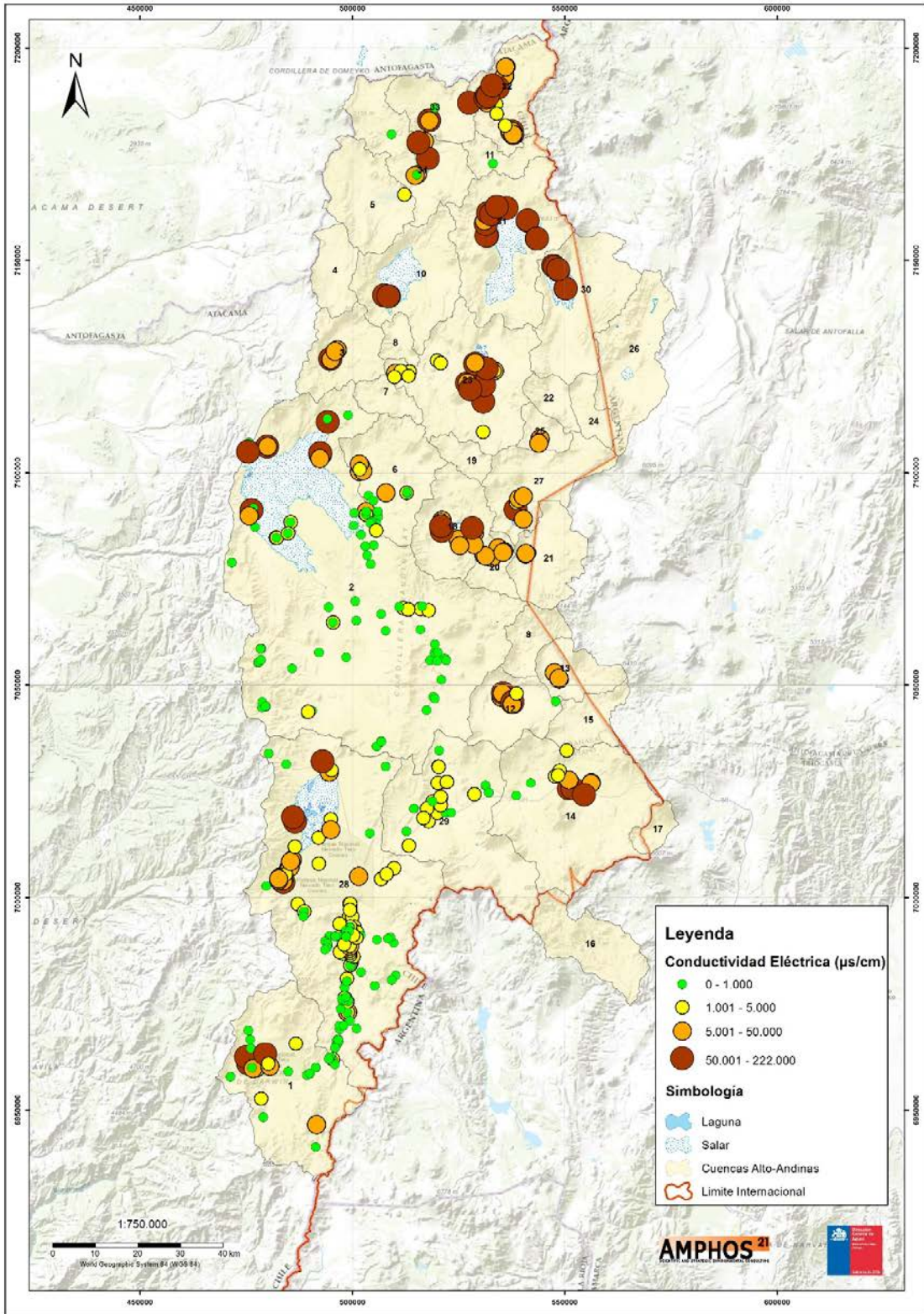


Figura 6-2: Mapa regional con la distribución de Conductividad Eléctrica (µS/cm)

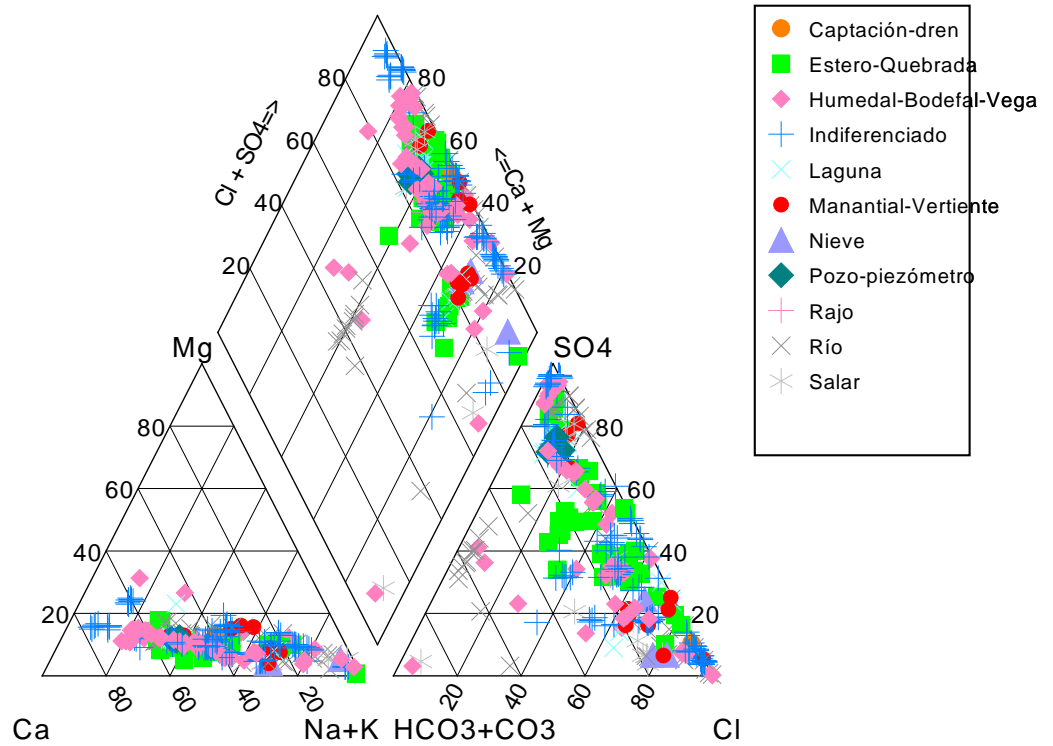
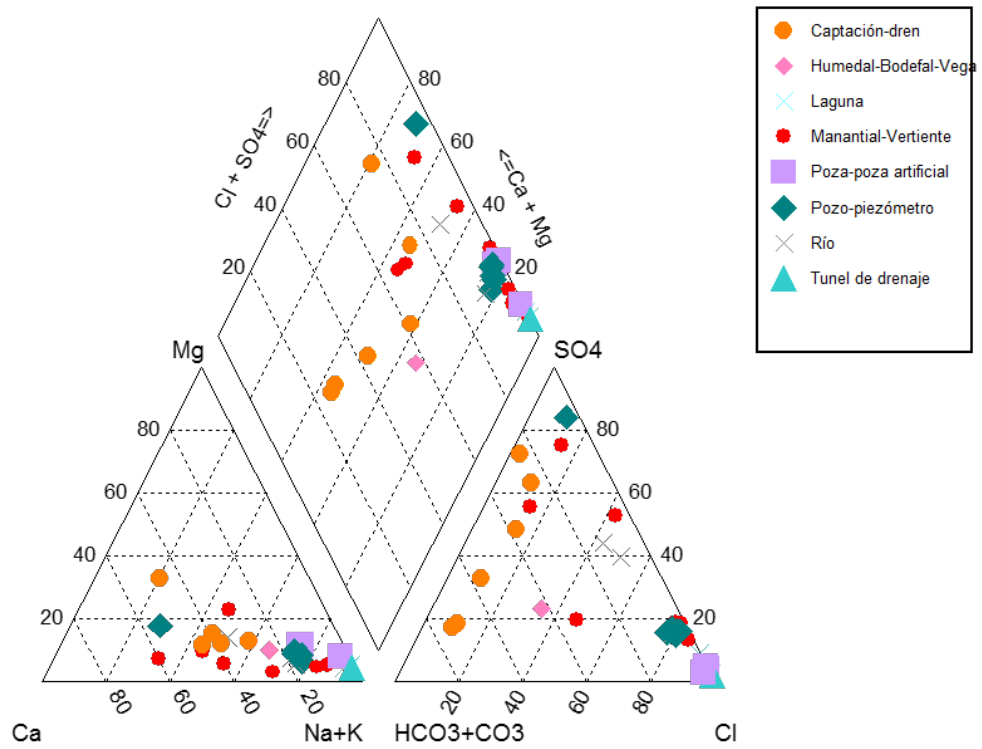


Figura 6-3: Diagramas de Piper característicos de las aguas en la cuenca Salar de Pedernales (arriba) y Salar de Maricunga (abajo)

7. Hidrología

En este ámbito, se ha realizado un balance hídrico de cada una de las 34 cuencas altoandinas analizadas. Para llevar a cabo lo anterior, se han cuantificado las entradas y salidas del sistema a partir de herramientas hidrológicas, junto con la interacción entre éstas y el suelo. En este sentido, se destacan las siguientes etapas:

- **Análisis de la precipitación**

De acuerdo a los estudios realizados por DGA en la zona de interés, el único aporte al sistema son las precipitaciones. Por lo tanto, una buena estimación de su ocurrencia es fundamental para evaluar el balance hídrico en la zona de estudio.

En concreto, se ha realizado un análisis riguroso de antecedentes hidrológicos disponibles, en el cual se identificó que la información proporcionada por la red de estaciones en la zona de estudio es insuficiente para estimar la precipitación y evaluar su comportamiento espacio temporal. Es por ello, que para ofrecer un valor de precipitación media anual actualizado en cada una de la zona de interés, se ha utilizado el método de las isoyetas (isolíneas de precipitación) incorporando una gran cantidad de registros meteorológicos existentes en otras cuencas cercanas (públicas y privadas) y se comparó con las isoyetas generadas por los estudios anteriores (Figura 7-1). Sin embargo, no se ha podido dilucidar qué proporción de estas precipitaciones son nivales y cuáles son pluviales; esta duda se espera que sea resuelta en el futuro a corto plazo con los datos proporcionados por los nuevos equipos instalados en la zona (lisímetros y estaciones meteorológicas).

- **Estimación de la recarga y escorrentía**

La recarga de los acuíferos altiplánicos tiene como fuente principal la precipitación. Por su parte, la escorrentía superficial en las cuencas altoandinas se debe, en gran medida, a la fracción de la precipitación sobre la cuenca que no se ha infiltrado en las zonas permeables. En este sentido, durante la temporada estival, la escorrentía se alimenta principalmente de los deshielos de la precipitación sólida caída durante el invierno anterior y, en menor medida, a eventos de precipitación líquida asociadas al denominado "Invierno Altiplánico".

A partir de los parámetros geomorfológicos de cada una de las cuencas (superficie de la cuenca, longitud del cauce principal, ancho equivalente y factor de forma), de la conductividad hidráulica, grado de consolidación de las unidades litológicas y la delimitación de acuíferos, se determinaron los coeficientes de infiltración (C_i) y

escorrentía (C_E) con los cuales se estimaron los valores de recarga total y escorrentía superficial en la cuenca (principales entradas al sistema hídrico).

De acuerdo a los parámetros obtenidos anteriormente, se obtuvieron los valores de recarga total en las cuencas, los cuales varían entre 4 y 1.04 l/s (Figura 7-2).

A su vez, se ha estimado un valor de escorrentía superficial para cada una de las 34 cuencas alto-andinas, los cuales varían entre 35 y 1.13 l/s (Figura 7-3).

- **Cuantificación de la evaporación directa**

La escasez de cubierta vegetal en el suelo provoca que la evaporación desde la napa freática sea un dato importante que es necesario cuantificar, y no únicamente la evaporación desde la lámina de agua superficial. Debido a esto, se cuenta con datos de distintos lisímetros instalados en la zona de estudio con los cuales fue posible generar curvas de evaporación en función de la profundidad del nivel freático, las cuales fueron coherentes con los resultados obtenidos en otros estudios de la zona. Con dichas curvas se ha estimado una tasa de evaporación directa (desde lámina libre y nivel freático) representativa para cada una de las cuencas analizadas (Figura 7-4).

- **Balance hídrico**

Una vez estimadas todas las entradas y salidas de cada cuenca, se ha realizado el balance hídrico en cada una de ellas. Debido a que no se dispone de información fidedigna de los caudales de bombeo, se ha realizado un balance preliminar en régimen natural. Además, se han considerado flujos subterráneos y superficiales entre cuencas adyacentes, los cuales se han estimado a partir del análisis hidrogeológico.

La ecuación de balance se ha implementado en régimen permanente, es decir, que no se consideran variaciones temporales del volumen de agua almacenado en las cuencas. Estos balances son referenciales y deben actualizarse a medida que se tenga un mayor conocimiento de las variables hidrogeológicas involucradas.

El resultado de los balances, considerando todas las entradas y salidas descritas anteriormente, se presenta a modo de resumen en la Tabla 7-1.

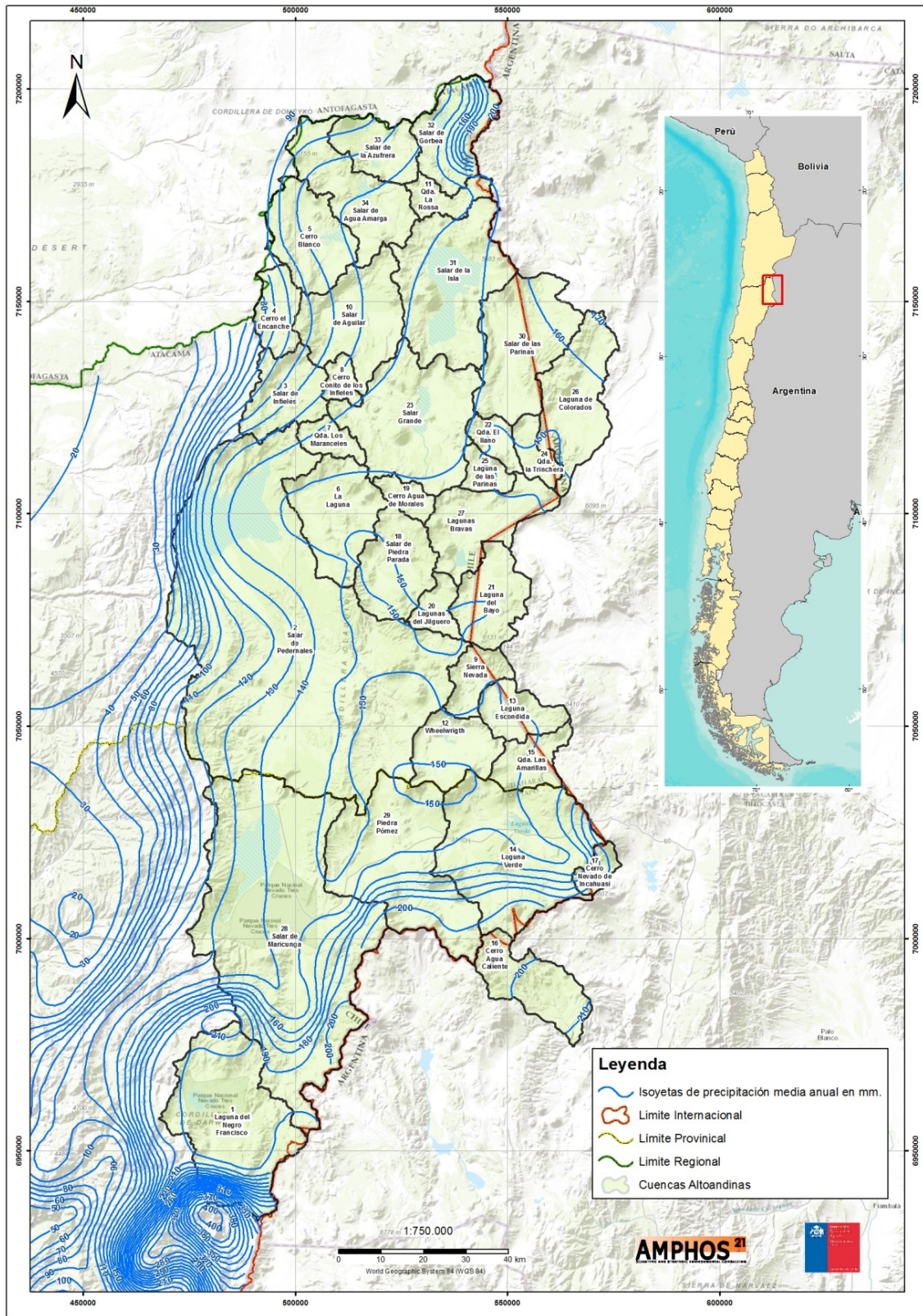
- **Oferta y Demanda Hídrica**

Con el objeto de determinar la viabilidad o sustentabilidad de las necesidades de agua en las cuencas alto-andinas, se estableció la siguiente relación: la demanda de agua en la cuenca se relaciona directamente con los derechos de agua otorgados y solicitados, mientras que la oferta de la cuenca, con todas aquellas aguas entrantes al sistema.

Por medio del Catastro Público de Aguas (CPA), elaborado por la DGA, se determinaron los derechos de aprovechamiento otorgados y solicitados, así como los respectivos caudales y su clasificación en consuntivos o no consuntivos. En la Tabla 7-2 se presenta un resumen del balance de oferta y demanda en las cuencas alto-andinas.

El balance de oferta y demanda ha permitido observar que casi todas cuencas tienen un superávit de agua (disponibilidad), a excepción de algunas cuencas que poseen un déficit (escasez) en sus balances, tales como: La Laguna (-8 l/s), Quebrada La Rossa (-39 l/s), Salar de Maricunga (-344 l/s) y Salar de la Azufrera (-214 l/s). Sin embargo, se debe resaltar que no se tiene constancia sobre la situación real de los derechos otorgados por la DGA, es decir, si están siendo explotados y cuál es el caudal de extracción. Por lo tanto, el balance ofrecido es referencial (preliminar) y así se debe considerar en eventuales procesos de toma de decisiones asociados a los recursos hídricos de las cuencas alto-andinas.

En las páginas siguientes se presentan los datos más relevantes de los balances hídricos de las 34 cuencas alto-andinas analizadas.



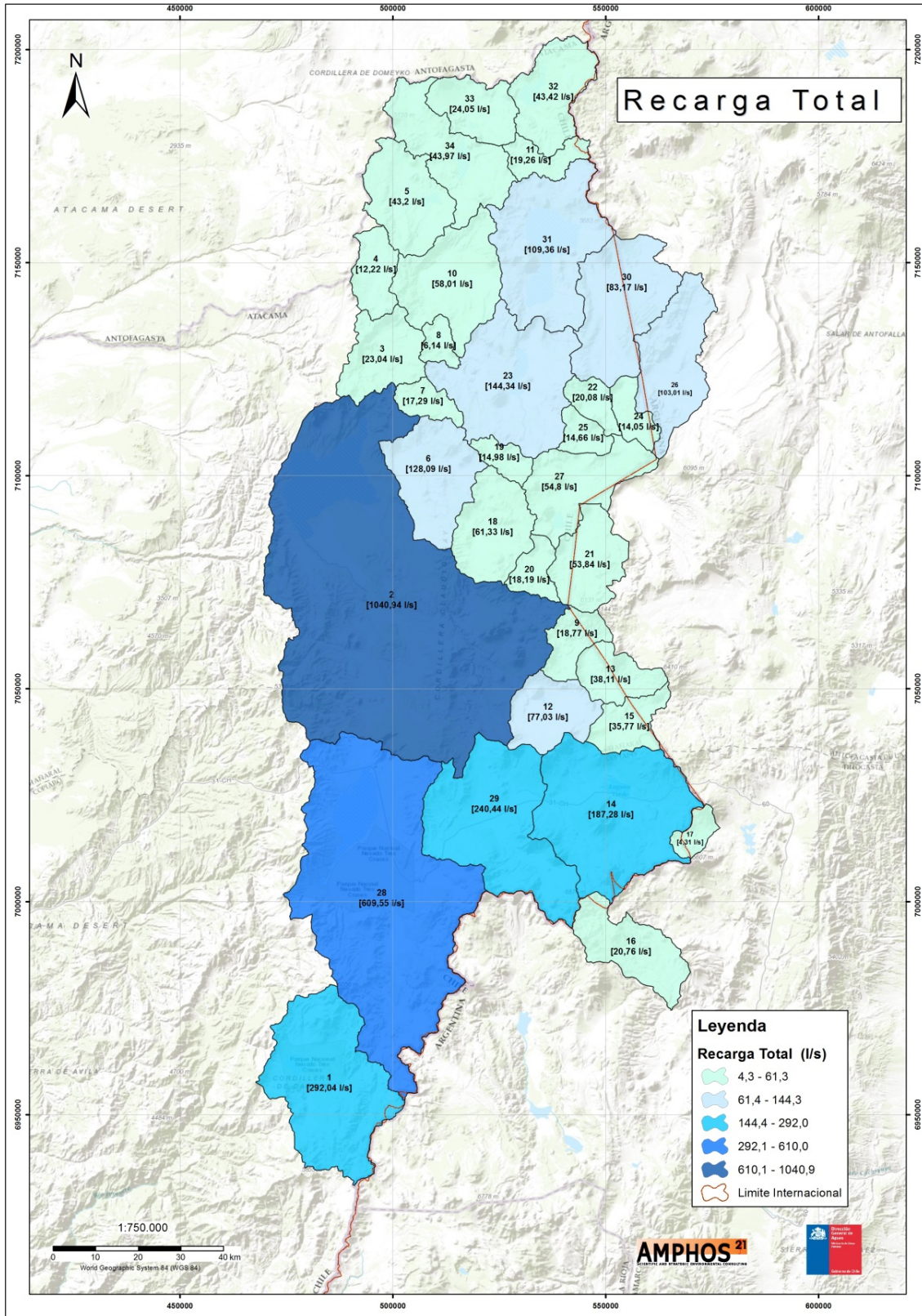


Figura 7-2: Estimación de la recarga total en las cuencas Alto-Andinas

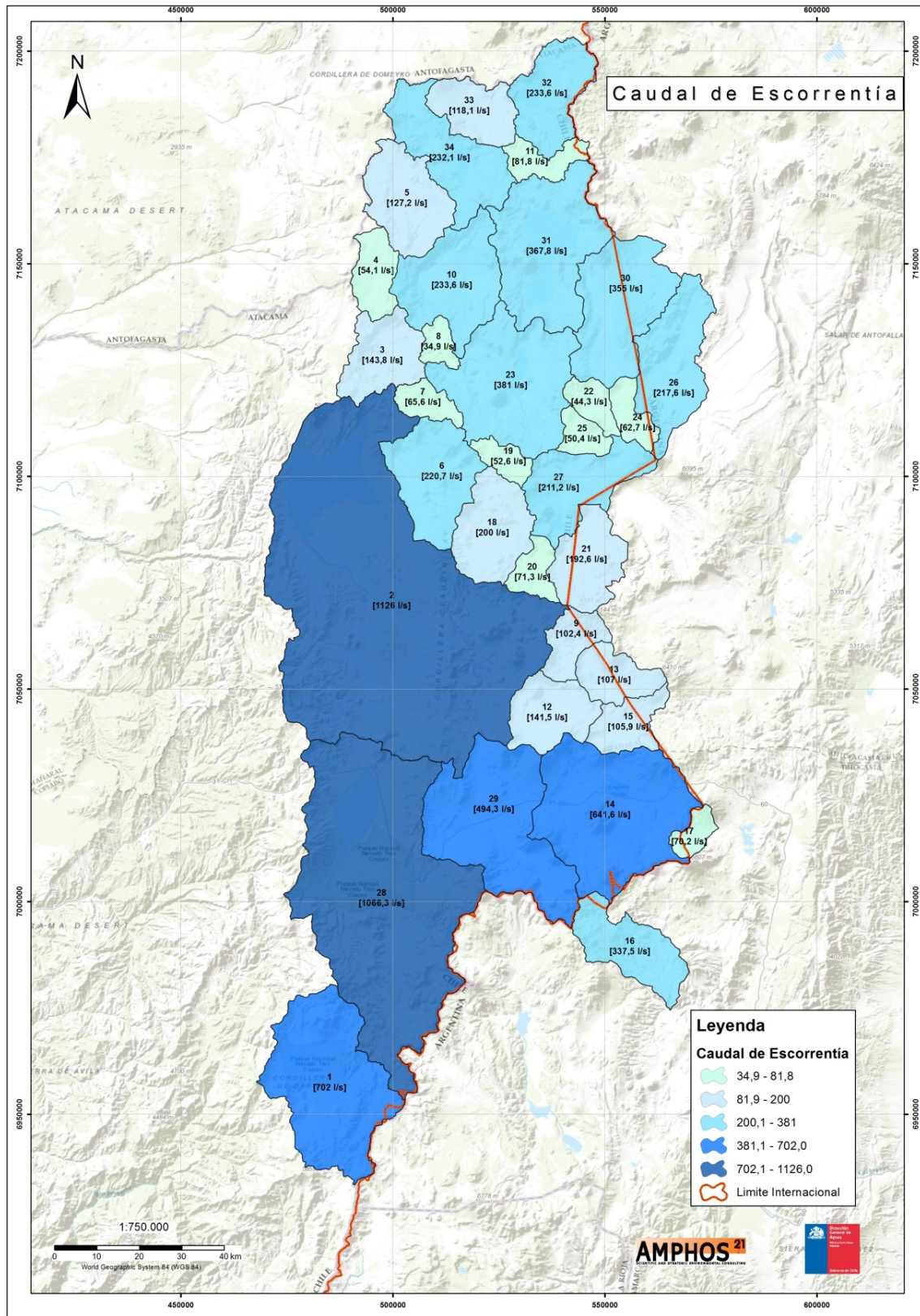


Figura 7-3: Estimación de la escorrentía total en las cuencas Alto-Andinas

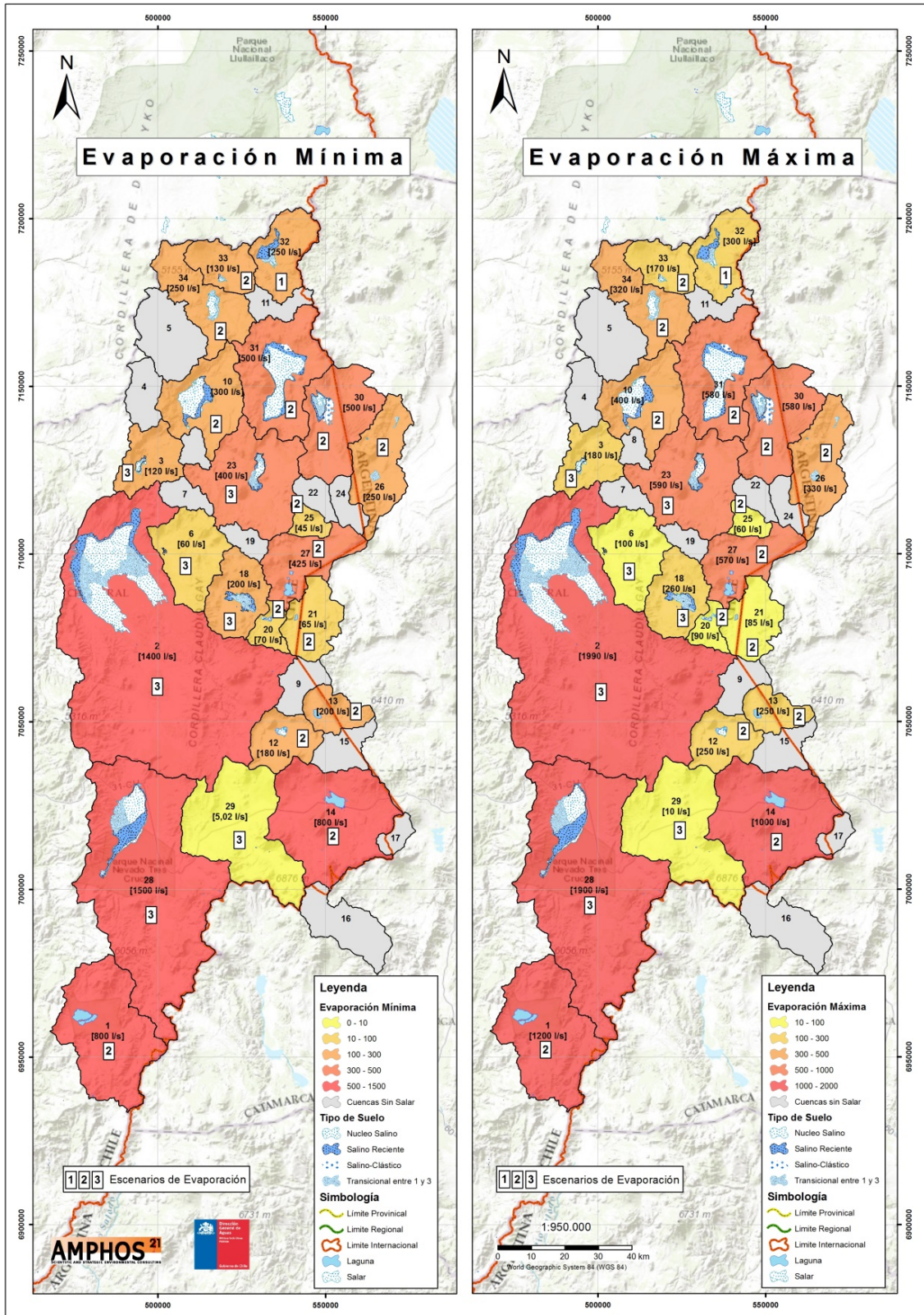


Figura 7-4: Estimación de la evaporación mínima y máxima preliminar en las cuencas Alto-Andinas.

Tabla 7-1: Resumen balances hídricos por cuenca en régimen natural.

N° Cuenca	Nombre Cuenca	Tipo de Cuenca	Área [km²]	Cota [msnm]	Cuerpo evaporante	Recarga Total [l/s]	Caudal de escorrentía [l/s]	Entrada Lateral [l/s]	Evaporación [l/s]	Salida Lateral [l/s]	Entradas [l/s]	Salidas [l/s]	Balance [l/s]	Comentarios
1	Laguna del Negro Francisco	Endorreica	906,0	4.547	SI	292,0	702,0	0,0	991,5	0,0	994	992	2	Sin comentarios
2	Salar de Pedernales	Endorreica	3.592,3	3.996	SI	1.040,9	1.126,0	340,0	1.994,5	0,0	2.507	1.995	512	Entradas laterales de 260 [l/s] (C6) y 80 [l/s] (C7). DAA en uso
3	Salar de Infieles	Endorreica	305,3	4.040	SI	23,0	143,8	10,0	171,9	0,0	177	172	5	Entrada lateral de 10 [l/s] (C4)
4	Cerro el Encanche	Endorreica	178,6	4.268	NO	12,2	54,1	0,0	0,0	65,0	66	65	1	Salidas laterales de 10 [l/s] (C3) y 55 [l/s] (C10)
5	Cerro Blanco	Endorreica	391,7	4.023	NO	43,2	127,2	0,0	0,0	170,0	170	170	0	Salida lateral de 50 [l/s] (C34) y 120 [l/s] pérdida al subsuelo
6	La Laguna	Endorreica	456,9	4.205	SI	128,1	220,7	0,0	91,3	258,0	349	349	0	Salida lateral de 258 [l/s] (C2)
7	Qda. Los Maranceles	Endorreica	107,1	4.389	NO	17,3	65,6	0,0	0,0	83,0	83	83	0	Salida lateral de 83 [l/s] (C2)
8	Cerro Conito de los Infieles	Exorreica	75,4	4.287	NO	6,1	34,9	0,0	0,0	41,0	41	41	0	Salida lateral de 41 [l/s] (C10)
9	Sierra Nevada	Endorreica	161,9	5.112	NO	18,8	102,4	0,0	0,0	120,0	121	120	1	Salida lateral de 100 [l/s] (C13) y 20 [l/s] pérdida al subsuelo
10	Salar de Aguilar	Endorreica	516,6	3.920	SI	58,0	233,6	60,0	345,0	0,0	352	345	7	Entradas laterales de 20 [l/s] (C4) y 40 [l/s] (C8)
11	Qda. La Rossa	Endorreica	129,1	4.457	NO	19,3	81,8	0,0	0,0	100,0	101	100	1	Salida lateral de 100 [l/s] (C31)
12	Wheelwright	Endorreica	291,2	4.674	SI	77,0	141,5	0,0	211,8	0,0	219	212	7	Sin comentarios
13	Laguna Escondida	Endorreica	199,6	4.847	SI	38,1	107,0	100,0	242,3	0,0	245	242	3	Entrada lateral de 100 [l/s] (C9)
14	Laguna Verde	Endorreica	1.004,5	4.914	SI	187,3	641,6	160,0	985,4	0,0	989	985	3	Entradas laterales de 20 [l/s] (C29) y 140 [l/s] (C15)

N° Cuenca	Nombre Cuenca	Tipo de Cuenca	Área [km²]	Cota [msnm]	Cuerpo evaporante	Recarga Total [l/s]	Caudal de escorrentía [l/s]	Entrada Lateral [l/s]	Evaporación [l/s]	Salida Lateral [l/s]	Entradas [l/s]	Salidas [l/s]	Balance [l/s]	Comentarios
15	Qda. Las Amarillas	Exorreica	182,1	4.893	NO	35,8	105,9	0,0	0,0	140,0	142	140	2	Salida lateral de 140 [l/s] (C14)
16	Cerro Agua Caliente	Exorreica	344,5	5.108	NO	20,8	337,5	0,0	0,0	358,0	358	358	0	Cuenca exorreica, sale todo por escorrentía/infiltración
17	Cerro Nevado de Incahuasi	Exorreica	78,8	5.053	NO	4,3	70,2	0,0	0,0	74,0	74	74	0	Cuenca exorreica, sale todo por escorrentía/infiltración
18	Salar de Piedra Parada	Endorreica	376,4	4.503	SI	61,3	200,0	0,0	258,2	0,0	261	258	3	Sin comentarios
19	Cerro Agua de Morales	Endorreica	90,3	4.789	NO	15,0	52,6	0,0	0,0	65,0	68	65	3	Salida lateral de 65 [l/s] (C23)
20	Lagunas del Jilguero	Endorreica	114,5	4.729	SI	18,2	71,3	0,0	88,7	0,0	90	89	1	Sin comentarios
21	Laguna del Bayo	Endorreica	312,1	4.873	SI	53,8	192,6	0,0	81,3	160,0	246	241	5	Salida lateral de 160 [l/s] (C27)
22	Qda. El Llano	Exorreica	104,2	4.761	NO	20,1	44,3	0,0	0,0	64,0	64	64	0	Salida lateral de 64 [l/s] (C30)
23	Salar Grande	Endorreica	780,7	4.400	SI	144,3	381,0	65,0	584,1	0,0	590	584	6	Entrada lateral de 65 [l/s] (C19)
24	Qda. la Trinchera	Exorreica	112,8	4.807	NO	14,1	62,7	0,0	0,0	77,0	77	77	0	Salida lateral de 77 [l/s] (C30)
25	Laguna de las Parinas	Endorreica	95,0	4.666	SI	14,7	50,4	0,0	55,9	0,0	65	56	9	Sin comentarios
26	Laguna de Colorados	Endorreica	467,4	4.420	SI	103,0	217,6	0,0	312,7	0,0	321	313	8	Sin comentarios
27	Lagunas Bravas	Endorreica	410,1	4.614	SI	54,8	211,2	160,0	425,7	0,0	426	426	0	Entrada lateral de 160 [l/s] (C21)
28	Salar de Maricunga	Endorreica	2.208,8	4.265	SI	609,5	1066,3	700,0	1882,9	0,0	2.376	1.883	493	Entrada lateral de 700 [l/s] (C29). DAA en uso
29	Piedra Pómez	Endorreica	915,9	4.910	SI	240,4	494,3	0,0	9,9	720,0	735	730	5	Salidas laterales de 20 [l/s] (C14) y 700 [l/s] (C28)
30	Salar de las Parinas	Endorreica	590,1	4.373	SI	83,2	355,0	141,0	572,3	0,0	579	572	7	Entradas laterales de 64 [l/s] (C22) y 77 [l/s] (C24)

N° Cuenca	Nombre Cuenca	Tipo de Cuenca	Área [km²]	Cota [msnm]	Cuerpo evaporante	Recarga Total [l/s]	Caudal de escorrentía [l/s]	Entrada Lateral [l/s]	Evaporación [l/s]	Salida Lateral [l/s]	Entradas [l/s]	Salidas [l/s]	Balance [l/s]	Comentarios
31	Salar de la Isla	Endorreica	759,3	4.325	SI	109,4	367,8	100,0	575,4	0,0	577	575	2	Entrada de 100 [l/s] (C11)
32	Salar de Gorbea	Endorreica	356,9	4.446	SI	43,4	233,6	0,0	266,9	0,0	277	267	10	Hay más derechos otorgados que oferta hídrica
33	Salar de la Azufrera	Endorreica	248,3	3.998	SI	24,1	118,1	0,0	133,4	0,0	142	133	9	Hay más derechos otorgados que oferta hídrica
34	Salar de Agua Amarga	Endorreica	460,8	4.037	SI	44,0	232,1	50,0	317,5	0,0	326	318	9	Entrada de 50 [l/s] (C5)

Tabla 7-2: Resumen balances de oferta y demanda en las cuencas alto-andinas.

N° Cuenca	Nombre Cuenca	Área [km2]	Oferta [l/s]	DAA (Otorgados) [l/s]*	DAA (Pendientes) [l/s]	Demanda Total [l/s]**	Balance [l/s]***
1	Laguna del Negro Francisco	906,0	994	738,5	39,0	700	294
2	Salar de Pedernales	3.592,3	2.507	1.353,8	0,0	1.150	1.357
3	Salar de Infieles	305,3	177	0	0	0	177
4	Cerro el Encanche	178,6	66	0	0	0	66
5	Cerro Blanco	391,7	170	0	27,0	27	143
6	La Laguna	456,9	349	510,0	0	357	-8
7	Qda. Los Maranceles	107,1	83	0	0	0	83
8	Cerro Conito de los Infieles	75,4	41	0	0	0	41
9	Sierra Nevada	161,9	121	0	0	0	121
10	Salar de Aguilar	516,6	352	0	0	0	352
11	Qda. La Rossa	129,1	101	0	139,5	139,5	-39
12	Wheelwright	291,2	219	0	0	0	219
13	Laguna Escondida	199,6	245	0	0	0	245
14	Laguna Verde	1.004,5	989	330,0	588,0	825	164
15	Qda. Las Amarillas	182,1	142	0	0	0	142
16	Cerro Agua Caliente	344,5	359	0	0	0	359
17	Cerro Nevado de Incahuasi	78,8	74	0	0	0	74
18	Salar de Piedra Parada	376,4	261	0	0	0	261
19	Cerro Agua de Morales	90,3	68	0	0	0	68
20	Lagunas del Jilguero	114,5	89	0	0	0	89
21	Laguna del Bayo	312,1	247	0	0	0	247
22	Qda. El Llano	104,2	64	0	0	0	64
23	Salar Grande	780,7	590	0	166,1	166,1	424
24	Qda. la Trinchera	112,8	77	0	0	0	77
25	Laguna de las Parinas	95,0	65	0	0	0	65
26	Laguna de Colorados	467,4	321	0	0	0	321
27	Lagunas Bravas	410,1	426	0	0	0	426
28	Salar de Maricunga	2.208,8	2.376	2.703	330	2.720	-344
29	Piedra Pómez	915,9	734	250	0	225	509
30	Salar de las Parinas	590,1	579	0	0	0	579
31	Salar de la Isla	759,3	577	116	40	140,4	437
32	Salar de Gorbea	356,9	277	199,7	0	215	62
33	Salar de la Azufrera	248,3	142	363	0	356	-214
34	Salar de Agua Amarga	460,8	326,0	15,8	0,0	14,0	312,0

*DAA: Derecho de Aprovechamiento de Aguas.

**En el cálculo de esta demanda se ha considerado un factor de uso entre 0,7 y 0,9%.

***Los balances positivos indican un superávit y los negativos un déficit en la cuenca.

8. Hidrogeología y Modelos Conceptuales

A partir de la interpretación de los datos obtenidos en la campaña de terreno y de la información existente referente al contexto geológico, hidrológico, hidrogeológico, geofísico e hidrogeoquímico se elaboró un modelo conceptual hidrogeológico para cada una de las 34 cuencas, donde los aspectos más relevantes considerados en cada uno de ellos son los siguientes: a) interpretación de la información geofísica, b) caracterización de acuíferos principales, c) áreas de recarga y descarga, d) piezometría y dirección de flujo y e) tratamiento de datos de hidroquímica e isótopos. Las actividades y aspectos considerados más destacables son:

- A partir de las Unidades Geológicas descritas en cada una de las cuencas, se asignó una Unidad Hidrogeológica preliminar.
- En toda la zona en estudio se trazaron acuíferos saturados inferidos (Figura 8-1). El trazado de estos acuíferos es el resultado de un análisis de la piezometría -en aquellas cuencas que presentaban pozos o piezómetros-, imágenes satelitales, análisis geofísico y observaciones de terreno.
- Dentro de los acuíferos saturados inferidos, se dibujaron curvas de igual nivel piezométrico o isopiezas que permitieron construir mapas de piezometría (Figura 8-1) y dibujar las principales direcciones de flujo del agua subterránea. Los mapas de piezometría de detalle se presentan en los informes individuales de cada cuenca.
- Además, se han sugerido conexiones subterráneas inter-cuencas. Estas entradas o salidas laterales se han estimado mediante el análisis de la geomorfología y geología estructural del sector, posibles continuidades entre unidades hidrogeológicas y en base al balance hídrico de cuencas adyacentes. En la Figura 8-2 se expone un resumen de las conexiones.
- Por último, cabe destacar que se han generado nuevos perfiles hidrogeológicos esquemáticos en aquellas cuencas de mayor interés, los cuales fueron calibrados con información de pozos y geofísica.

Para finalizar este apartado, se adjuntan dos mapas que incluyen parte de la información más relevante a nivel hidrogeológico de la zona en estudio.

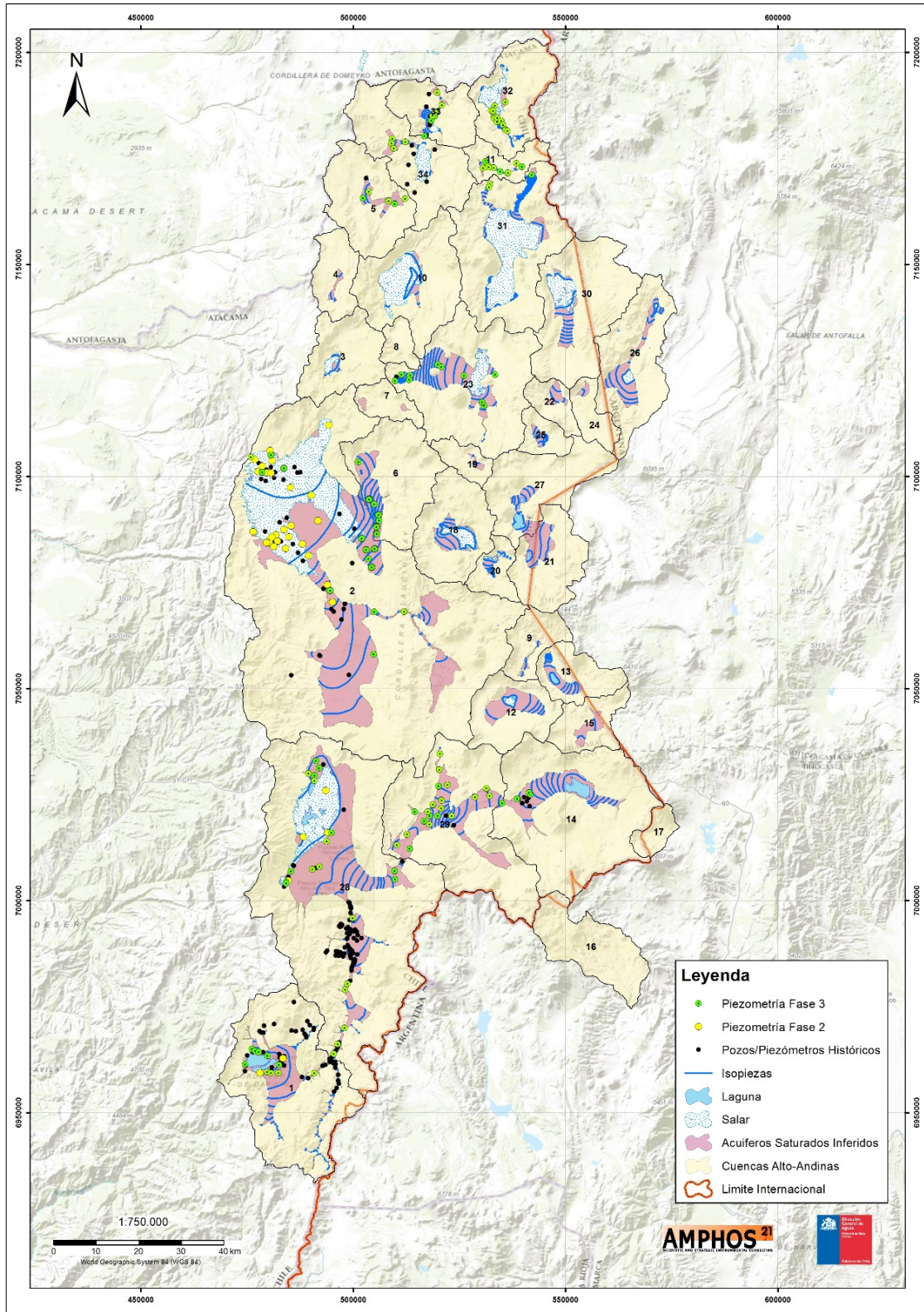


Figura 8-1: Mapa resumen con la distribución de los pozos/piezómetros, puntos monitoreados durante las Fases 2 y 3 e isopiezas generadas a partir de la piezometría.

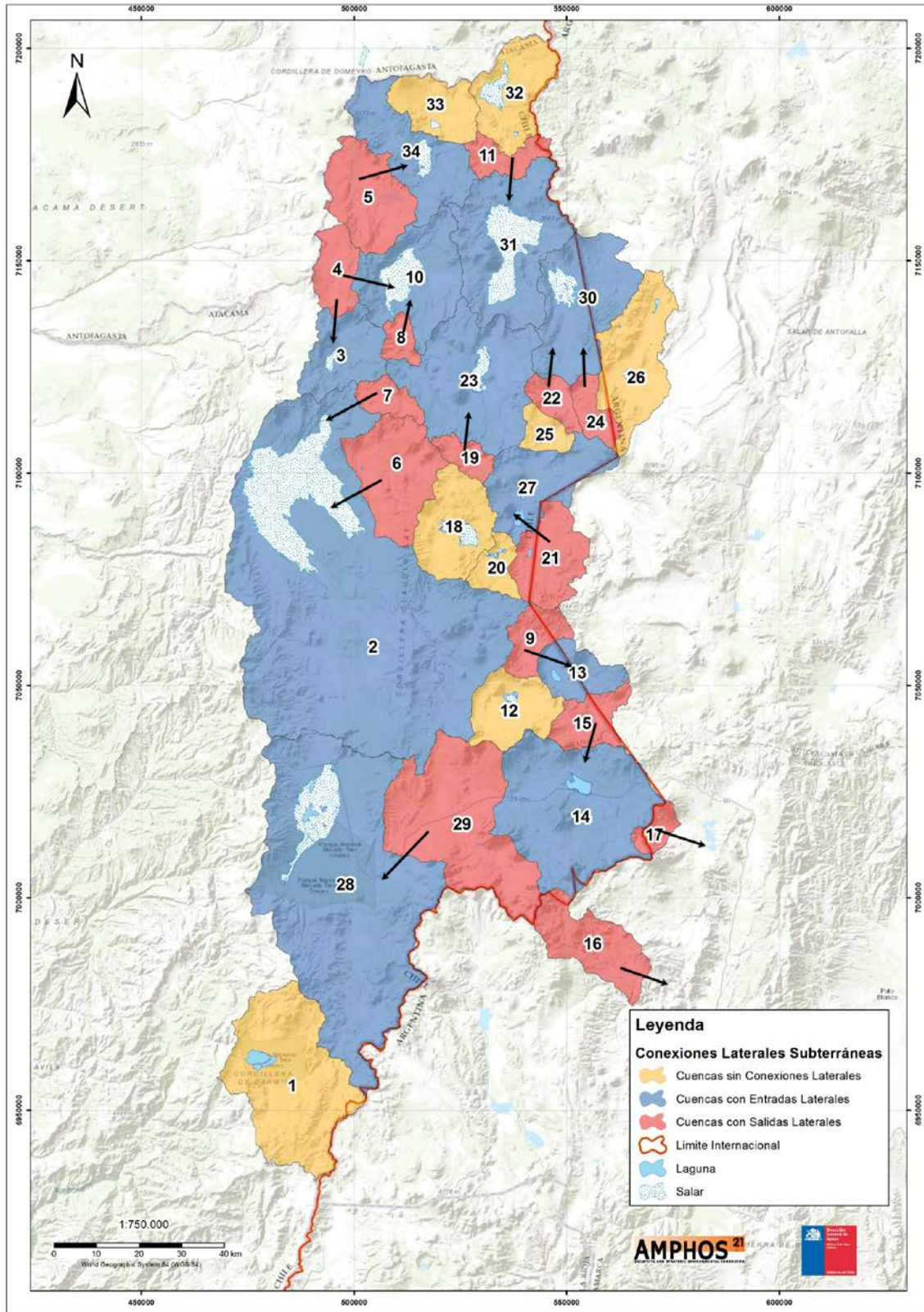


Figura 8-2: Mapa resumen de conexiones laterales subterráneas inter-cuencas.

9. Diseño Conceptual, Factibilidad Técnica y Económica de Traslase

En esta etapa del estudio, se realizó un análisis preliminar del diseño, factibilidad técnica y económica de un traslase de agua desde las cuencas alto-andinas hasta la cuenca del Río Copiapó.

De acuerdo a los resultados del balance hídrico y modelo conceptual de cada una de las cuencas analizadas, se escogieron las cuencas Laguna del Negro Francisco, Salar de Pedernales, Salar de Maricunga y Piedra Pómez para evaluar el posible traslase de agua hacia la cuenca del Río Copiapó.

Luego de evaluar y considerar costos de financiamiento, construcción, operación, mantenimiento y costo del litro de agua en el largo plazo, las alternativas más favorables son (Figura 9-1):

- **Alternativa de traslase N° 1 (Propuesta por DGA-Arcadis, 2015)**

Considera captar el agua en el sector al sur del cerro La Ola (cuenca Salar de Pedernales) y conducirla ocho kilómetros al sur por la ruta C-173, que conecta el salar de Pedernales con el salar de Maricunga, y luego continuar hacia el poniente por sobre un camino secundario.

- **Alternativa de traslase N° 2 (Propuesta por DGA-Amphos 21, 2016)**

Esta alternativa considera captar el agua de la cuenca Piedra Pómez y conducirla hacia el sur poniente por la carretera Ch-31, luego seguir por sobre camino secundario hasta la carretera C-601 y continuar por dicha carretera hasta el poniente. En la definición de esta alternativa, se han usado los caminos existentes para el emplazamiento sobre terreno de las tuberías de impulsión, de manera de aprovechar sus plataformas para así reducir los costos de instalación y además detectar con mayor facilidad posibles roturas o fugas.



Figura 9-1. Disposición de las alternativas para trasvase. 1: Alternativa trasvase (DGA-Arcadis, 2015); 2: Alternativa trasvase (DGA-Amphos 21, 2016)

10. Conclusiones

Los principales hitos de este proyecto en su totalidad (Fase 1, 2 y 3), que han sido ampliamente desarrollados y descritos en el informe principal e informes individuales de las 34 cuencas de estudio, se exponen a continuación:

- En primer lugar, se ha realizado una extensa e importante revisión bibliográfica, permitiendo un robusto escenario inicial para la elaboración de este proyecto. El presente documento está basado en la información recabada a lo largo de las Fases 1 y 2, teniendo como finalidad dar continuidad y mejorar la evaluación desarrollada previamente.
- Para facilitar la interpretación y visualización de los resultados del estudio, se ha elaborado un proyecto de Sistema de Información Geográfica (SIG) en donde se ha plasmado la información más relevante utilizada, permitiendo visualizarla de manera práctica y ordenada.
- Respecto a la geología, se han recopilado todos los mapas geológicos de la zona de estudio caracterizando la geología de cada una de las 34 cuencas. Además, se ha descrito la geología estructural local para todas las cuencas de estudio, se han rescatado y recopilado todas las columnas litológicas disponibles de los pozos distribuidos en las cuencas, se han recopilado perfiles geológicos históricos a partir de los mapas geológicos oficiales, confeccionando nuevos cortes a partir de columnas litológicas representativas en cuencas donde no se contaba con este tipo de información. Por otra parte, se ha confeccionado una cartografía preliminar de tipos de suelo del salar.
- En cuanto a la geofísica, se han confeccionado mapas de distribución geográfica y tablas resumen con las prospecciones geofísicas realizadas en las cuencas (presentado en los informes individuales). Además, se ha rescatado la información de mayor relevancia para validar y esclarecer conexiones laterales intercuenas, así como la geometría y nivel freático de los diferentes acuíferos existentes de modo de complementar los modelos conceptuales hidrogeológicos. Por otra parte, durante las Fases 1, 2 y 3 se ejecutaron prospecciones geofísicas del tipo Transiente Electromagnético (TEM) y Gravimétrico, todas ellas distribuidas en el sector centro-sur del área de estudio.

- En cuanto a la hidroquímica, se ha construido una base de datos validada y utilizada para la elaboración de diversos diagramas y mapas. Adicionalmente, se llevaron a cabo distintas campañas de terreno con el objetivo de realizar un muestreo hidroquímico que complementara el estudio, abarcando zonas extremas y de difícil acceso. En general, las aguas de las cuencas alto-andinas presentan concentraciones de sulfatos, cloruros, arsénico y boro superiores al límite establecido en la norma de Riego NCh1333 y NCh409, por lo que no cumplen con las normas de potabilidad y riego.
- Además, se identificaron procesos comunes en la evolución química de las aguas a nivel regional. Estos consisten en una recarga diluida (baja conductividad eléctrica) proveniente, esencialmente, de las precipitaciones durante el invierno altiplánico tanto en forma de lluvia como de nieve, las que se enriquecen progresivamente de iones debido a la interacción con las rocas circundantes las que son, en su mayoría, volcánicas modernas, y debido al aumento del tiempo de residencia del agua subterránea en el acuífero. En la mayoría de las cuencas endorreicas estudiadas, la descarga del acuífero se produce hacia los salares o lagunas de forma subterránea o mediante manantiales-vertientes cuyas aguas descargan en las partes bajas de la cuenca, donde ocurren procesos de reconcentración mineral debido a la evaporación intensa de las aguas superficiales y disolución de sales evaporíticas. Dichas aguas de descarga son, predominantemente, de facies clorurada-sódica y tiene una conductividad eléctrica muy elevada ($>100.000 \mu\text{S}$). Las aguas superficiales expuestas a la evaporación intensa se encuentran muy enriquecidas en los isótopos más pesados del oxígeno y del hidrógeno. En general, los resultados isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ muestran la existencia de dos ambientes de recarga distintos: uno correspondiente a las zonas más altas de las cuencas con un ambiente mucho más frío y húmedo, y otro de menor altitud y mayor temperatura. Sin embargo, el gran rango de altitudes en las 34 cuencas estudiadas dificulta la separación de las muestras por su composición isotópica de la molécula del agua.
- En cuanto a la instrumentación, se han instalado nuevos y modernos sensores hidrometeorológicos: 17 lisímetros y 2 estaciones meteorológicas completas que permiten medir variables hidrológicas, tales como radiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura, precipitación líquida/sólida, presión atmosférica y humedad relativa. En cada lisímetro se ha instalado un pluviómetro y un

piezómetro. Por lo cual, se puede afirmar que se ha constituido una red de estaciones pluviométricas compuesta por 19 pluviómetros que permitirá medir las precipitaciones líquidas y dilucidar el gradiente de precipitación junto a su variación espacio-temporal. Los datos que aportarán estas estaciones serán claves para la toma de decisiones sobre los recursos hídricos de la Región de Atacama. Estas cuencas, históricamente, se han caracterizado por presentar escasa o nula información instrumental de alto estándar de carácter público, siendo las entidades privadas las únicas que contaban con algún tipo de instrumentación.

- Respecto a la hidrología, se ha realizado un análisis riguroso de antecedentes hidrológicos disponibles, en el cual se identificó que la información proporcionada por la red de estaciones en la zona de estudio, es insuficiente para estimar la precipitación y evaluar su comportamiento espacio temporal. Es por ello, que para ofrecer un valor de precipitación media anual actualizado se ha utilizado el método de las isoyetas. Sin embargo, no se ha podido dilucidar qué cantidad de estas precipitaciones son nivales y cuáles pluviales, esta cuestión se espera sea resuelta a partir de la información proporcionada por los nuevos equipos instalados. A partir de los parámetros geomorfológicos de cada una de las cuencas y su conductividad hidráulica, grado de consolidación de las unidades litológicas y la delimitación de acuíferos, se determinaron los coeficientes de infiltración (C_i) y escorrentía (C_E) con los cuales se estimaron los valores de recarga total y escorrentía superficial en la cuenca (principales entradas al sistema hídrico).
- El balance de oferta y demanda realizado a partir de los derechos de aprovechamiento de aguas (otorgados y pendientes) y las entradas de agua al sistema, ha permitido observar que casi todas cuencas tienen un superávit (disponibilidad), a excepción de algunas cuencas que poseen un déficit (escasez) en sus balances tales como: La Laguna (-8 l/s), Quebrada La Rossa (-39 l/s), Salar de Maricunga (-344 l/s) y Salar de la Azufrera (-214 l/s). Sin embargo, hay que resaltar que se desconoce si efectivamente los derechos otorgados por la DGA están siendo bombeados y cuánto es el caudal de extracción. Por lo tanto, el balance ofrecido es referencial (preliminar) y se debe considerar con especial cuidado a la hora de usarlos como antecedentes para tomar decisiones en torno a los recursos hídricos de las cuencas Alto-Andinas.

- Finalmente, se ha elaborado un modelo conceptual hidrogeológico para cada una de las 34 cuencas donde los aspectos más relevantes para su elaboración fueron: a) valoración e interpretación de la información geofísica, b) caracterización de acuíferos principales, c) áreas de recarga y descarga, d) piezometría y dirección de flujo y e) tratamiento de datos de hidroquímica e isótopos. Se trazaron acuíferos saturados inferidos en toda la zona de estudio con sus respectivas líneas de flujo (isopiezas), construyendo mapas de piezometría. Por otra parte, se han sugerido conexiones subterráneas inter-cuencas. Estas entradas o salidas laterales se han estimado mediante el análisis de la geomorfología del sector, posibles continuidades entre unidades hidrogeológicas y en base al caudal sobrante de cuencas adyacentes. Se han generado nuevos perfiles hidrogeológicos esquemáticos en aquellas cuencas de mayor interés, los cuales fueron calibrados con información de pozos y geofísica.