



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

INFORME FINAL

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 |
| 1.1 GENERALIDADES | 1 |
| 1.2 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA | 2 |
| 1.3 ANTECEDENTES | 2 |
| 1.4 OBJETIVOS Y ALCANCE..... | 5 |
| 1.4.1 <i>Objetivo General</i> | 5 |
| 1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i> | 5 |
| 1.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO | 5 |
| 1.5.1 <i>Estructura del Documento</i> | 5 |
| 1.5.2 <i>Metodología</i> | 6 |
| 1.6 DESCRIPCIÓN DE ANEXOS | 12 |
| 1.6.1 <i>Anexo 1: Figuras</i> | 12 |
| 1.6.2 <i>Anexo 2: Catastro de Pozos</i> | 12 |
| 1.6.3 <i>Anexo 3: Columnas litológicas y expedientes</i> | 12 |
| 1.6.4 <i>Anexo 4: Geofísica Fase 3</i> | 13 |
| 1.6.5 <i>Anexo 5: Hidroquímica</i> | 13 |
| 1.6.6 <i>Anexo 6: Hidrología, hidrogeología y balance</i> | 13 |
| 1.6.7 <i>Anexo 7: Base de datos y proyecto SIG</i> | 14 |
| 1.6.8 <i>Anexo 8: Bibliografía y Referencias</i> | 14 |
| 2. ACTUALIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN HIDROLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA (ETAPA I, FASE 3) | 16 |
| 2.1 OBJETIVOS Y ALCANCE | 16 |
| 2.2 BASE DE DATOS ANTECEDENTES..... | 16 |
| 2.3 ÁREAS TEMÁTICAS | 17 |
| 2.4 REVISIÓN Y VALORACIÓN DE LA INFORMACIÓN | 18 |
| 2.4.1 <i>Geología</i> | 18 |
| 2.4.2 <i>Hidrología</i> | 20 |
| 2.4.3 <i>Hidrogeología</i> | 25 |
| 2.4.4 <i>Hidrogeoquímica</i> | 26 |
| 2.4.5 <i>Geofísica</i> | 27 |
| 2.4.6 <i>Puntos de agua (vertientes, pozos y otros) y Parámetros Hidráulicos</i> | 27 |
| 2.4.7 <i>Ecosistemas – Humedales</i> | 28 |
| 2.4.8 <i>Demanda de Agua – Derechos de Aprovechamiento</i> | 28 |

| | |
|--|------------|
| 3. TRABAJOS DE TERRENO (ETAPAS II Y IV, FASE 3) | 29 |
| 3.1 CATASTRO DE POZOS Y MONITOREO DE NIVELES | 29 |
| 3.2 MUESTREO HIDROQUÍMICO E ISOTÓPICO | 32 |
| 3.2.1 Metodología..... | 32 |
| 3.2.2 Equipamiento..... | 33 |
| 3.2.3 Ubicación Muestreo Hidroquímico e Isotópico..... | 34 |
| 3.3 INSTALACIÓN DE SENSORES HIDROMÉTRICOS..... | 36 |
| 3.4 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA (FASE 3) | 37 |
| 4. INSTRUMENTACIÓN INSTALADA (FASES 2 Y 3) | 39 |
| 4.1 FASE 2 (ARCADIS, 2015) | 39 |
| 4.1.1 Estación meteorológica | 39 |
| 4.1.2 Lisímetros | 42 |
| 4.2 FASE 3 (AMPHOS 21, 2016)..... | 47 |
| 4.2.1 Visita de inspección fiscal a los equipos instalados..... | 47 |
| 4.2.2 Instalación de Sensores Hidrométricos Fase 3..... | 54 |
| 4.2.3 Ubicación de los sensores..... | 59 |
| 4.3 RESUMEN INSTRUMENTACIÓN (FASES 2 Y 3)..... | 60 |
| 4.4 LISÍMETROS Y TIPO DE SUELO..... | 63 |
| 4.5 ANÁLISIS DE EVOLUCIÓN DE PRESIÓN Y PRECIPITACIÓN EN LAS PUNTERAS DE LOS LISÍMETROS DE FASE 2 | 70 |
| 4.6 RED DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS | 74 |
| 5. GEOLOGÍA Y SUELOS DE SALAR | 88 |
| 5.1 GEOLOGÍA | 88 |
| 5.2 CARTOGRAFÍA PRELIMINAR DE SUELOS..... | 90 |
| 6. GEOFÍSICA | 92 |
| 6.1.1 Fase 1, DGA-Aquaterra (2013)..... | 94 |
| 6.1.2 Fase 2, DGA-Arcadis (2015) | 94 |
| 6.1.3 Fase 3, DGA-Amphos 21 (2016)..... | 95 |
| 7. HIDROQUÍMICA | 104 |
| 8. HIDROLOGÍA | 109 |
| 8.1 ANÁLISIS HIDROLÓGICO | 109 |
| 8.1.1 Análisis de la precipitación..... | 109 |
| 8.1.2 Estimación de la recarga | 113 |
| 8.1.3 Estimación de la esorrentía | 118 |
| 8.1.4 Cuantificación de la evaporación directa..... | 121 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 8.1.5 | Balance hídrico | 136 |
| 8.1.6 | Oferta y Demanda Hídrica | 140 |
| 9. | HIDROGEOLOGÍA Y MODELOS CONCEPTUALES..... | 142 |
| 10. | DISEÑO CONCEPTUAL, FACTIBILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE TRASVASE (ETAPA IV, FASE 3) | 151 |
| 10.1 | ANTECEDENTES DE TRASVASE EN LAS CUENCAS ALTO ANDINAS | 151 |
| 10.2 | CRITERIOS DE DISEÑO | 157 |
| 10.3 | ANÁLISIS ECONÓMICO | 165 |
| 10.3.1 | <i>Rentabilidad del proyecto en el largo plazo.....</i> | <i>167</i> |
| 11. | CONCLUSIONES GENERALES A NIVEL REGIONAL Y LOCAL | 170 |
| 11.1 | GEOLOGÍA | 170 |
| 11.2 | GEOFÍSICA..... | 171 |
| 11.3 | HIDROQUÍMICA | 171 |
| 11.4 | HIDROLOGÍA, BALANCE Y OFERTA HÍDRICA..... | 173 |
| 11.5 | HIDROGEOLOGÍA Y MODELOS CONCEPTUALES..... | 174 |

ANEXOS

Anexo 1: Figuras

Anexo 2: Catastro de puntos

Anexo 3: Columnas litológicas y expedientes

Anexo 4: Geofísica (Fase 3)

Anexo 5: Hidroquímica

Anexo 6: Hidrología, hidrogeología y balance

Anexo 7: Base de datos y proyecto SIG

Anexo 8: Bibliografía y referencias

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1-1: Ubicación geográfica del área de estudio. | 3 |
| Figura 3-1: Distribución de puntos visitados/catastrados durante las campañas de terreno. | 30 |
| Figura 3-2: Distribución de puntos en los cuales fue posible medir nivel de agua. | 31 |
| Figura 3-3: Distribución de puntos para muestreo hidroquímico e isotópico | 35 |
| Figura 4-1: Estación Meteorológica Nevado Tres Cruces instalada en la Fase 2, DGA-Arcadis, 2015. | 41 |
| Figura 4-2: Componentes de los lisímetros instalados. Lisímetro MAR-2. Modif. Fase 2, DGA-Arcadis (2015)..... | 43 |
| Figura 4-3: Ejemplo de ficha con las características de cada lisímetro. Modif. Fase 2, DGA-Arcadis (2015)..... | 45 |
| Figura 4-4: Visita de inspección a la estación meteorológica Nevado Tres Cruces. | 49 |
| Figura 4-5: PED-1. Sin presencia de la instrumentación correspondiente. Único punto no cercado.50 | |
| Figura 4-6: Medición de niveles y toma de datos..... | 52 |
| Figura 4-7: Visita de inspección a los equipos instalados..... | 52 |
| Figura 4-8: Estación Meteorológica instalada en el Salar de la Isla en la Fase 3. | 55 |
| Figura 4-9: Distribución de los lisímetros instalados en Fase 2 y Fase 3. | 61 |
| Figura 4-10: Ejemplo de ficha con las características de cada lisímetro instalado en la Fase 3..... | 62 |
| Figura 4-11: Ubicación lisímetros y tipos de suelo en Laguna del Negro Francisco (C1). Modif. Fase 2, DGA-Arcadis (2015). | 65 |
| Figura 4-12: Ubicación lisímetros y tipos de suelo en Salar de Pedernales (C2)..... | 66 |
| Figura 4-13: Ubicación lisímetros y tipos de suelo en Salar Grande (C23). | 67 |
| Figura 4-14: Ubicación lisímetros y tipos de suelo en Salar de Maricunga (C28). | 68 |
| Figura 4-15: Ubicación lisímetros y tipos de suelo en Salar de La Isla (C31). | 69 |
| Figura 4-16. Diagramas de evolución de la presión y la precipitación en los piezómetros de la Laguna Negro Francisco. | 71 |
| Figura 4-17. Diagramas de evolución de la presión y la precipitación en los piezómetros Salar de Maricunga. | 72 |
| Figura 4-18. Diagramas de evolución de la presión y la precipitación en los piezómetros de la Salar de Pedernales..... | 73 |
| Figura 4-19. Ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas. | 76 |
| Figura 4-20. Evolución de la precipitación media diaria registrada en la estación..... | 78 |
| Figura 4-21. Climograma de precipitación vs temperatura media mensual registrada en la estación durante los años 2015 y 2016. | 79 |
| Figura 4-22. Climograma de precipitación vs temperatura media mensual registrada en la estación. | 79 |
| Figura 4-23. Diagrama de precipitación y humedad relativa (HR) media mensual registrada en la estación..... | 80 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4-24. Evolución de la temperatura media diaria registrada en la estación | 80 |
| Figura 4-25. Diagrama de evolución de la radiación solar en la estación..... | 81 |
| Figura 4-26. Diagrama de evolución de la velocidad del viento (WS) registrada en la estación | 81 |
| Figura 4-27. Diagrama de evolución de la humedad relativa (HR) registrada en la estación | 82 |
| Figura 4-28. Climograma de precipitación vs temperatura registrada en la estación | 82 |
| Figura 4-29. Diagrama de evolución de la radiación solar (RS) vs temperatura promedio en la estación..... | 83 |
| Figura 4-30: Evolución temporal de la altura de nieve, estación Campamento. | 84 |
| Figura 4-31: Evolución temporal de la altura de nieve, estación Caspiche. | 84 |
| Figura 4-32: Evolución temporal de la altura de nieve, estación Cuenca-1..... | 85 |
| Figura 4-33: Gradiente altimétrico de altura de nieve máxima. Estaciones Campamento, Caspiche y Cuenca-1. | 86 |
| Figura 5-1: Resumen de la información geológica recopilada. | 89 |
| Figura 5-2: Mapa resumen de la cartografía preliminar del tipo de suelos de salar | 91 |
| Figura 6-1: Resumen Prospecciones Geofísicas en la zona de estudio | 93 |
| Figura 6-2: Ubicación de la Geofísica realizada en la Fase 3. Izq: Salar de Maricunga. Der: Pampa Pantanillo..... | 98 |
| Figura 6-3: Perfil esquemático del sector Pampa Pantanillo, límite entre las cuencas Laguna del Negro Francisco (C1) y Salar de Maricunga (C28). Elaboración propia..... | 100 |
| Figura 6-4: Perfil TEM P7, en sentido longitudinal al cauce en sector Pampa Pantanillo (DGA-Amphos21, 2016) | 101 |
| Figura 7-1: Distribución de la hidroquímica histórica y la referente a este proyecto. | 105 |
| Figura 7-2: Mapa regional con la distribución de Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | 108 |
| Figura 8-1: Isoyetas de precipitación media anual [mm/año] en las cuencas Alto-Andinas. | 111 |
| Figura 8-2: Estimación de la recarga total en las cuencas Alto-Andinas..... | 115 |
| Figura 8-3. Comparación de la recarga con estudios previos..... | 116 |
| Figura 8-4: Estimación de la escorrentía total en las cuencas Alto-Andinas..... | 120 |
| Figura 8-5: Variación temporal del nivel freático y tramos identificados, PED-1..... | 123 |
| Figura 8-6: Variación temporal del nivel freático y tramos identificados, PED-2..... | 123 |
| Figura 8-7: Variación temporal del nivel freático y tramos identificados, PED-3..... | 123 |
| Figura 8-8: Variación temporal del nivel freático y tramos identificados, PED-4..... | 124 |
| Figura 8-9: Tasa de evaporación versus profundidad, PED-3. | 125 |
| Figura 8-10: Tasa de evaporación versus profundidad, PED-4..... | 125 |
| Figura 8-11: Variación temporal del nivel freático y temperatura, MAR-1. | 126 |
| Figura 8-12: Variación temporal del nivel freático y temperatura, MAR-2. | 127 |
| Figura 8-13: Variación temporal del nivel freático y temperatura, MAR-3. | 127 |
| Figura 8-14: Variación temporal del nivel freático y temperatura, MAR-4. | 128 |
| Figura 8-15: Tasa de evaporación versus profundidad, MAR-2. | 129 |
| Figura 8-16: Tasa de evaporación versus profundidad, MAR-4. | 130 |

| | |
|---|-----|
| Figura 8-17: Variación temporal del nivel freático y la temperatura, LNF-1..... | 131 |
| Figura 8-18: Variación temporal del nivel freático y la temperatura, LNF-2..... | 131 |
| Figura 8-19: Variación temporal del nivel freático y la temperatura, LNF-3..... | 132 |
| Figura 8-20: Lisímetros PED-3 y PED-4 para validación con Zona 9 y 10 de Johnson (2009). Salar de Pedernales. | 133 |
| Figura 8-21: Comparación PED-3 con Zona 9 de Johnson (2009) para validación de metodología. | 133 |
| Figura 8-22: Comparación PED-4 con Zona 10 de Johnson (2009) para validación de metodología. | 134 |
| Figura 8-23: Estimación de la evaporación mínima y máxima preliminar en las cuencas Alto-Andinas. | 135 |
| Figura 8-24: Entradas y salidas consideradas en los balances hídricos, para cada cuenca..... | 136 |
| Figura 9-1: Distribución general de los acuíferos saturados. | 143 |
| Figura 9-2: 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. | 145 |
| Figura 9-3: Perfil esquemático del sector Pampa Pantanillo, límite entre las cuencas Laguna del Negro Francisco (C1) y Salar de Maricunga (C28). Elaboración propia..... | 146 |
| Figura 9-4: Mapa resumen de conexiones laterales subterráneas inter-cuencas | 148 |
| Figura 9-5: Perfil esquemático de conexión entre cuenca del Salar de Pedernales (C2) y La Laguna (C6). Elaboración propia. | 150 |
| Figura 9-6: Perfil esquemático W-E que abarca toda la cuenca del Salar Grande (C23). Elaboración propia | 150 |
| Figura 10-1. Disposición de las alternativas para trasvase..... | 153 |
| Figura 10-2. Áreas silvestres protegidas, sitios Ramsar y sitios prioritarios para la conservación de la Biodiversidad en el sector de estudio..... | 158 |
| Figura 10-3. Disposición de las alternativas para trasvase..... | 160 |
| Figura 10-4. Disposición de la alternativa DGA-Amphos 21 (2016) para trasvase..... | 161 |
| Figura 10-5. Perfil de la alternativa DGA-Amphos 21 (2016) para trasvase..... | 161 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1-1: Número, nombre y superficie de la cuenca | 4 |
| Tabla 2-1: Recarga por cuenca. DGA-Aquaterra (2013) | 23 |
| Tabla 2-2: Resumen resultados estudio CPH (2001). | 23 |
| Tabla 2-3: Salar de Pedernales, escorrentías y recargas medias (DGA, 2009)..... | 24 |
| Tabla 3-1: Resumen de puntos catastrados en ambas campañas de terreno..... | 29 |
| Tabla 3-2: Tipo de puntos para muestreo hidroquímico e isotópico..... | 34 |
| Tabla 3-3: Detalle estaciones TEM medidas. Sector Salar de Maricunga. | 38 |
| Tabla 3-4: Detalle estaciones TEM medidas. Sector Pampa Pantanillo | 38 |
| Tabla 3-5: Detalle estaciones Gravimétricas medidas. Sector Pampa Pantanillo | 38 |
| Tabla 4-1: Equipos y sensores hidrométricos de la estación meteorológica Nevado Tres Cruces. Modif. DGA-Arcadis, 2015..... | 40 |
| Tabla 4-2: Equipos y sensores hidrométricos que se instalaron junto a los lisímetros. Modif. Fase 2, DGA-Arcadis (2015) | 44 |
| Tabla 4-3: Ubicación sensores hidrométricos Fase 2. | 46 |
| Tabla 4-4: Puntos de determinación de niveles. Coordenadas en WGS_84 | 51 |
| Tabla 4-5: Puntos de muestreo y parámetros de estado de las muestras tomadas. Coordenadas en WGS_84 | 53 |
| Tabla 4-6: Instrumentación Lisímetros Fase 3 | 56 |
| Tabla 4-7: Instrumentación Estación Meteorológica, Fase 3..... | 57 |
| Tabla 4-8: Ubicación sensores hidrométricos Fase 3..... | 59 |
| Tabla 4-9: Resumen ubicación de sensores hidrométricos Fase 2 y Fase 3. | 60 |
| Tabla 4-10. Resumen de la información de las estaciones meteorológicas analizadas..... | 74 |
| Tabla 4-11: Equipos y sensores hidrométricos de la estación meteorológica DGA Nevado Tres Cruces | 77 |
| Tabla 4-12: Eventos nivales registrados en las estaciones meteorológicas..... | 86 |
| Tabla 6-1: Resumen Prospecciones Geofísicas realizadas durante la Fase 1. | 94 |
| Tabla 6-2: Resumen Prospecciones Geofísicas realizadas durante la Fase 2. | 95 |
| Tabla 6-3: Detalle estaciones TEM medidas. Sector Salar de Maricunga. | 96 |
| Tabla 6-4: Detalle estaciones TEM medidas. Sector Pampa Pantanillo | 96 |
| Tabla 6-5: Detalle estaciones Gravimétricas medidas. Sector Pampa Pantanillo | 97 |
| Tabla 8-1: Estimación de precipitación media anual y comparación con estudios previos..... | 112 |
| Tabla 8-2. Valores del coeficiente de infiltración (CI) en función de la permeabilidad cualitativa de las unidades litológicas | 114 |
| Tabla 8-3. Valores del recarga total estimados en las cuencas Alto-Andinas y comparación con estudios previos..... | 117 |
| Tabla 8-4. Valores del escorrentía total estimada en las cuencas Alto-Andinas y comparación con estudios previos..... | 119 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 8-5: Resumen balances hídricos por cuenca..... | 137 |
| Tabla 8-6: Resumen balances de oferta y demanda en las cuencas Alto-Andinas | 141 |
| Tabla 9-1: Superficie acuíferos saturados por cuenca | 144 |
| Tabla 9-2: Resumen conexiones laterales subterráneas inter-cuencas. | 147 |
| Tabla 10-1. Características técnicas de las tres alternativas de trasvase del estudio de DGA-Arcadis 2015 | 154 |
| Tabla 10-2. Costos del sistema de trasvase del estudio de DGA-Arcadis, 2015..... | 155 |
| Tabla 10-3. Rentabilidad de las tres alternativas de trasvase para escenario n°1 | 156 |
| Tabla 10-4. Características técnicas de la alternativa selección en comparación con otros estudios | 164 |
| Tabla 10-5. Precios unitarios considerados en el análisis económico | 165 |
| Tabla 10-6: Costos del sistema de trasvase DGA-Amphos 21 (2016) en comparación con otros estudios..... | 166 |
| Tabla 10-7. Rentabilidad de la alternativa de trasvase para el escenario 1 | 167 |
| Tabla 10-8. Rentabilidad de la alternativa de trasvase para el escenario 2 | 168 |
| Tabla 10-9. Rentabilidad de la alternativa de trasvase para el escenario 3 | 168 |

1. Introducción

1.1 Generalidades

El Altiplano o Puna es una región de América del Sur que comprende el Norte de Chile, el centro y Sur del Perú, la parte occidental de Bolivia y el noroeste de Argentina. Básicamente, son cuencas sedimentarias formadas en altura, en su mayoría sobre los 3.500 msnm, debido al tectonismo y a la actividad volcánica existente en estas latitudes.

Debido a la morfología de la zona (cuencas endorreicas en un clima de bastante aridez), se han formado numerosas lagunas y salares. Las precipitaciones en estas cuencas son de origen tropical, y ocurren durante el verano del hemisferio Sur, lo que es conocido como el "Invierno Boliviano" o "Invierno Altiplánico". Estas precipitaciones son de carácter convectivo, con una alta variabilidad espacial, y se concentran en los meses de enero y febrero. Este fenómeno desaparece más al Sur, teniendo una mínima influencia en la Región de Atacama.

En Chile, las principales actividades que se desarrollan en la zona de interés, son la minería y el turismo, así como también la ganadería y la agricultura por parte de los pueblos originarios.

Las cuencas alto-andinas de la Región de Atacama tienen una gran demanda sobre el recurso hídrico que ellas generan. Esto, sumado a la escasa información hidrometeorológica que poseen, hace dificultosa la determinación de la disponibilidad hídrica.

El conocimiento de los procesos hidrogeológicos e hidrológicos que intervienen y determinan los flujos aprovechables de estos sistemas es un trabajo de largo plazo; no obstante, el incremento de la demanda de agua (compañías mineras principalmente, y en menor grado ganadería y agricultura de los pueblos originarios) implica la búsqueda de soluciones de corto a mediano plazo, que a partir de la información disponible y en forma razonable, se pueda hacer cargo de la evaluación hidrológica dentro de un cierto nivel de certidumbre.

1.2 Localización Geográfica

El área de estudio corresponde a las cuencas alto-andinas de la III Región de Atacama, las cuales limitan al Norte con la II 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, Tabla 1-1).

Advertencia: Las figuras de este trabajo que se refieren o relacionen con los límites de Chile no comprometen, en modo alguno, al Estado de Chile de acuerdo con el Art. 2º letra g) del D.F.L. N°83 del Ministerio de Relaciones Exteriores.

1.3 Antecedentes

Dentro de esta línea de trabajo, la DGA ha abordado diferentes estudios que han permitido una metodología ágil y robusta para la estimación de las recargas que se producen en el altiplano y en la precordillera del Norte de Chile los cuales fueron abordados, parcialmente, en la Fase 1 y 2 de este proyecto.

En la Fase 1, DGA-Aquaterra Ingenieros Limitada (2013) apuntó a la disponibilidad de recursos hídricos en algunas cuencas, pero también se determinó que no es posible validar esta disponibilidad debido a la falta de información hidrométrica e hidrogeológica.

En la 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.

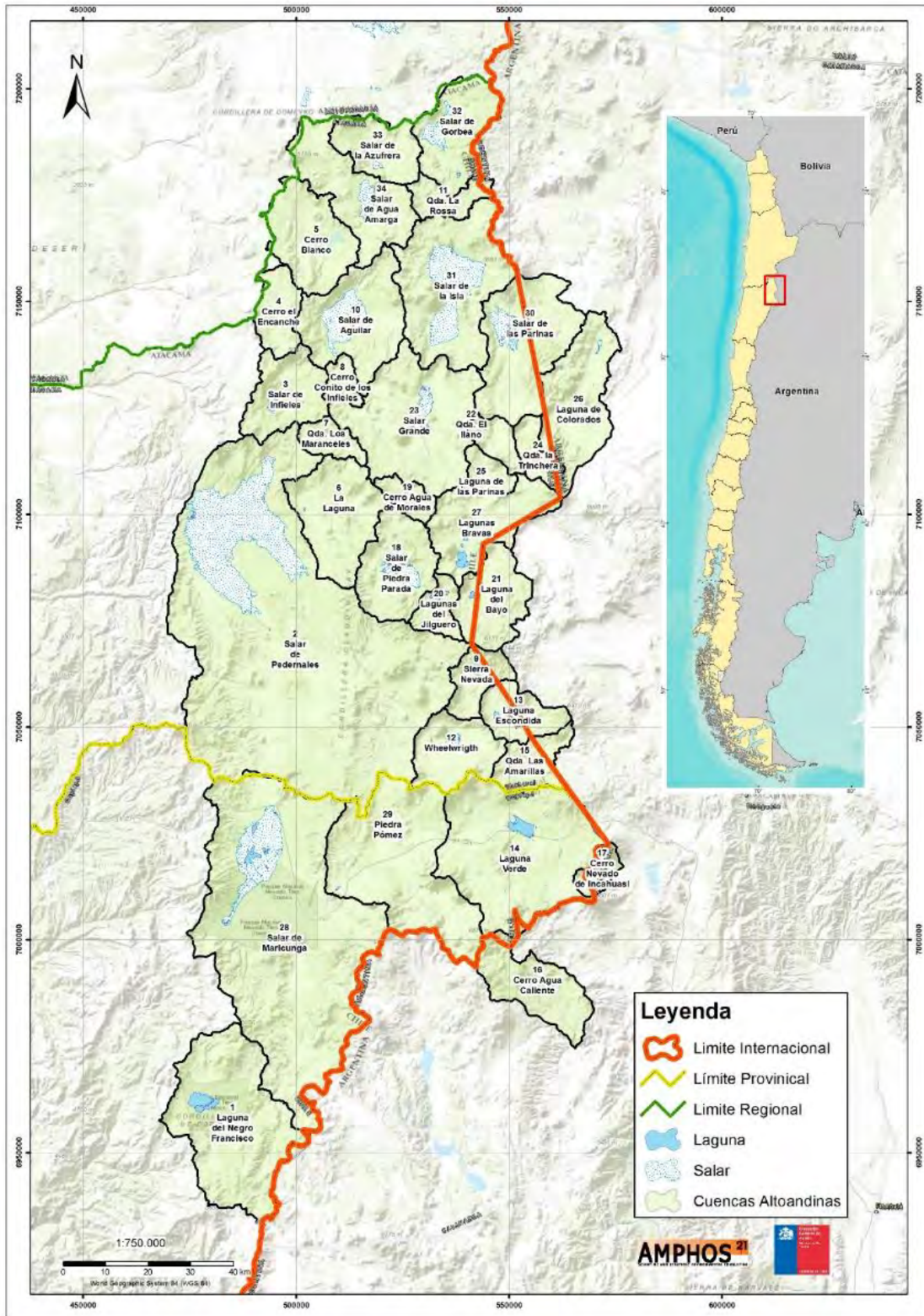


Figura 1-1: Ubicación geográfica del área de estudio.

Tabla 1-1: Número, nombre y superficie de la cuenca

| Nº CUENCA | NOMBRE CUENCA | SUPERFICIE CUENCA [km²] |
|------------------|------------------------------|---|
| 1 | Laguna del Negro Francisco | 905,4 |
| 2 | Salar de Pedernales | 3.592,3 |
| 3 | Salar de Infieles | 304,6 |
| 4 | Cerro el Encanche | 176,3 |
| 5 | Cerro Blanco | 379,3 |
| 6 | La Laguna | 456,9 |
| 7 | Qda. Los Maranceles | 107,1 |
| 8 | Cerro Conito de los Infieles | 76,3 |
| 9 | Sierra Nevada | 141,8 |
| 10 | Salar de Aguilar | 513,9 |
| 11 | Qda. La Rossa | 128,9 |
| 12 | Wheelwrigth | 292,3 |
| 13 | Laguna Escondida | 217,2 |
| 14 | Laguna Verde | 1.001,8 |
| 15 | Qda. Las Amarillas | 183,6 |
| 16 | Cerro Agua Caliente | 344,54 |
| 17 | Cerro Nevado de Incahuasi | 78,81 |
| 18 | Salar de Piedra Parada | 380,6 |
| 19 | Cerro Agua de Morales | 89,4 |
| 20 | Lagunas del Jilguero | 112,9 |
| 21 | Laguna del Bayo | 317,1 |
| 22 | Qda. El llano | 104,2 |
| 23 | Salar Grande | 781,1 |
| 24 | Qda. la Trinchera | 111,8 |
| 25 | Laguna de las Parinas | 95,6 |
| 26 | Laguna de Colorados | 408,1 |
| 27 | Lagunas Bravas | 410,07 |
| 28 | Salar de Maricunga | 2.208,77 |
| 29 | Piedra Pómez | 918,8 |
| 30 | Salar de las Parinas | 613,8 |
| 31 | Salar de la Isla | 736,4 |
| 32 | Salar de Gorbea | 363,8 |
| 33 | Salar de la Azufrera | 250,2 |
| 34 | Salar de Agua Amarga | 461,8 |

1.4 Objetivos y Alcance

1.4.1 Objetivo General

El objetivo general del estudio 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.

1.4.2 Objetivos Específicos

- ✓ Actualización de información hidrológica e hidrogeológica.
- ✓ Generación de nueva información hidro-meteorológica y geofísica.
- ✓ Determinación de balances hídricos de mayor detalle.
- ✓ Diseño conceptual y valoración preliminar de trasvase de agua entre cuencas alto-andinas y la cuenca del Río Copiapó.

1.5 Metodología de Trabajo

1.5.1 Estructura del Documento

Con el fin de lograr los objetivos mencionados en el capítulo anterior, el presente informe se ha estructurado de la siguiente manera:

- ✓ Un informe principal, único y común que contiene introducción, objetivos, metodología utilizada en cada uno de los apartados necesarios para la confección de los 34 modelos conceptuales hidrogeológicos, revisión de los antecedentes, trabajos de terreno e instrumentación instalada. Este informe recaba todo el trabajo realizado en las Fases anteriores (Fase 1 y Fase 2) complementándolo con la actual Fase 3. Adicionalmente, se incorpora un análisis de los aportes más relevantes realizados en este estudio en los capítulos principales (Geología, Geofísica, Hidrología, Hidrogeología y Modelos Conceptuales) finalizando con la factibilidad técnica y económica del trasvase.
- ✓ Un informe individual para cada una de las 34 cuencas que contiene toda la información recabada necesaria para lograr los objetivos recién expuestos.

1.5.2 Metodología

A continuación se expone la metodología de trabajo utilizada en las etapas llevadas a cabo durante la Fase 3 de este proyecto:

1.5.2.1 Actualización de la información hidrológica e hidrogeológica (Etapa I)

La recopilación y análisis de antecedentes realizada abarca la información hidrológica e hidrogeológica existente de las cuencas. Los trabajos efectuados consistieron en lo siguiente:

- Generación de una base de datos en Excel, la cual entrega información general acerca de las distintas áreas temáticas que aborda cada una de las referencias recabadas e incorporadas en este trabajo.
- Clasificación de los antecedentes según 8 áreas temáticas: Geología Regional y Local, Hidrología, Hidrogeología, Hidrogeoquímica, Geofísica, Puntos de agua y Parámetros Hidráulicos, Ecosistemas – Humedales y Demanda de Agua - Derechos de Aprovechamiento.
- Confección de Fichas Técnicas para cada uno de los nuevos antecedentes incorporados a este trabajo.
- Elaboración de un proyecto de Sistema de Información Geográfica (SIG) preliminar.

En cuanto a la revisión y valoración de la información se puede destacar:

- Recopilación, revisión y actualización de información geofísica, geología, hidrológica, hidroquímica e hidrogeológica.
- Revisión de la distribución espacial de los sondeos existente en la zona de estudio, corrigiendo y unificando el sistema de proyección geográfica de sus coordenadas.
- Revisión de la distribución espacial de los datos hidroquímicos e isotópicos, corrigiendo y unificando el sistema de proyección geográfica de sus coordenadas.

1.5.2.2 Trabajos de Terreno (Etapa II y Etapa IV)

Los trabajos de campo fueron planificados enfocándose en las siguientes etapas de desarrollo: hidrogeología, hidrología, geofísica e hidroquímica. Se realizaron dos campañas

de terreno, cuyos detalles se presentan en el apartado 3-Trabajos de Terreno (Etapas II y IV, Fase 3).

✓ Medición de niveles de agua

Se midieron más de 75 niveles piezométricos en las zonas más relevantes de las cuencas alto-andinas en cada uno de los dos terrenos. Además, se recopiló la información disponible de niveles de agua en estudios previos. La información recabada fue fundamental para la elaboración del mapa de isopiezas.

✓ Campaña de muestreo hidroquímico e isotópico

Se muestrearon 35 puntos para análisis hidroquímico e isotópico en cada una de las campañas de terreno, distribuidos a lo largo de toda el área de estudio. Además, se recopiló la información de calidad de agua disponible en estudios previos. El resultado del análisis químico obtenido en las muestras recolectada por Amphos 21 se ha validado previamente con el balance iónico.

✓ Instalación de sensores hidrométricos

Se instalaron 7 lisímetros distribuidos en la cuenca Salar de la Isla (3) y Salar Grande (4), además de 1 estación meteorológica integrada a uno de los lisímetros (ISL-1), cada uno con sus respectivos cercos de protección.

✓ Geofísica

Se realizaron prospecciones geofísicas mediante métodos TEM y gravimétricos en los sectores Salar de Maricunga y Pampa Pantanillo.

1.5.2.3 Modelo Conceptual Hidrogeológico (Etapa III y Etapa IV)

A partir de la interpretación de los datos obtenidos en la campaña de terreno sumado con la información existente, referente al contexto geológico, hidrológico, hidrogeológico, geofísico e hidrogeoquímico, se elaboró el modelo conceptual hidrogeológico para cada una de las 34 cuencas de estudio los cuales se presentan en el Anexo 6.5.

En cada modelo se han definido las unidades hidrogeológicas, se ha determinado el flujo subterráneo, la recarga y se ha evaluado la calidad de las aguas subterráneas:

1. Valoración e interpretación de la información geofísica: A partir de la revisión y valoración de la información geofísica existente, se han recopilado los sondeos próximos a los perfiles geofísicos y se ha realizado una valoración y calibración de la

información con la finalidad de corroborar las unidades litológicas que conforman la cuenca y además poder interpretar los perfiles.

2. Límites y geometría del acuífero saturado: Los límites y geometría del acuífero saturado se han definido en base a la geofísica y sondajes. Se ha observado que gran parte de las cuencas no disponen de suficiente información hidrogeológica por lo que se han utilizado métodos indirectos como imágenes satelitales apoyadas en el reconocimiento en terreno.
3. Caracterización de acuíferos principales: La caracterización del acuífero consistió en la revisión de los antecedentes disponibles y una interpretación hidrogeológica en base a las columnas litológicas, antecedentes hidrogeológicos, geofísica, niveles de agua y ensayos de bombeo en aquellas cuencas que contaban con tal información.
4. Áreas de recarga y descarga: Se realizó una definición de las áreas de recarga y descarga en la cuenca, tomando como eje principal las observaciones y mediciones realizadas en terreno, acoplando esta información al análisis hidrológico e hidrogeológico junto a la revisión de antecedentes.
5. Piezometría y dirección de flujo: Para la elaboración del mapa de isopiezas, se ha llevado a cabo un inventario de puntos de control piezométrico, así como de la documentación existente en trabajos anteriores.
6. Tratamiento de datos de hidroquímica e isótopos: Para facilitar el tratamiento de los datos y la compilación de toda la información de hidroquímica se ha construido una base de datos en Access. Esta base de datos compila la información hidroquímica generada en la actual Fase 3 del proyecto y los datos pertenecientes a proyectos anteriores disponibles en formato digital.

La información incorporada en la base de datos es la siguiente: 363 datos de química procedentes de la recopilación realizada por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Pontificia Universidad Católica de Chile (DICTUC, 2009), que contiene información de SERNAGEOMIN hasta el año 2000 y datos obtenidos por Risacher et al., 1999. En el trabajo del DICTUC se re-nombraron las muestras recopiladas de antecedentes haciendo referencia al nombre original de la muestra y al proyecto de procedencia. Para llevar a cabo el análisis, se ha mantenido la nomenclatura propuesta por el DICTUC y se han clasificado y validado los datos presentando el balance iónico para cada muestra en la base de datos.

También, se han incorporado a la base de datos 367 datos de química procedentes del proyecto EIA Lobo Marte del año 2011. Se ha mantenido la nomenclatura original establecida para cada muestra y se han validado los datos de química mediante un balance iónico.

La base de datos también contiene la información parcial de las 58 muestras que fueron recolectadas por DGA-Arcadis en el proyecto "Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama, Fase 2" (2015). No obstante, sólo se han podido recuperar los datos de 14 de ellas.

Finalmente, se han añadido 70 muestras recolectadas por DGA-Amphos 21 en las dos campañas de terreno durante la Fase 3 de este proyecto, además de 15 analíticas facilitadas por la empresa GoldFields.

1.5.2.4 Balance hídrico y factibilidad técnica de trasvase (Etapa IV)

Para realizar el modelo conceptual hidrogeológico se ha realizado el balance hídrico de cada una de las 34 cuencas Alto-Andinas, se ha seguido la metodología que se describe a continuación y que explica con un mayor nivel de detalle en el capítulo Hidrología:

1. Análisis hidrológico: Esta sección contempla la cuantificación de las entradas y salidas del sistema a partir de herramientas hidrológicas, junto con la interacción entre estas y el suelo. En este sentido, se destacan cuatro etapas:

- i) Análisis de la precipitación: En la zona de estudio, la precipitación constituye el único aporte de agua al sistema (DGA-Aquaterra, 2013; DGA-Arcadis, 2015). Además, la carencia de estaciones meteorológicas en la zona de interés dificulta la estimación de esta variable. Por lo tanto, para estimar la precipitación media anual en cada una de las cuencas Alto-Andinas, se ha utilizado el método de Isoyetas a partir de registros meteorológicos en cuencas cercanas, y los resultados de cada una de las cuencas se han comparado con estudios anteriores en el sector (DGA, 1987; DICTUC, 2009; DGA-Aquaterra, 2013; DGA-Arcadis, 2015). El detalle de la metodología del análisis de la precipitación se describe en profundidad en cada uno de los 34 informes individuales y en el apartado 5 del presente informe.
- ii) Estimación de la recarga: A partir de la precipitación media anual obtenida y siguiendo la metodología propuesta por DICTUC (2009), se ha estimado la recarga total de los acuíferos. Dicha recarga, se compone por la "recarga directa", dada por la precipitación sobre suelo permeable que conduce agua de forma directa al

acuífero, y por la "recarga lateral", que corresponde a la precipitación sobre zonas no acuíferas que luego de escurrir se infiltra en zonas de mayor permeabilidad. Para estimar estas dos componentes, ha sido necesario estimar los coeficientes de escorrentía e infiltración tanto para las zonas acuíferas como no acuíferas, lo cual se ha realizado en base a la información litológica y geomorfológica disponible. Para validez de los resultados, estos se han comparado con los obtenidos de estudios anteriores en la zona de estudio (DICTUC, 2005; DGA-Aquaterra, 2013; DARH, 2009; DICTUC, 2009).

- iii) Estimación de la escorrentía: La escorrentía superficial en las cuencas Alto-Andinas se debe a la fracción de la precipitación sobre la cuenca que no se ha infiltrado en las zonas permeables. Para su estimación, se ha utilizado el método de precipitación-escorrentía descrito por DGA-Aquaterra (2013) que es el mismo usado por DICTUC (2009), el cual permite estimar la escorrentía media anual a partir de la precipitación media anual, el área lateral (no acuífera) y un coeficiente de escorrentía que depende de parámetros geomorfológicos de la cuenca (longitud del cauce principal, área aportante, factor de forma de la cuenca, etc.), los cuales fueron determinados a partir del software ArcGIS versión 10.3. La escorrentía media anual estimada en cada cuenca se ha comparado con resultados obtenidos por estudios de la DGA (2012) y DGA-Aquaterra (2013).
 - iv) Balance hidrometeorológico: Esta etapa corresponde al balance de agua en el suelo y tiene por objetivo explicar el funcionamiento e interacción de las precipitaciones con el suelo mediante un balance de masa de agua. Para ello, se tomaron en cuenta todas las variables de las etapas anteriores (i, ii, iii) que constituyen entradas y salidas del sistema, en particular, precipitaciones, recarga, evapotranspiración y escorrentía superficial.
- 2. Cuantificación de la evaporación directa:** En la zona de interés, la escasez de cubierta vegetal en el suelo, provoca que la evaporación desde la napa freática sea importante de 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, los cuales permiten estimar la tasa de evaporación a partir de la profundidad del nivel freático. La metodología utilizada para el procesamiento de la información se describe detalladamente en el capítulo de Hidrología.

3. **Demanda de agua antrópica:** El análisis de la situación actual de la demanda se ha realizado a partir del catastro de Derechos de Aprovechamiento de Aguas (DAA) facilitados por la Dirección General de Aguas (DGA) el 22 de julio de 2016, para cada una de las cuencas. En dicho catastro se han identificado el caudal total otorgado en cada cuenca (superficial y subterráneo), así como la cantidad derechos otorgados, año de otorgamiento, usuarios y solicitudes que están pendientes de autorización.
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.

Es importante destacar que los balances realizados son preliminares debido a la falta de información y a la incertidumbre existente en la estimación de cada una de las variables hidrogeológicas involucradas en el balance.

5. **5. Oferta y Demanda Hídrica:** El balance de oferta y demanda se ha realizado a partir de los derechos de aprovechamiento de aguas o demanda antrópica (otorgados y pendientes) y las entradas de agua al sistema (recarga y escorrentía). Sin embargo, dado que se desconoce si efectivamente si los derechos están siendo bombeados y cuánto es el caudal de extracción se ha considerado un factor de uso entre 0,7 y 0,9%, cuyas estimaciones se corresponden con los escenarios de usos considerados en la DGA sobre la zona de estudio en términos globales, ya que no se estaría ejerciendo el 100% de los derechos con el máximo caudal permitido. Respecto, a las entradas (ofertas) han sido consideradas de los resultados del balance hídrico de cada cuenca en régimen natural o estacionario. La diferencia entre la oferta y demanda de agua permite dilucidar si la cuenca presenta un déficit o un superávit.

1.5.2.5 Creación de base de datos y proyecto SIG

Para facilitar la comprensión de toda la información de interés disponible, se ha diseñado un proyecto SIG (Sistema de Información Geográfica - Anexo 7).

En la ejecución del proyecto SIG, se realizó una recopilación de una variada gama de capas vectoriales y/o raster las cuales fueron integradas en una Geodatabase, contribuyendo al orden y clasificación de toda la información ligada al estudio.

Para todo el proyecto, se ocupó el programa Arcgis 10.3 obteniendo la recopilación, reclasificación y utilización de los datos para los distintos productos que se integraron en el proyecto, ya sea análisis de información, construcción de datos, formulación de cartografías, evaluación de fichas, etc. Todas las capas que se trabajaron están en Datum WGS 84, Huso 19 sur, para así conllevar una línea de información unificada a un sistema de posición geográfica.

1.6 Descripción de Anexos

A continuación se describe, brevemente, en qué consiste y qué contiene cada uno de los anexos incorporados a este trabajo.

1.6.1 Anexo 1: Figuras

Se adjuntan todas las figuras que han sido elaboradas en esta Fase 3 del proyecto e incorporadas a cada uno de los informes individuales así como al presente Informe Principal. Corresponden a figuras de buena resolución (300 dpi) que han sido divididas en las siguientes temáticas:

- Informe Principal
- Geología
- Geofísica
- Hidroquímica
- Piezometría
- Cartografía de suelos

1.6.2 Anexo 2: Catastro de Pozos

Se incluye una tabla Excel con el inventario final de todos los puntos de agua (pozos y piezómetros) catastrados durante este proyecto. Los puntos han sido ordenados por cuenca y se detallan aspectos técnicos tales como nivel de agua, caudal de derechos, profundidad del pozo, profundidad de habilitación del pozo, diámetro de habilitación, entre otros.

1.6.3 Anexo 3: Columnas litológicas y expedientes

En este anexo se incluyen todas las columnas estratigráficas recabadas durante este proyecto. Se presentan ordenadas por cuenca.

Adicionalmente, se incluyen algunas pruebas hidráulicas y expedientes de donde fueron obtenidas las columnas.

1.6.4 Anexo 4: Geofísica Fase 3

Se adjunta el informe final de la geofísica realizada en esta fase del proyecto, elaborado por Geodatos. Además, se incluyen tres archivos kmz con la distribución de las estaciones y perfiles de cada sector: TEM Maricunga, TEM Pampa Pantanillo, Gravimetría Pampa Pantanillo.

1.6.5 Anexo 5: Hidroquímica

Este anexo se subdivide en dos:

- 5.1 Inventario Hidroquímica total: Se presenta un archivo Excel con el inventario final de los puntos donde se han realizado análisis químicos tanto históricos como de esta Fase 3. Estos puntos han sido ordenados por cuenca y presentan información sobre el tipo de punto (manantial, superficial, pozos, etc.) y el tipo de análisis químico que se ha realizado. Cabe notar que solamente una fracción del total de puntos se ha añadido a la base de datos utilizada para el análisis hidroquímico de los informes individuales, debido a que no siempre se dispuso de la analítica en concreto, sino que solamente la ubicación geográfica del muestreo.
- Base de datos para informes: Corresponde a la base de datos utilizada para realizar todo el análisis y gráficos de hidroquímica e isótopos de los informes individuales.

1.6.6 Anexo 6: Hidrología, hidrogeología y balance

Este anexo se subdivide en tres:

- 6.1 Lisímetros y evaporación directa: Se presenta el informe de Ingeniería y Proyectos con las especificaciones técnicas de los sensores hidrométricos instalados en la Fase 3. Adicionalmente, se adjunta la interpretación de los datos recabados de los lisímetros instalados durante la Fase 2 de este proyecto y las fichas técnicas de todos los lisímetros instalados.

- 6.2 Análisis de precipitación: Análisis de precipitación por diferentes métodos, cálculo de la esorrentía y recarga. Red de estaciones meteorológicas.
- 6.3 Análisis de derechos de agua: Se presentan los derechos concedidos y en trámite de las diferentes cuencas de estudio.
- 6.4 Balance hídrico. Se presenta un resumen del balance hídrico de las 34 cuencas Alto-Andinas analizadas donde se cuantifican las principales entradas y salidas del sistema.
- 6.5. Síntesis Modelos Conceptuales. Se explica una síntesis de los modelos conceptuales de cada una de las 34 cuencas Alto-Andinas analizadas.

1.6.7 Anexo 7: Base de datos y proyecto SIG

Se presenta toda la información referente al proyecto SIG de la Fase 3, el que incluye tanto información histórica recopilada como antecedentes de las Fases previas.

1.6.8 Anexo 8: Bibliografía y Referencias

Este anexo se subdivide en tres:

- 8.1 Base de Datos Referencias: Consiste en un archivo Excel donde se ordenó toda la información disponible en la pestaña "BBDD Referencias". Los antecedentes recabados, previamente, por DGA-Aquaterra en la Fase 1 corresponden a las referencias 1 a la 39, mientras que las referencias 40 a la 100, destacadas en color anaranjado; a las incorporadas en este trabajo. Por otro lado, se identificaron y definieron áreas temáticas relevantes que permiten tener un conocimiento general de la información que contiene cada uno de los documentos referenciados. En este contexto, se utilizó una letra "x" minúscula para indicar la mera presencia de esa información; una "X" mayúscula para indicar una mayor abundancia de información y una "X" mayúscula, destacada en amarillo claro, para indicar una de las 8 áreas temáticas en la cual fue, finalmente, clasificada la referencia en cuestión. Adicionalmente, aquellas referencias que poseen o son parte de Mapas, Planos o Cartas Geológicas/Hidrogeológicas se presentan destacadas en un color verdoso para facilitar la búsqueda de esta información extra.
- 8.2 Áreas temáticas: Se presenta toda la información recopilada, agrupada y clasificada según su área temática. Por otro lado, cada una de las referencias de

la base de datos (A8.1) fue clasificada según el área temática predominante. Las 8 áreas temáticas definidas en este trabajo son: geología regional y local, hidrología, hidrogeología, hidrogeoquímica, geofísica, puntos de agua y parámetros hidráulicos, ecosistemas-humedales, demanda de agua-derechos de aprovechamiento.

- 8.3 Fichas técnicas: Resume la información más relevante de la referencia correspondiente.

2. Actualización de la información hidrológica e hidrogeológica (Etapa I, Fase 3)

2.1 Objetivos y alcance

El objetivo del capítulo es recopilar y analizar los antecedentes recabados en las Fases 1 y 2, así como incorporar nueva información disponible en el área de estudio. Esta tarea resultó crítica para profundizar en la evaluación de los recursos hídricos disponibles en las cuencas alto-andinas de la Región de Atacama.

La metodología general utilizada para esta actividad ya fue expuesta en el apartado 1.5.2.1 Actualización de la información hidrológica e hidrogeológica (Etapa I).

2.2 Base de datos Antecedentes

Se elaboró una base de datos en Excel, en la cual se ordenó la información disponible en la pestaña "BBDD Referencias". Corresponde al Anexo 8 (A8.1) de este informe. Los antecedentes recabados, previamente, por DGA-Aquaterra en la Fase 1 corresponden a las referencias 1 a la 39, mientras que las referencias 40 a la 100, destacadas en color anaranjado; a las incorporadas en este trabajo.

Por otro lado, se identificaron y definieron áreas temáticas relevantes que permiten tener un conocimiento general de la información que contiene cada uno de los documentos referenciados. En este contexto, se utilizó una letra "x" minúscula para indicar la mera presencia de esa información; una "X" mayúscula para indicar una mayor abundancia de información y una "X" mayúscula, destacada en amarillo claro, para indicar una de las 8 áreas temáticas en la cual fue, finalmente, clasificada la referencia en cuestión.

Adicionalmente, aquellas referencias que poseen o son parte de Mapas, Planos o Cartas Geológicas/Hidrogeológicas se presentan destacadas en un color verdoso para facilitar la búsqueda de esta información extra.

De manera complementaria, se agregaron 3 pestañas que detallan la información contenida en las Ref. 42, Ref. 43 y Ref. 75, lo que facilita la búsqueda o lectura de los antecedentes dentro de éstas.

2.3 Áreas temáticas

Las áreas temáticas presentadas en esta sección se proponen para facilitar la elaboración de un balance hídrico, un modelo hidrogeológico y un inventario de puntos de agua representativo de las cuencas alto-andinas en las etapas siguientes del proyecto. Corresponde al Anexo 8 (A8.2): "Áreas Temáticas", que agrupa la información por área temática, de manera general, sin considerar a qué cuenca corresponde. Esto permitirá tener un acceso expedito y ordenado a los antecedentes a nivel proyecto.

Por otro lado, cada una de las referencias de la base de datos (A8.1) fue clasificada según el área temática predominante. Sin embargo, esto no implica que la información sea exclusivamente de esa temática, pues hay documentos que contienen más de un tipo de ésta. Por la misma razón, la base de datos (A8.1) entrega una visualización generalizada del tipo de información contenida en cada uno de los documentos referenciados.

Las 8 áreas temáticas definidas en este trabajo se detallan a continuación:

- **Geología Regional y Local.** Corresponde a la información geológica regional y local de superficie presentada en mapas geológicos.
- **Hidrología.** Comprende la información disponible en lo referente a datos hídricos y meteorológicos (climatológicos, caudales de las quebradas, evaporación, etc.) así como su distribución espacial y temporal.
- **Hidrogeología.** Incluye varios estudios hidrogeológicos así como modelos numéricos de las cuencas. Algunas temáticas corresponden a recursos hídricos, aguas subterráneas y balances hídricos totales.
- **Hidrogeoquímica.** Comprende información geoquímica, hidroquímica e isotópica de aguas de las cuencas alto-andinas.
- **Geofísica.** Incluye datos gravimétricos, sísmicos y TEM de la zona de estudio.
- **Puntos de agua (vertientes, pozos y otros) y Parámetros Hidráulicos.** Reúne información sobre catastros, pruebas de bombeo, parámetros hidráulicos y fichas técnicas de los puntos de agua (predominantemente pozos) realizados en la zona de estudio.

- **Ecosistemas – Humedales.** Corresponde a información relacionada con sistemas vegetacionales y caracterización de humedales en la zona del proyecto.
- **Demanda de Agua – Derechos de Aprovechamiento.** Incluye datos relacionados con la estimación de demandas de agua, derechos de aprovechamiento, proyecciones futuras y áreas de restricción de aprovechamiento hídrico.

2.4 Revisión y valoración de la información

En el presente apartado se lleva a cabo una revisión y valoración de la información en términos de las 8 categorías definidas en este informe apuntando a realizar un análisis acabado de ésta para cada una de las 34 cuencas.

2.4.1 Geología

La recopilación se ha llevado a cabo a partir de tres fuentes de información, la generada por SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minera – Chile), SEGEMAR (Servicio Geológico Minero Argentino) y la proporcionada, en la Fase 1, por DGA-Aquaterra (2013).

En relación a la información aportada por DGA-Aquaterra, se han recopilado 9 mapas geológicos, cuya escala se explicita de forma gráfica en cada uno de ellos. El detalle es el que sigue:

- Mapa Geológico Cuenca N°1: Laguna del Negro Francisco
- Mapa Geológico Cuenca N°2: Salar de Pedernales.
- Mapa Geológico Cuenca N°6: La Laguna.
- Mapa Geológico Cuenca N°14: Laguna Verde.
- Mapa Geológico Cuenca N°28: Salar de Maricunga.
- Mapa Geológico Cuenca N°29: Piedra Pómez.
- Mapa Geológico Cuenca N°32: Salar de Gorbea.
- Mapa Geológico Cuenca N°33: Salar de la Azufrera.
- Mapa Geológico Cuenca N°34: Salar de Agua Amarga.

En cuanto a la información generada por el SERNAGEOMIN, se han recopilado los levantamientos geológicos del área de estudio a diferentes escalas, que se detallan a continuación:

- Geología del Salar de Maricunga, Región de Atacama, escala 1:50.000, elaborado por Tassara, A., en 1997.
- Hoja Salar de Maricunga escala 1:100.000, elaborada por Cornejo, P., Mpodozis, C. y Tomlinson, A. en 1998.
- Mapa geológico del área del Salar de Wheelwright, Región de Atacama, Escala 1:100.000, elaborada por Clavero, J.; Mpodozis, C.; Gardeweg, M., en 1997. Versión preliminar.
- Geología de las áreas Laguna Wheelwright y Paso San Francisco, Región de Atacama, escala 1:100.000. Elaborado por Clavero, J.; Mpodozis, C.; Gardeweg, M.; Valenzuela, M., en 2012.
- Mapa geológico preliminar del área del Salar de Piedra Parada, región de Atacama, escala 1:100.000. Elaborado por Clavero, J.; Gardeweg, M.; Mpodozis, C., en 1998.
- Geología de la Hoja Laguna del Negro Francisco, Región de Atacama. Mapa escala 1:100.000. Elaborada por Mercado, M., en 1982.
- Hoja Potrerillos, Región de Atacama, escala 1:100.000. Elaborada por Tomlinson, A.; Cornejo, P.; Mpodozis, C., en 1999.
- Geología de las hojas Copiapó y Ojos del Salado, escala 1:250.000. Elaborada por Segerstrom, K., en 1968.
- Avance Geológico de las Hojas Chañaral y Potrerillos, escala 1:250.000. Elaborada por Mercado, M., en 1997.
- Hojas TalTal y Chañaral, escala 1:250.000. Elaborada por Naranjo, J.; Puig, A., en 1984.
- Hoja Salar de la Isla, escala 1:250.000. Elaborada por Naranjo, J.; Cornejo, P. en 1992.
- Carta Laguna del Negro Francisco, escala 1:100.000. Elaborada por Iriarte, S.; Mpodozis, C.; Gardeweg, M.; Valenzuela, M. en 2012.
- Mapa Geológico de Chile, escala 1:1.000.000. Elaborada por SERNAGEOMIN, en 2002.

La información recopilada a partir de los mapas de SEGEMAR es la siguiente:

- Hoja Geológica 2769-II Paso de San Francisco, escala 1:250.000. Elaborada por Seggiaro, R.; Hongn, F.; Folguera, A.; Clavero, J. en 2000.
- Hoja Geológica 2569-IV Antofalla, escala 1:250.000. Elaborada por Seggiaro R.E., Becchio R., Schnurr W., Adelman D., Erpenstein K. en 2004.

Cabe mencionar que los mapas elaborados en la Fase 1 contemplan la totalidad de la información disponible en formato digital (SIG) por parte del SERNAGEOMIN en la zona de estudio. El resto de la información geológica corresponde a imágenes raster debidamente georreferenciadas.

2.4.2 Hidrología

En relación a la Hidrología, se tienen antecedentes de mapas de isotermas, isoyetas, isolíneas de evaporación, isolíneas de evapotranspiración e isolíneas de esorrentía, expresados como valores medios anuales, para las Regiones III y IV, abarcando el territorio nacional, entre las zonas costeras y las cuencas más altas de la Cordillera de los Andes (Ref.11).

Principalmente, se cuenta con los datos de los equipos hidrométricos instalados en la fase 2 del estudio. Tales equipos son: A) la **estación meteorológica DGA instalada en la Laguna Santa Rosa** (al sur del Parque Nacional Nevado Tres Cruces). Dicha estación cuenta con datos de radiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura, precipitación líquida/sólida y otras variables de interés para el estudio de la recarga en las cuencas Alto-Andinas. B) los **11 lisímetros instalados** en las cuencas Salar de Pedernales (3), Salar de Maricunga (4) y Laguna del Negro Francisco (3). Dichos instrumentos cuentan con datos de temperatura del aire, precipitación, profundidad del nivel freático, conductividad eléctrica y temperatura del agua subterránea, el nivel del agua en el estanque y presión atmosférica que permitirán medir la evaporación en función de la profundidad del nivel de agua subterránea en distintos tipos de suelos de la zona.

Se tiene información sobre la factibilidad de constituir nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, en la subcuenca Ciénaga Redonda de la Cuenca del Salar de Maricunga (Ref. 10).

Se dispone, también, de datos del 2009 de evaporación desde napas freáticas someras en las cuencas del Salar del Huasco, Laguna Tuyajto, Salar del Laco, Salar de Aguas Calientes, Salar de Pedernales y Salar de Maricunga (Ref. 59, Ref. 60).

En los trabajos de la DGA, enmarcados en el proyecto “Estimación de Recargas en Cuencas Altiplánicas y Precordilleranas de Vertiente Pacífica” (Ref.3-6), se cuenta con información actualizada hasta el 2011 sobre el conocimiento hidrológico de las cuencas altiplánicas.

Se dispone de información actualizada hasta el 2013 de las características hidrográficas, hidrológicas (fluviométricas) y de calidad de agua en el Altiplano de la Región de Atacama a partir de información recopilada y sistematizada en la Biblioteca Digital del Sistema SITHA (Ref. 25).

Finalmente, se cuenta con planos y figuras con información de la ubicación de estaciones pluviométricas, fluviométricas y evaporimétricas que existen en las cuencas alto-andinas. Éstas se enmarcan en el documento entregado en la Fase 1 de este proyecto por DGA-Aquaterra el 2013 (Ref. 56 y Ref. 76).

Con la información recopilada y el análisis de las referencias disponibles se puede concluir que:

- ✓ La distribución espacial de la información hidrológica es heterogénea y escasa para desarrollar un modelo hidrogeológico y establecer un balance hídrico de las cuencas alto-andinas. Las estaciones fluviométricas, pluviométricas, evaporimétricas y de temperatura están concentradas en la zona noroccidental y suroccidental de la zona de estudio. Las zonas centro y oriental no cuentan con información, lo que será considerado para las futuras campañas de terreno a realizar en las cuencas alto-andinas.

2.4.2.1 Tasas de recarga

Con el fin de disponer de información relevante en relación a la hidrología y recarga de la zona, se realizó un análisis de los antecedentes disponibles. Se revisaron los siguientes estudios:

- Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos en Cuencas de la Región de Atacama. DGA, 2009 (Ref. 1).
- Estudio Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III; SIT N° 157 (parte 1) y SIT N° 195 (parte 2)- DICTUC 2009 (Ref. 2).

- Estudio 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 – GCF Ingenieros Limitada 2010 (Ref. 3).
- Propuesta Metodológica para Estimación de Recarga en Cuencas Altiplánicas y de Vertiente Pacífico; Documento de Trabajo, Marzo 2010, Luis Rojas Badilla y Carlos Salazar M., DGA (Ref. 4).
- Estimación de Recargas en Cuencas Altiplánicas y Precordilleranas de Vertiente Pacífica, SIT N° 251, Aquaterra Ingenieros Ltda., Septiembre de 2011. Ref. 5
- Estimación de Recargas en Cuencas Altiplánicas, Región de Atacama, SDT N° 334, Diciembre de 2012 (Ref. 6).
- Estudio de Modelación Matemática Hidrogeológica Cuenca del Salar de Pedernales, CPH Consultores, 2004 (Ref. 35).
- Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama - Fase 1. Metodología. Aquaterra Ingenieros Ltda., 2013 (Ref. 75.1).

A modo resumen en el estudio de la Fase 1 (DGA-Aquaterra, 2013) se concluye que para las cuencas que se encuentran insertas en el altiplano y la cordillera de Los Andes, se indica que la principal fuente de recarga corresponde a las precipitaciones que se producen en los conos volcánicos que las rodean y que están formados por rocas del Mioceno con una permeabilidad y almacenamiento asociados a su fracturamiento, por lo que se estima que poseen un potencial hidrogeológico bajo a nulo. Dichas zonas sólo constituyen una zona de transferencia del agua subterránea hacia las zonas más bajas de la cuenca, donde se presentan rellenos de depósitos aluviales actuales (Cuaternarios) y depósitos evaporíticos (Salares), que corresponden a los sectores con mayor potencial hidrogeológico de estas cuencas.

La principal (si no la única) forma de descarga de estas cuencas es la evaporación, por lo que la calidad de las aguas empeora, debido al aumento de la concentración de sales a medida que se avanza desde la cabecera de las cuencas hacia las zonas bajas.

Se presenta la recarga por cuenca en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Recarga por cuenca. DGA-Aquaterra (2013)

| Nº | NOMBRE | AREA TOTAL (m ²) | UNIDADES DE ROCA (m ²) | DEPOS. NO CONSOLID. (m ²) | PP (mm) | CE | CI | RECARGA LATERAL (m ³ /s) | RECARGA DIRECTA (m ³ /s) | RECARGA TOTAL (m ³ /s) | RECARGA TOTAL (l/s) |
|----|----------------------------|------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|---------|------|-----|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| 1 | Salar de Gorbea | 363.811.403 | 314.105.530 | 49.705.872 | 135 | 0,13 | 0,3 | 0,05244056 | 0,0638346 | 0,1162751 | 116 |
| 2 | Salar de Azufrera | 250.170.225 | 215.377.934 | 34.792.290 | 135 | 0,13 | 0,3 | 0,03595779 | 0,04468188 | 0,080639 | 81 |
| 3 | Salar de Agua Amarga | 461.752.973 | 417.015.800 | 44.737.172 | 135 | 0,13 | 0,3 | 0,06962164 | 0,0574535 | 0,1270752 | 127 |
| 4 | Quebrada La Rosa | 128.895.951 | 121.394.751 | 7.501.200 | 125 | 0,13 | 0,3 | 0,01876584 | 0,00891981 | 0,0276856 | 28 |
| 5 | Cerro Blanco | 379.264.228 | 348.212.543 | 31.051.685 | 125 | 0,13 | 0,3 | 0,0538285 | 0,03692409 | 0,090572 | 91 |
| 6 | Cerro El Encanche | 176.331.055 | 169.806.717 | 6.524.338 | 125 | 0,13 | 0,3 | 0,0262496 | 0,0077582 | 0,0340078 | 34 |
| 7 | Salar de La Isla | 736.399.107 | 576.523.458 | 159.875.648 | 125 | 0,13 | 0,3 | 0,08912201 | 0,19011088 | 0,2792329 | 279 |
| 8 | Salar de Aguilar | 590.238.383 | 482.394.754 | 107.843.629 | 125 | 0,13 | 0,3 | 0,07457111 | 0,1282387 | 0,2028090 | 203 |
| 9 | Salar de Los Infieles | 304.625.270 | 284.688.042 | 19.937.227 | 125 | 0,13 | 0,3 | 0,0440085 | 0,0237077 | 0,0677162 | 68 |
| 10 | Salar de Las Parinas | 829.678.899 | 729.477.919 | 100.200.978 | 130 | 0,13 | 0,3 | 0,11727714 | 0,12391674 | 0,2411938 | 241 |
| 11 | Salar Grande | 781.104.342 | 686.847.105 | 94.257.237 | 130 | 0,13 | 0,3 | 0,1104234 | 0,1165662 | 0,2269897 | 227 |
| 12 | Queb. Los Maranceles | 107.058.251 | 103.011.289 | 4.046.961 | 125 | 0,13 | 0,3 | 0,015924 | 0,0048123 | 0,0207360 | 21 |
| 13 | Cerro Agua de Morales | 89.427.004 | 82.823.443 | 6.603.560 | 130 | 0,13 | 0,3 | 0,01331541 | 0,0081665 | 0,0214819 | 21 |
| 14 | La Laguna | 456.868.397 | 442.102.988 | 14.765.408 | 133 | 0,13 | 0,3 | 0,07271652 | 0,0186815 | 0,0913980 | 91 |
| 15 | Salar de Piedra Parada | 380.575.664 | 327.092.123 | 53.483.540 | 125 | 0,13 | 0,3 | 0,0505636 | 0,063598 | 0,1141618 | 114 |
| 16 | Laguna de Las Parinas | 95.591.130 | 84.192.916 | 11.398.213 | 130 | 0,13 | 0,3 | 0,01353558 | 0,01409596 | 0,02763155 | 28 |
| 17 | Lagunas Bravas | 408.031.501 | 374.564.518 | 33.466.982 | 130 | 0,13 | 0,3 | 0,06021823 | 0,04138801 | 0,10160624 | 102 |
| 18 | Laguna del Jilguero | 112.866.240 | 102.104.891 | 10.761.349 | 130 | 0,13 | 0,3 | 0,01641527 | 0,01330837 | 0,02972364 | 30 |
| 19 | Salar de Wheelwright | 292.265.222 | 243.637.582 | 48.627.639 | 130 | 0,13 | 0,3 | 0,03916928 | 0,0601369 | 0,09930618 | 99 |
| 20 | Laguna Verde | 1.001.738.788 | 862.776.759 | 138.962.028 | 150 | 0,13 | 0,3 | 0,160047 | 0,19829057 | 0,35833757 | 358 |
| 21 | Piedra Pómez | 918.736.915 | 863.396.947 | 55.339.968 | 150 | 0,13 | 0,3 | 0,1601621 | 0,07896685 | 0,23912895 | 239 |
| 22 | Salar de Maricunga | 2.194.515.505 | 1.608.614.376 | 585.901.128 | 160 | 0,13 | 0,3 | 0,31829508 | 0,89178254 | 1,21007762 | 1210 |
| 23 | Laguna del Negro Francisco | 905.325.615 | 758.595.235 | 146.730.379 | 150 | 0,13 | 0,3 | 0,14072115 | 0,20937554 | 0,35009669 | 350 |

La cuenca del Salar de Pedernales se presenta por separado debido a que la información disponible es más abundante.

Según DGA-Aquaterra (2013), se establece una recarga anual igual a 19.457.712 [m³/año], lo que equivale a 617 [l/s] en forma continua.

En la Tabla 2-2 y Tabla 2-3 se presentan los resultados de diferentes estudios.

Tabla 2-2: Resumen resultados estudio CPH (2001).

| Cuenca | Área (Km ²) | P media (mm) | ETP media (mm) | Rendimiento (mm) | Q (l/s) |
|---------------------------------|-------------------------|--------------|----------------|------------------|---------|
| Río La Ola en Embalse | 1118 | 43.0 | 29.5 | 13.5 | 478 |
| Río Juncalito en embalse La Ola | 773 | 47.5 | 30.5 | 17.0 | 417 |
| Quebrada Pedernales | 233 | 38.7 | 26.5 | 12.2 | 87 |
| Llano Pedernales | 233 | 36.4 | 27.8 | 8.5 | 63 |
| La Pampa | 160 | 37.1 | 26.0 | 11.1 | 56 |
| Colindante Salar | 321 | 38.3 | 26.3 | 12.0 | 122 |

Tabla 2-3: Salar de Pedernales, escorrentías y recargas medias (DGA, 2009).

| Banda de altura (msnm) | Unidad litológica | Tipo de recarga | Área (km ²) | PP. (mm) | Ce | Ci | Recarga (l/s) | Recarga (m ³ /año) |
|------------------------|--------------------------|-----------------|-------------------------|----------|------|------|---------------|-------------------------------|
| 3282-3500 | Dep. Sed. recientes | Directa | 69.8 | 95 | | 0.28 | 58.8 | 1854316.8 |
| | Rocas intrusivas | Lateral | 10.2 | | 0.13 | 0.04 | 0.16 | 5045.76 |
| | Dep. Sed. antiguos | Directa | 225.5 | | | 0.2 | 135.8 | 4282588.8 |
| | Rocas Sed. e ignimbritas | Lateral | 38.7 | | 0.13 | 0.12 | 1.8 | 56764.8 |
| | Salar, calizas | Lateral | 327.6 | | 0.13 | 0.08 | 10.2 | 321667.2 |
| | Ignimbritas | Directa | 2.5 | | | 0.16 | 1.2 | 37843.2 |
| 3500-4000 | Dep. Sed. recientes | Directa | 93.2 | 105 | | 0.28 | 86.8 | 2737324.8 |
| | Rocas intrusivas | Lateral | 157.7 | | 0.13 | 0.04 | 2.7 | 85147.2 |
| | Dep. Sed. antiguos | Directa | 125.7 | | | 0.2 | 83.7 | 2639563.2 |
| | Rocas Sed. e ignimbritas | Lateral | 301.5 | | 0.13 | 0.12 | 15.6 | 491961.6 |
| | Salar, calizas | Lateral | 12.8 | | 0.13 | 0.08 | 0.4 | 12614.4 |
| | Ignimbritas | Directa | 0.6 | | | 0.16 | 0.3 | 9460.8 |
| 4000-4500 | Dep. Sed. recientes | Directa | 4 | 120 | | 0.28 | 4.2 | 132451.2 |
| | Rocas intrusivas | Lateral | 16.4 | | 0.13 | 0.04 | 0.3 | 9460.8 |
| | Dep. Sed. antiguos | Directa | 10 | | | 0.2 | 7.6 | 239673.6 |
| | Rocas Sed. e ignimbritas | Lateral | 92.8 | | 0.13 | 0.12 | 5.5 | 173448 |
| | Salar, calizas | Lateral | 1.5 | | 0.13 | 0.08 | 0.06 | 1892.16 |
| 4500-5000 | Rocas intrusivas | Lateral | 2 | 133 | 0.13 | 0.04 | 0.04 | 1261.44 |
| | Rocas Sed. e ignimbritas | Lateral | 23.9 | | 0.13 | 0.12 | 1.6 | 50457.6 |
| 5000-5140 | Rocas Sed. e ignimbritas | Lateral | 0.9 | 142 | 0.13 | 0.12 | 0.06 | 1892.16 |
| TOTAL | | | 1517.3 | | | | 417 | 13150512 |

2.4.3 Hidrogeología

Los primeros trabajos datan de 1970 donde se realiza el primer estudio de la génesis de los salares y lagunas del altiplano chileno desde un punto de vista hidrogeológico. En éste se apunta a la importancia del clima, el *background* geológico principalmente de volcanismo ácido, a la génesis de numerosas cuencas cerradas, las que permiten la acumulación de sedimentos y evaporitas las que constituyen salares y lagunas, entre otros (Ref. 31).

Luego, se ha diferenciado una primera etapa de investigación centrada en la Cuenca del Salar de Pedernales, que incluye los informes realizados entre los años 1973 y 1977. Éstos definen el modelo conceptual del sector norte de la cuenca, concretamente el funcionamiento hidráulico del Llano de Pedernales. Delimitan las primeras unidades hidrogeológicas, y aportan datos puntuales de recarga, descarga, calidad química del agua y almacenamiento.

Entre los años 1978 y 1997 se crea el primer modelo numérico de esta cuenca del que se tiene constancia, actualizado en años posteriores, con el que se evalúan los efectos de la explotación de las aguas subterráneas sobre el nivel estático regional, y se comienza la planificación de los trabajos de exploración en la zona sur de la cuenca, estableciendo nuevos sectores de interés para extracción de agua.

Entre los años 1997 y 2004, aunque se tienen evidencias de la existencia de algunos trabajos relevantes, especialmente relacionados con la caracterización hidrológica a nivel de cuenca, en el momento de la redacción de este informe no se dispone aún de esta información.

A partir del año 2004 y hasta la actualidad, se viene desarrollando una intensa caracterización de la Cuenca del Salar de Pedernales en el marco de explotación minera de la División El Salvador de CODELCO-Chile.

Por otro lado, se tiene cuantiosa información de las líneas base de proyectos mineros que cuentan con EIA en la zona de estudio (ubicaciones en Figura 4-11 de la Ref.75). Algunos de ellos incluyen apartados específicos de Hidrología e Hidrogeología.

Se han elaborado mapas hidrogeológicos a escala 1:100.000, por parte del SERNAGEOMIN, entre los que se incluyen el de la Cuenca Salar de Maricunga, Sector Ciénaga Redonda; la Cuenca Laguna del Negro Francisco, Cuenca del Salar de Pedernales, Cuenca Campo de Piedra Pómez – Laguna Verde (Ref. 32, Ref. 33, Ref. 34, Ref. 53).

Adicionalmente, se dispone información sobre el funcionamiento hidrogeológico de los sistemas alto-andinos, para lo cual se consideró un análisis a escala regional y otro a nivel local o sistemas pilotos, enmarcado en el proyecto "Estudio Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III" de la DGA, en los años 2008-2009 (Ref. 2)

Por último se tiene la información recabada por DGA-Aquaterra en la Fase 1 del proyecto "Diagnostico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto-Andinas" de la DGA (Ref. 75) utilizado como base para la actual recopilación y actualización de los antecedentes hidrogeológicos de la zona de estudio.

En cuanto al SIG, sólo se dispone de información de detalle de los cuatro mapas de la serie hidrogeológica escala 1:100.000. El resto de la información será cubierta por el Mapa Hidrogeológico de Chile.

A modo de conclusión, se puede decir que se dispone de bastante información general de la zona de estudio. Sin embargo, se debe complementar a nivel local de las subcuencas en las próximas campañas de terreno con el objetivo de establecer un modelo hidrogeológico y un balance hídrico total para la zona en cuestión.

2.4.4 Hidrogeoquímica

En esta sección se cuenta con información hidroquímica, geoquímica e isotópica de las aguas de la zona de estudio, basada en los estudios del DICTUC, 2009 (Ref. 2), Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas, 1999 (Ref. 7), Mapas Hidrogeológicos del SERNAGEOMIN (Ref. 32, Ref. 33, Ref. 34, Ref. 53), informes de EIA de proyectos mineros y el informe de la Fase 1 del 2013 realizado por DGA-Aquaterra (Ref.75).

Con la información recopilada y el análisis de la distribución espacial de los datos disponibles en el Plano 4-2, Ref. 75, se puede concluir que:

- ✓ Los puntos de muestreo de calidad química del agua no se distribuyen homogéneamente a lo largo de toda las cuencas. Las cuencas más orientales como la 9, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 24, 25, 26, prácticamente, carecen de datos químicos de agua. La información se concentra en las cuencas ubicadas al sur, así como en la zona occidental y más norte de la zona de estudio.
- ✓ Los análisis efectuados corresponden, mayoritariamente, a análisis de los parámetros físico-químicos, compuestos mayoritarios y minoritarios

(fundamentalmente metales pesados), análisis bacteriológicos y compuestos orgánicos. En menor medida, se cuenta con análisis isotópico.

Las futuras campañas de terreno deben apuntar a generar un inventario de muestras de aguas representativas y homogéneamente distribuidas para lograr el objetivo de realizar un modelo hidrogeológico y un balance hídrico en las cuencas alto-andinas.

2.4.5 Geofísica

La información geofísica disponible consta, principalmente, de perfiles TEM y, en menor medida, de perfiles sísmicos de refracción, resistividad eléctrica y gravimetría.

La información geofísica es escasa, siendo las cuencas de Maricunga (28), Piedra Pómez (29), Salar de Pedernales (2), La Laguna (6) aquellas que cuentan con algún tipo de información.

2.4.6 Puntos de agua (vertientes, pozos y otros) y Parámetros Hidráulicos

En esta sección se presenta información acerca de la ubicación, pruebas de bombeo, parámetros hidráulicos y columnas estratigráficas de los puntos de agua (esencialmente pozos) presentes en la zona de estudio.

En particular, en la pestaña Ref. 42 de la base de datos Excel, se entrega una descripción general de cada expediente recopilado por DGA-Aquaterra en la Fase 1 de este proyecto. Adicionalmente, se indica si la ficha técnica incorpora información complementaria, como por ejemplo datos químicos de agua, pruebas de bombeo, estratigrafía, información hidrogeológica e hidrológica, entre otras.

En el Plano 8-1 de la Ref. 75 se presenta la distribución espacial de los pozos existentes en la zona de estudio. A partir de éste se puede concluir que:

- ✓ La distribución espacial de los pozos no es homogénea en la zona de estudio. La información se concentra en las cuencas 2, 6, 11, 28, 29, 32, 33 y, en menor medida, en las cuencas 1, 5, 34. La presencia de pozos en la zona centro norte y más oriental es inexistente.

2.4.7 Ecosistemas – Humedales

La información que contiene esta área temática corresponde a la relacionada con sistemas vegetacionales y caracterización de humedales en la zona del proyecto.

En el informe elaborado por CIREN, 2013 (Ref. 24) se detalla la distribución de humedales alto-andinos ubicados sobre los 2.000 msnm de la Región de Atacama, representados en capas de información digital.

Por su parte, el Estudio de los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos del Altiplano, Ref. 28, consistió en ubicar, delimitar y caracterizar los sistemas vegetacionales azonales hídricos del altiplano chileno, generando una cartografía con base de datos, líneas bases de composición florística de vegas y bofedales de relevancias, entre otras.

La información aquí descrita es útil para el Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto-Andinas pues los humedales son la principal fuente de recarga de los acuíferos subterráneos, los cuales proveen de agua para el desarrollo de la ciudadanía y la industria en la región. También sustentan actividades productivas como el turismo de intereses especiales, la ganadería camélida, la agricultura y la minería. Además el recurso hídrico permite el desarrollo la Fauna, Flora y vegetación.

2.4.8 Demanda de Agua – Derechos de Aprovechamiento

En esta sección se clasificaron los datos referentes a estimaciones de demanda de agua, derechos de aprovechamiento, proyecciones futuras, disponibilidad de recursos hídricos y áreas de restricciones hidrogeológicas.

Se tiene información sobre los derechos de aprovechamiento de agua con que cuenta el sector minero nacional, el caudal de extracciones de agua empleado en las faenas mineras como agua fresca y la tasa de consumo unitario de agua fresca por proceso minero para las regiones centro-norte del país (de la VI Región hacia el norte) hasta el 2008 (Ref. 13).

Se detalla la situación hasta el año 2007 sobre proyecciones futuras de las demandas de agua para diferentes usos a nivel regional de diferentes cuencas y subcuencas en las Regiones I a IV (Ref. 12).

Por otro lado, la información acerca de la disponibilidad de recursos hídricos y áreas de restricciones hidrogeológicas se concentra en el Salar de Pedernales (Ref. 37, 38 y 39).

3. Trabajos de Terreno (Etapas II y IV, Fase 3)

Los trabajos de campo se han dividido en cuatro secciones: catastro de pozos y monitoreo de niveles piezométricos, muestreo hidroquímico e isotópico, instalación de sensores hidrométricos y prospección geofísica.

3.1 Catastro de pozos y monitoreo de niveles

Se efectuaron 2 campañas de terreno cuyo objetivo fue realizar un catastro *in situ* y monitoreo de niveles piezométricos en pozos y piezómetros en conjunto con un muestreo de aguas para un posterior análisis hidroquímico e isotópico.

Los trabajos se realizaron durante el año 2016 en las siguientes fechas:

- 1ª Campaña: 11 febrero al 16 de marzo.
- 2ª Campaña: 12 septiembre al 2 de octubre.

Se abarcó, prácticamente, la totalidad de las cuencas Alto-Andinas que presentaban pozos o piezómetros excluyendo aquellas ubicadas en Argentina. La distribución de los puntos catastrados/visitados junto con aquellos donde, efectivamente, se pudo medir el nivel de agua se presenta en la Tabla 3-1, Figura 3-1 y Figura 3-2.

Tabla 3-1: Resumen de puntos catastrados en ambas campañas de terreno

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

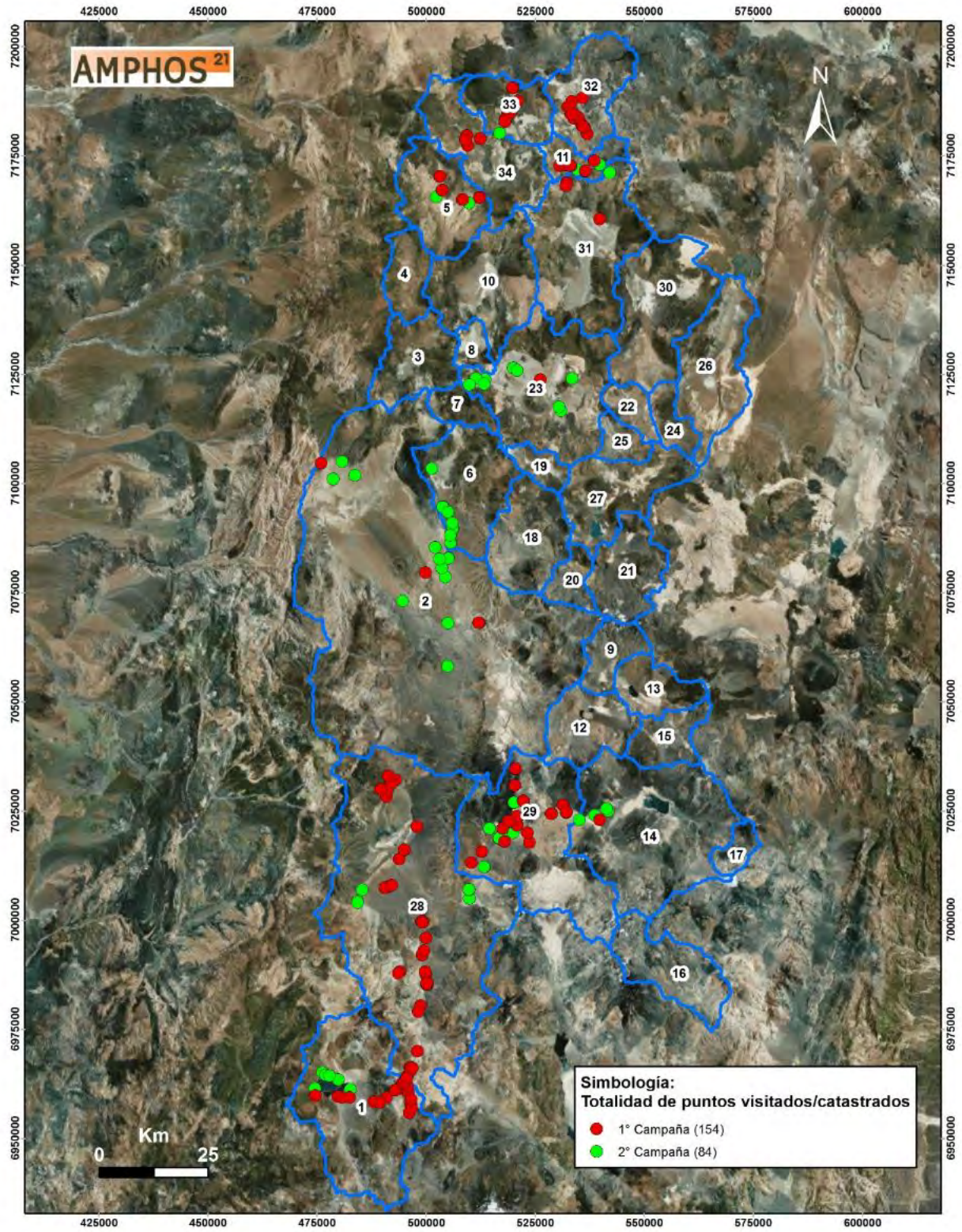


Figura 3-1: Distribución de puntos visitados/catastrados durante las campañas de terreno.

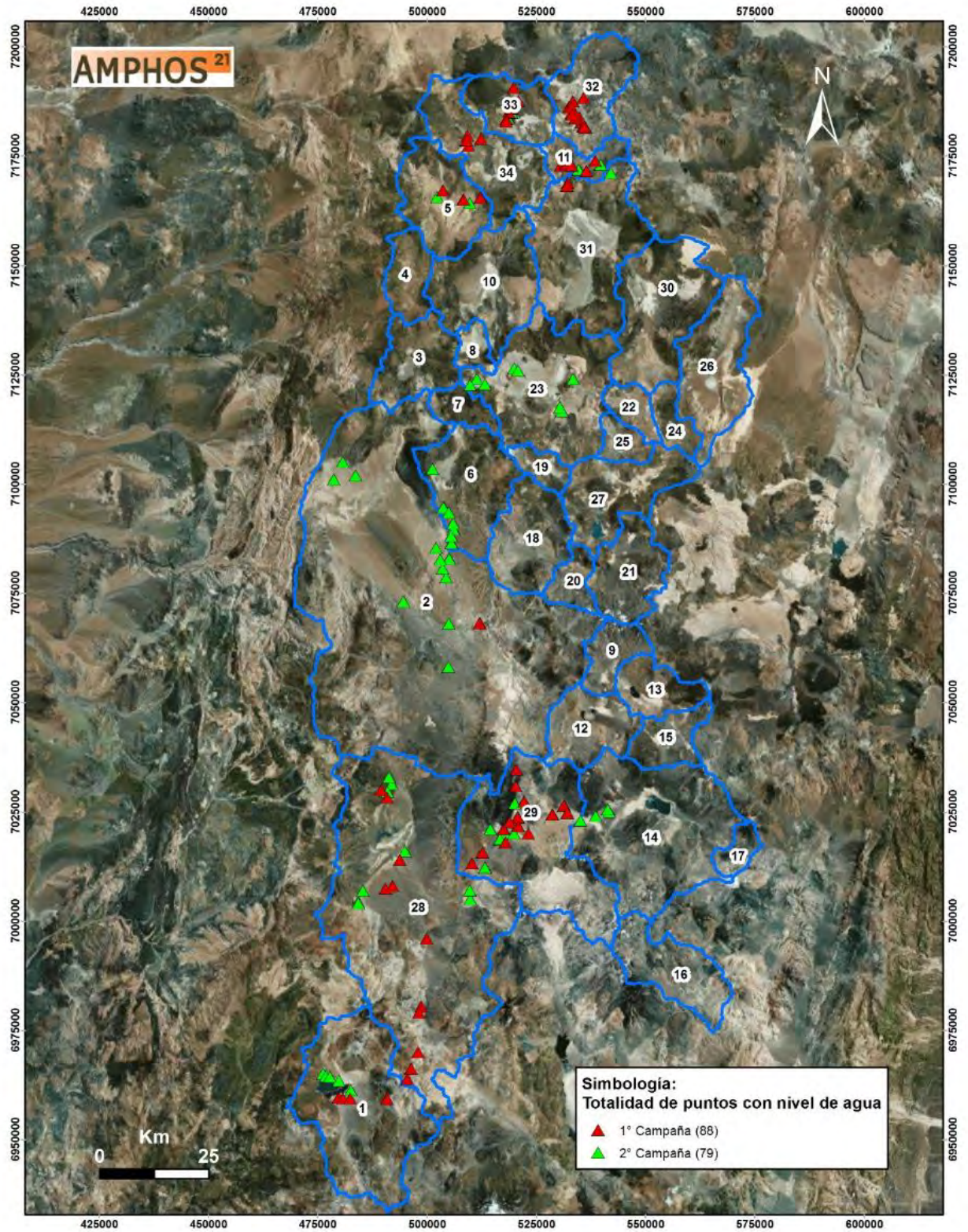


Figura 3-2: Distribución de puntos en los cuales fue posible medir nivel de agua.

3.2 Muestreo Hidroquímico e Isotópico

Las campañas de muestreo hidroquímico e isotópico se realizaron 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 $\delta^{18}O$ y δ^2H en cada una de las campañas, totalizando 70 muestras.

3.2.1 Metodología

Para cada una de las muestras se siguió la siguiente metodología:

- i. Buscar un lugar representativo para tomar la muestra.
- ii. Ambientar, a lo menos, 3 veces cada uno de los recipientes donde se almacena la muestra. En el caso de utilizar la jarra plástica para trasvasiar, también se debe ambientar.
- iii. Filtrar el agua de una de las botellas, previamente acidificada con HNO_3 por el laboratorio, la que se destinará a análisis de metales. El tamaño del filtro es de 0,45 micras.
- iv. Al momento de cerrar las botellas, cerciorarse de que no queden burbujas en su interior.
- v. Paralelamente, se toman los parámetros fisicoquímicos *in-situ* con la multiparamétrica.
- vi. Corroborar pH con tiras de pH.
- vii. Etiquetar las muestras con marcador permanente y envolver con scotch para asegurarse que no se borre.
- viii. Almacenar en la caja proporcionada por el laboratorio para mantener la cadena de frío.
- ix. Finalmente, todas las muestras deben estar adecuadamente presentadas, etiquetadas y refrigeradas hasta su entrega en el laboratorio, acompañadas de la cadena de custodia que será complementada y firmada por el técnico responsable a su recepción. Se conservará una copia de las cadenas de custodia firmadas y selladas por el laboratorio.

3.2.2 Equipamiento

El equipamiento utilizado en las campañas de muestreo hidroquímico e isotópico se presenta a continuación:

Equipamiento

- Envases plásticos para el muestreo.
- Caja de plumavit hermética, proporcionada por el laboratorio, dentro de la cual se mantiene la cadena de frío (con ice-packs), asegurándose de no superar una temperatura de 5°C durante el traslado.
- Multiparámetro HANNA modelo HI 9828 (conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, pH, total de sólidos disueltos y temperatura), el cual debe ser limpiado con agua destilada y piseta entre cada medición.
- Bailer.
- Jarras plásticas para trasvasijar.
- Agua destilada.
- Piseta.
- Cámara de fotos.
- Fichas para rellenar.
- GPS diferencial.
- Computador.
- Mapas de puntos de muestreo con caminos y red de drenaje.
- Procedimiento de muestreo impreso.
- Caja de herramientas.
- Sistema de filtración de policarbonato y bomba de vacío manual.
- Papel Filtro SARTORIUS, membrana nitrato de celulosa, 47mm, 0.45 µm.
- Botas de agua.

3.2.3 Ubicación Muestreo Hidroquímico e Isotópico

El origen de las muestras comprende pozos, manantiales (surgencias) y aguas superficiales (Tabla 3-2). En todos los puntos se registraron parámetros fisicoquímicos *in-situ* de CE (Conductividad Eléctrica), TDS (Solidos Disueltos Totales), pH (potencial de hidrogeniones) y T (temperatura).

Tabla 3-2: Tipo de puntos para muestreo hidroquímico e isotópico

| Tipo de Punto | 1ª Campaña | 2ª Campaña |
|---------------|----------------|------------|
| | Nº de muestras | |
| Manantial | 5 | 2 |
| Subterráneo | 7 | 11 |
| Superficial | 23 | 22 |
| <u>Total</u> | 35 | 35 |

La ubicación de las muestras se presenta en la Figura 3-3. En ésta se observa una distribución homogénea en toda la zona de estudio.

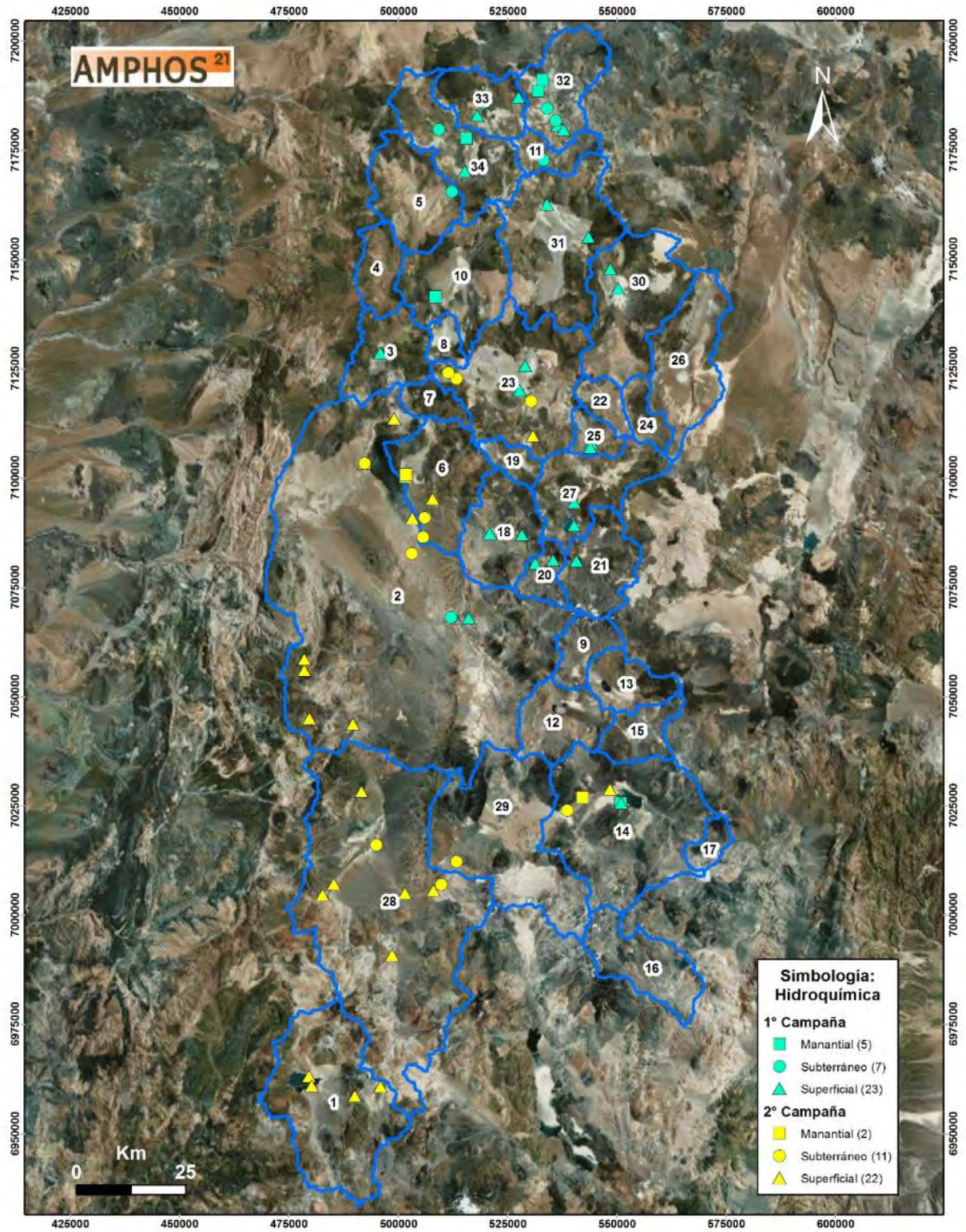


Figura 3-3: Distribución de puntos para muestreo hidroquímico e isotópico

3.3 Instalación de Sensores Hidrométricos

El proceso de instalación de sensores hidrométricos y sus respectivos cercos consta de 2 etapas efectuadas durante el año 2016:

- 1ª etapa: 7 de marzo al 30 de abril.
- 2ª etapa: 3 al 15 de octubre.

La realización de estos trabajos estuvo a cargo de Amphos 21 junto con el apoyo de Ingeniería y Proyectos Ltda. (I&P).

Los **objetivos** fueron los siguientes:

- Instalación de cercos y protección adecuada para los lisímetros de la anterior Fase 2, ubicados en los salares de Pedernales, Maricunga y Laguna del Negro Francisco.
- Instalación de 7 lisímetros.
- Instalación de 1 estación meteorológica.
- Telemetría de los datos asociados a la estación meteorológica Nevado Tres Cruces, instalada en la Fase 2, por el período de duración de la Fase 3.
- Descarga de la información contenida en los dataloggers de los sensores hidrométricos instalados en la Fase 2.

1ª etapa

Las tareas efectuadas se resumen a continuación:

- ✓ Entre los días 7 y 10 de marzo de 2016 se realizó la visita de inspección fiscal a los 11 lisímetros y la estación meteorológica instalada en la Fase 2 del estudio "Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama". Tanto la visita como el muestreo se realizó según lo convenido, previamente, con la DGA.
- ✓ Colocación de cercos en 10 lisímetros de la anterior Fase 2, ubicados en los salares de Pedernales, Maricunga y Laguna del Negro-Francisco.
- ✓ Se comenzó la instalación de 4 lisímetros en el Salar Grande y otros 3 en el Salar de la Isla.

- ✓ Se comenzó la instalación de una estación meteorológica en el Salar de la Isla, acoplada al lisímetro ISL-1.

2ª etapa

- ✓ Se finaliza la instalación de los 7 lisímetros y estación meteorológica en los salares de La Isla y Grande.
- ✓ Se finaliza la colocación de cercos y protección de todos los sensores.
- ✓ Las estaciones quedan 100% operativas.

3.4 Prospección Geofísica (Fase 3)

La geofísica referente a la Fase 3 fue ejecutada por la empresa Geodatos en los puntos de interés. Se realizó prospección geofísica mediante el método de Transiente Electromagnético (TEM) y de Gravimetría en dos sectores: borde oriental del Salar de Maricunga y en Pampa Pantanillo, límite entre cuenca del Salar de Maricunga y Laguna del Negro Francisco.

El objetivo del estudio geofísico fue complementar la información geofísica obtenida en las Fases 1 y 2 del presente proyecto, de modo de poder obtener modelos conceptuales de mayor detalle. Además, se busca esclarecer la existencia de conexiones entre las diferentes cuencas así como la geometría y nivel freático de los diferentes acuíferos existentes en el área de estudio.

Las bases técnicas, que originalmente consistían en la materialización de 90 estaciones TEM y 90 estaciones de prospección gravimétrica, fueron modificadas según previo acuerdo con la DGA (Minuta de reunión 6, entre Amphos21, DGA y Geodatos, el 21-03-2016). Se disminuyen las estaciones gravimétricas en pos de mayor cantidad de estaciones TEM.

Las prospecciones consistieron en la ejecución de 58 estaciones TEM en el sector oriental del Salar de Maricunga distribuidas en 7 perfiles. A su vez, en el sector Pampa Pantanillo se midieron 40 estaciones TEM y 60 gravimétricas formando 6 perfiles (Tabla 3-3, Tabla 3-4, Tabla 3-5).

Tabla 3-3: Detalle estaciones TEM medidas. Sector Salar de Maricunga.

| Sector | Perfil TEM | Estaciones | Longitud [m] |
|--------------------|--------------|------------|--------------|
| Salar de Maricunga | M1 | 11 | 6995 |
| | M2 | 12 | 7687 |
| | M3 | 12 | 7692 |
| | M4 | 4 | 2095 |
| | M5 | 13 | 8330 |
| | M6 | 4 | 2108 |
| | M7 | 8 | 4897 |
| | Total | 58 | 39804 |

*Como los perfiles son consecutivos comparten una estación entre ellos, totalizando 58 y no 64 estaciones.

Tabla 3-4: Detalle estaciones TEM medidas. Sector Pampa Pantanillo

| Sector | Perfil TEM | Estaciones | Longitud [m] |
|------------------|--------------|------------|--------------|
| Pampa Pantanillo | P1 | 4 | 343 |
| | P3 | 7 | 609 |
| | P4 | 7 | 600 |
| | P5 | 3 | 83 |
| | P6 | 2 | 40 |
| | P7 | 17 | 3187 |
| | Total | 40 | 4862 |

Tabla 3-5: Detalle estaciones Gravimétricas medidas. Sector Pampa Pantanillo

| Sector | Perfil Grav | Estaciones | Longitud [m] |
|------------------|--------------|------------|--------------|
| Pampa Pantanillo | P1 | 8 | 697 |
| | P3 | 11 | 1004 |
| | P4 | 11 | 1001 |
| | P5 | 7 | 266 |
| | P6 | 6 | 178 |
| | P7 | 17 | 3191 |
| | Total | 60 | 6337 |

4. Instrumentación Instalada (Fases 2 y 3)

4.1 Fase 2 (Arcadis, 2015)

Los sensores hidrométricos instalados fueron una (1) estación meteorológica y once (11) lisímetros (10 permanentes y 1 de prueba) para la medición de la evapotranspiración del suelo. Los lisímetros tienen instalados sensores que permiten medir precipitación, temperatura del aire, temperatura y conductividad eléctrica del agua subterránea, nivel del agua subterránea y nivel del agua dentro del estanque del lisímetro.

4.1.1 Estación meteorológica

Para la elección de la ubicación de la estación meteorológica, se utilizó el método de los polígonos de Thiessen, la que consiste en la evaluación del área asociada a cada estación meteorológica y su distribución en el rango de alturas topográficas. El objetivo de esta metodología era tener una distribución lo más heterogénea posible y una adecuada caracterización del gradiente precipitación-altura.

Sin embargo, a pesar del análisis, se privilegió la seguridad de la estación meteorológica por lo que se decidió en conjunto con la Inspección Fiscal ubicar la estación en el Parque Nacional Nevado Tres Cruces administrado por CONAF. **Hay que resaltar que esta estación es de alto estándar y por primera vez (de parte de la DGA) se tiene una estación instalada en las cuencas Alto-Andinas que ya está registrando datos meteorológicos para contrastar y analizar los efectos de las variables hidrológicas (radiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura, precipitación líquida/sólida, etc.) en la recarga del acuífero.**

La ubicación exacta de la estación es en el costado poniente de la laguna Santa Rosa, al sur del Parque Nacional y sus coordenadas exactas son 482.328 m Este, 7.004.336 m Norte, 3.784 msnm correspondientes al Datum WGS84 y Huso S 19J. El detalle de los equipos con que cuenta la estación se incluyen en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Equipos y sensores hidrométricos de la estación meteorológica Nevado Tres Cruces. Modif. DGA-Arcadis, 2015.

| Sensor/equipo hidrométrico | Cantidad |
|--|-----------------|
| Sensor Temperatura HMP45C L 11 pies | 1 |
| Protector de 6 Elementos 41003-5A | 1 |
| Datalogger Campbell 4 MB CR1000 | 1 |
| Caja Nema 4 - 12/14 | 1 |
| Fuente Regulada 12 Volt PS 101 doble batería 25 Ah | 1 |
| Kit Panel Solar 20w Doble Soporte | 1 |
| Sensor Pluviómetro Texas TR525-L25 | 1 |
| Windsonic 4 Ultrasonido SDI-12 | 1 |
| Sensor Rad. Solar CMP3 Kipp & Zonen | 1 |
| Licencia Adicional LoggerNet V 4.1 | 1 |
| Soporte para el montaje de sensores | 1 |
| Torre Ventada IP280-10 de 10 mts Tipo OMW | 1 |
| Modem Satelital I/O Sat | 1 |
| OTT Pluvio2 400 | 1 |
| Pantalla protectora para pluviómetro | 1 |
| Kit Energía Solar para calefactor OTT Pluvio2 | 1 |

El diseño de la estación meteorológica está basado en los estándares que exige la DGA y la instalación en terreno estuvo a cargo de la empresa Ingeniería y Proyectos, quien tiene amplia experiencia en la instalación de estas estaciones. La estación está diseñada para asegurar su buen funcionamiento bajo condiciones extremas, es decir, alta radiación solar, temperaturas bajo cero, fuertes vientos, ubicación aislada y dificultades en el acceso. En el Anexo 6 (A6.1) se presentan las especificaciones técnicas de los componentes instalados en la estación meteorológica.

El inicio y puesta en marcha de la estación fue supervisado por personal de Arcadis, el cual se encargó de recepcionar la obra final. Por otro lado, los sensores hidrometeorológicos tendrán la precisión adecuada según los rangos esperables de las variables a medir y la vida útil será de a lo menos 10 años. En la Figura 4-1 se muestra una fotografía de la estación meteorológica durante su instalación.



Figura 4-1: Estación Meteorológica Nevado Tres Cruces instalada en la Fase 2, DGA-Arcadis, 2015.

4.1.2 Lisímetros

Los lisímetros se instalaron en 4 campañas de terreno comprendidas entre diciembre de 2014 y marzo de 2015. Las condiciones meteorológicas y la solicitud de permisos de acceso necesarios a las autoridades reguladoras conservadoras de la zona, como la CONAF, determinaron los tiempos de ejecución de las campañas de instalación de los lisímetros. Los lisímetros situados en la cuenca de Pedernales se instalaron la segunda quincena de diciembre de 2014, durante el mes de enero se instalaron los lisímetros de la cuenca de Maricunga y la primera semana de marzo se instalaron los lisímetros en la cuenca de Laguna del Negro Francisco.

4.1.2.1 Características técnicas

Los lisímetros fueron diseñados con el objetivo de medir la evaporación en función de la profundidad del nivel de agua subterránea en un lugar en concreto. Las variables que se monitorean son la temperatura del aire, la precipitación, la profundidad del nivel freático, la conductividad eléctrica y temperatura del agua subterránea, y el nivel del agua en el estanque. A partir de este último parámetro también se calcula la profundidad del nivel de agua dentro de la columna de suelo, que controla la tasa de evaporación.

En la Figura 4-2 se indican las partes que componen los lisímetros instalados en el área de estudio, donde se incluye la placa solar y la batería como fuente y almacenaje de energía, los medidores de parámetros meteorológicos y del agua subterránea, el estanque de agua, columna de suelo, llave de paso de agua y piezómetro.



1. *Panel Solar*
2. *Pluviómetro*
3. *Sensor de temperatura del aire*
4. *Batería y registro de parámetros*
5. *Piezómetro*
6. *Acceso a llave de paso de agua*
7. *Estanque de agua*
8. *Columna de evaporación de suelo*

Figura 4-2: Componentes de los lisímetros instalados. Lisímetro MAR-2. Modif. Fase 2, DGA-Arcadis (2015)

Cada lisímetro está equipado con los dispositivos de medición y registro presentados en la Tabla 4-2 cuyas especificaciones técnicas se incluyen en el Anexo 6 (A6.1).

El proveedor de estos equipos es la empresa Ingeniería & Proyectos, quienes junto a la especialidad de instrumentación de la empresa Arcadis fueron los encargados de su instalación en terreno.

Tabla 4-2: Equipos y sensores hidrométricos que se instalaron junto a los lisímetros. Modif. Fase 2, DGA-Arcadis (2015)

| Sensor/equipo hidrométrico | Cantidad |
|---|-----------------|
| Sensor de Temperatura 109 | 1 |
| Sensor Pluviómetro Texas TR525-L25 | 1 |
| Datalogger Campbell CR200X | 1 |
| Kit Panel Solar 10w Doble Soporte | 1 |
| Protector de 6 Elementos 41003-5A | 1 |
| Caja Nema 4 - 12/14 | 1 |
| Fuente Regulada 12 Volt PS 100 | 1 |
| Sensor de Conductividad WQ-Cond 0-20 mS | 1 |
| Torre de 2,5 m de altura | 1 |
| Transductor de presión Solinst 3001 | 2 |

* Proveedor: Ingeniería y Proyectos Ltda.

Los sensores que se instalaron en cada lisímetro tienen la precisión adecuada según los rangos esperables de las variables a medir y una vida útil de a lo menos 10 años. Al igual que para la estación meteorológica, estos sensores están diseñados para asegurar un buen funcionamiento bajo condiciones extremas, es decir, alta radiación solar, temperaturas bajo cero y fuertes vientos.

Es de gran importancia conocer las cotas a las que están ubicados los diferentes componentes de cada lisímetro para poder cuantificar la tasa de evaporación, por este motivo se midieron con GPS diferencial las cotas de los componentes de los equipos instalados. En el Anexo 6 (A6.1) se incluye una ficha para cada lisímetro en el que se resumen sus características técnicas, en la Figura 4-3 se muestra a modo de ejemplo. Las elevaciones más importantes para la obtención del registro son la cota de la parte superior de la columna de suelo (Z_{cs}) y la cota de los transductores de presión situados en el piezómetro (Z_{tp}) y en el depósito o estanque (Z_{td}). A partir de estos valores y los registros de presión se podrá estimar la tasa de evaporación en cada tipología de suelo en función de la profundidad del nivel freático en el terreno.

| CARACTERÍSTICAS LISÍMETRO | | | MAR-2 | | Fecha construcción ene-15 | |
|---|------------|----------|-------------|-------------------|------------------------------|--|
| Ubicación Coordenadas UTM Datum WGS84 Huso 19K (m), Cota (msnm) | | | | | | |
| Este | 488284,313 | Norte | 7014950,437 | Zt | 3785,2 | |
| Características Técnicas (m) | | | | | | |
| Φ_L | 0,400 | Φ_P | 0,400 | | | |
| Cotas Equipo (msnm) | | | | | | |
| Zd | 3785,245 | Zdpm | 3785,296 | Zppm | 3785,257 | |
| Zplu | 3787,745 | Zcs | 3785,257 | | | |
| Alturas (m) | | | | | | |
| hd | 0,700 | hcs | 1,200 | hp | 2,150 | |
| Diferencia altura entre depósito y columna de suelo (m) | | | | | | |
| dz | -0,012 | | | | | |
| Profundidad (m) y cota de transductores (msnm) | | | | | | |
| ptd | 0,676 | ptp | 1,993 | | | |
| ztd | 3784,62 | ztp | 3783,264 | | | |
| Esquema | | | | Fotografía | | |
| | | | | | | |

Zt: Cota terreno, Φ_L : Diám. lisímetro, Φ_P : Diám. piezómetro, Zd: Cota depósito, Zplu: Cota pluviómetro, Zdpm: Cota depósito en punto de medición, Zppm: Cota piezómetro en punto de medición, hd: Altura depósito, hcs: Altura columna de suelo, hp: Altura piezómetro, dz: Dif. Cota entre depósito y columna de suelo, ptd: Profundidad transductor depósito, ztd: Cota transductor depósito, ptp: Profundidad transductor piezómetro, ztp: Cota transductor piezómetro

Figura 4-3: Ejemplo de ficha con las características de cada lisímetro. Modif. Fase 2, DGA-Arcadis (2015)

4.1.2.2 Ubicación de los sensores instalados

La ubicación y distribución de los lisímetros en las tres cuencas de estudio tuvo en consideración los siguientes criterios:

- ✓ Utilización de lisímetros de carga variable
- ✓ Repartición de los lisímetros en el máximo de tipologías de suelo posible
- ✓ Ubicación en zonas con nivel freático somero
- ✓ Proximidad a vías de acceso

En la Tabla 4-3 se presenta la ubicación de los once lisímetros.

Tabla 4-3: Ubicación sensores hidrométricos Fase 2.

| Punto | Coordenada X (E) | Coordenada Y (N) | Altitud (msnm) |
|------------------------|------------------|------------------|----------------|
| Estación meteorológica | 482408 | 7004564 | 3787 |
| PED-1 | 477622 | 7086624 | 3388 |
| PED-2 | 480482 | 7106113 | 3378 |
| PED-3 | 494226 | 7112124 | 3381 |
| PED-4 | 476514 | 7086962 | 3371 |
| MAR-1 | 493553 | 7025908 | 3781 |
| MAR-2 | 488284 | 7014950 | 3785 |
| MAR-3 | 494016 | 7016016 | 3791 |
| MAR-4 | 484744 | 7004715 | 3802 |
| LNF-1 | 478056 | 6959317 | 4157 |
| LNF-2 | 477700 | 6964215 | 4156 |
| LNF-3 | 483522 | 6962762 | 4161 |

Datum: WGS 84, 19 S

4.2 Fase 3 (Amphos 21, 2016)

Durante la Fase 3 de este proyecto, se instalaron siete (7) lisímetros y una (1) estación meteorológica integrada al lisímetro ISL-1. Por otro lado, se instalaron cercos y protección adecuada para 10 de los 11 lisímetros de la anterior Fase 2, además de los 7 cercos respectivos a los sensores 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 asociados a la estación meteorológica Nevado Tres Cruces, instalada en la Fase 2, por el período de duración de la Fase 3.

4.2.1 Visita de inspección fiscal a los equipos instalados

4.2.1.1 Introducción

Dentro de las tareas a realizar para la consecución del estudio en cuestión se contemplan las visitas a terreno a los 11 lisímetros y a la estación meteorológica instalada en la Fase 2. Estas visitas tienen por objetivo la inspección fiscal de los equipos instalados.

La visita técnica se realizó entre los días 7 y 10 de marzo de 2016 por Reynaldo Payano y Dante Paredes, personal especialista de Amphos 21 y los profesionales de la Dirección General de Aguas (DGA): Rodrigo Alegría (Director Regional), Juan Carlos Salgado (DGA Nivel central), Miguel Ángel Caro (DGA Nivel Central).

4.2.1.2 Objetivos

Los objetivos de la visita fueron los siguientes:

- ✓ Visita de inspección fiscal de los equipos instalados en cada una de las estaciones.
- ✓ Definir la instalación de la protección adecuada para las 12 estaciones (lisímetros, piezómetros y pluviómetros) instaladas en la fase 2 de este proyecto.
- ✓ Determinar la densidad del agua en los puntos visitados.

4.2.1.3 Alcance

La visita se desarrolló en los Salares de Pedernales, Maricunga y Laguna del Negro Francisco.

- ✓ PED: Punto de medida en Salar de Pedernales.
- ✓ MAR: Punto de medida en Salar de Maricunga.
- ✓ LNF: Punto de medida en Laguna del Negro Francisco.

Las coordenadas de los puntos visitados se presentan en la ya mencionada Tabla 4-3.

Finalmente, se tomaron parámetros en situ (CE, pH, T° y OD) que no estaban contemplados en la visita a terreno. Además, se tomaron datos de densidad de agua y niveles de agua subterránea en aquellos puntos que contaban con punturas y estanque de agua. Estos últimos trabajos fueron consensuados y autorizados por el personal de la Dirección General de Aguas, que se encontraban presentes durante la campaña de mediciones.

4.2.1.4 Metodología

La metodología aplicada se basó en la medición de niveles de agua subterránea, la densidad del agua y la inspección técnica de los equipos instalados en cada una de las estaciones visitadas. Además, se tomaron parámetros en situ (CE, pH, T° y OD) en los puntos determinados y acordados previamente con los responsables de la DGA. Además, se realizó el dimensionamiento de los puntos para la instalación de la protección adecuada del conjunto de estaciones visitadas (lisímetros, piezómetros y pluviómetros). No se pudo inspeccionar el funcionamiento de los equipos, ya que no se contaba con las llaves para acceder a los dataloggers o registradores de datos, los que fueron descargados posteriormente a esta visita.

4.2.1.5 Resultados de terreno

4.2.1.5.1 Visita estación meteorológica y lisímetros, Fase 2

Se realizó la visita a terreno a la estación meteorológica ubicada en el Salar de Maricunga, la cual fue instalada en la Fase 2 del estudio. En la Figura 4-4 se muestra una fotografía de la estación en el momento de la visita. La estación presenta un excelente estado y cuenta con todo el equipamiento correctamente instalado.

Adicionalmente, se visitaron los 11 lisímetros para evaluar el posterior cercado de estos sensores. Destaca el punto PED-1 que no presenta la instrumentación originalmente especificada por lo que, por mutuo acuerdo con la DGA, se decidió no cercar (Figura 4-5).



Figura 4-4: Visita de inspección a la estación meteorológica Nevado Tres Cruces.



Figura 4-5: PED-1. Sin presencia de la instrumentación correspondiente. Único punto no cercado.

4.2.1.5.2 Medición de niveles

Finalmente, los puntos en los que se determinó el nivel de agua subterránea fueron los señalados en la Tabla 4-4:

Tabla 4-4: Puntos de determinación de niveles. Coordenadas en WGS_84

| Punto | Coordenada X (E) | Coordenada Y (N) | Altitud (msnm) | Nivel de agua en puntera (m) | Observación |
|-------|---------------------|---------------------|-------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| PED-1 | 477622 | 7086624 | 3388 | - | No cuenta con puntera |
| PED-2 | 480482 | 7106113 | 3378 | 1,26 | |
| PED-3 | 494226 | 7112124 | 3381 | 1,32 | |
| PED-4 | 476514 | 7086962 | 3371 | 2,335 | |
| MAR-1 | 493553 | 7025908 | 3781 | - | No se registró medida de nivel |
| MAR-2 | 488284 | 7014950 | 3785 | - | No se registró medida de nivel |
| MAR-3 | 494016 | 7016016 | 3791 | 1,25 | |
| MAR-4 | 484744 | 7004715 | 3802 | 1,75 | |
| LNF-1 | 478056 | 6959317 | 4157 | 1,55 | |
| LNF-2 | 477700 | 6964215 | 4156 | 1,60 | |
| LNF-3 | 483522 | 6962762 | 4161 | 0,97 | |

En la Figura 4-6 y Figura 4-7 se puede observar el registro de la toma de datos en algunos de los puntos visitados.

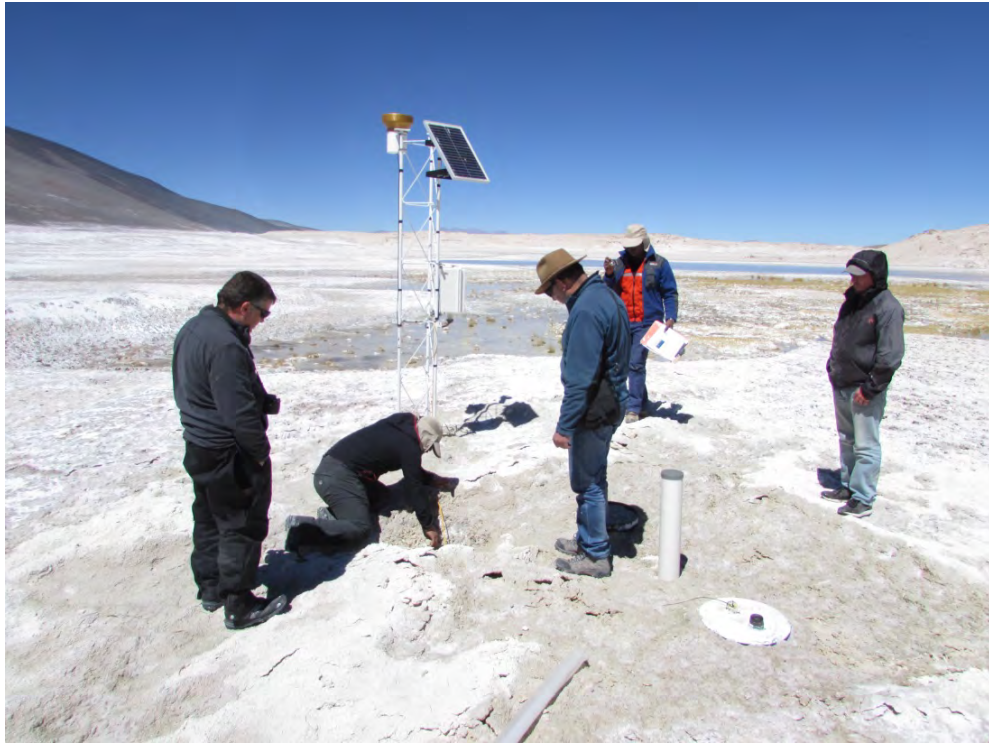


Figura 4-6: Medición de niveles y toma de datos.



Figura 4-7: Visita de inspección a los equipos instalados.

4.2.1.5.3 Muestreo hidroquímico y densidades

De la misma manera que en el capítulo anterior, en la Tabla 4-5 se puede observar la ubicación definitiva de los puntos de muestreo hidroquímico y las densidades obtenidas en los puntos visitados. Además, también se puede observar los parámetros físico-químicos determinados *in situ* en el momento de la visita.

Tabla 4-5: Puntos de muestreo y parámetros de estado de las muestras tomadas. Coordenadas en WGS_84

| Punto | Coord Este | Coord Norte | Altitud (msnm) | pH | T°C | CE (μS/cm) | OD% | Densidad del agua -ρ (g/cm ³) | Observación |
|--------|------------|-------------|----------------|------|-------|------------|------|---|---|
| PED-1 | 477622 | 7086624 | 3388 | - | - | - | - | - | No se pudo tomar la muestra por falta de agua |
| PED-2 | 480482 | 7106113 | 3378 | 7,15 | 12,66 | 29.050 | 2,10 | 1,01 | |
| PED-3 | 494226 | 7112124 | 3381 | 8,00 | 11,90 | 12.860 | 1,60 | 1,00 | |
| PED-4 | 476514 | 7086962 | 3371 | 7,46 | 14,43 | 6.568 | 7,70 | 1,00 | |
| MAR-1_ | 493553 | 7025908 | 3781 | 7,94 | 10,18 | 199.800 | 5,00 | 1,20 | |
| MAR-2_ | 488284 | 7014950 | 3785 | - | - | - | - | 1,01 | No se registraron parámetros hidroquímicos |
| MAR-3_ | 494016 | 7016016 | 3791 | - | - | - | - | 1,00 | No se registraron parámetros hidroquímicos |
| MAR-4_ | 484744 | 7004715 | 3802 | - | - | - | - | - | No se registraron parámetros hidroquímicos |
| LNF-1 | 478056 | 6959317 | 4157 | 8,90 | 9,44 | 1.258 | 1,90 | 1,00 | |
| LNF-2 | 477700 | 6964215 | 4156 | 8,82 | 10,14 | 880 | 2,40 | 1,00 | |
| LNF-3 | 483522 | 6962762 | 4161 | 8,80 | 9,37 | 443 | 0,00 | 1,09 | |

En los registros físico-químicos realizados (parámetros de estado), se puede observar que el agua es ligeramente básica (valores de pH comprendidos entre 7,15 y 8,90). El agua se encuentra a una temperatura bastante baja que es típico en alturas geográficas sobre los 3.000 m.s.n.m. La conductividad eléctrica del agua es muy alta, ya que los lisímetros están instalados en zona de Salares, esto a excepción de los puntos LNF-2 y LNF-3 que mostraron CE de 443 y 880 [μS/cm] respectivamente. La cantidad de oxígeno disuelto en el agua se sitúa en un rango muy bajo comprendido entre 0 y 7%.

Respecto a la densidad del agua (ρ) esta osciló entre 1 y 1,20 [g/cm³].

4.2.2 Instalación de Sensores Hidrométricos Fase 3

La instalación de los sensores hidrométricos y sus respectivos cercos finalizó el 15 de octubre de 2016. Durante este proceso se instalaron:

- ✓ 4 lisímetros en la cuenca del Salar Grande (C23).
- ✓ 3 lisímetros en la cuenca Salar de La Isla (C31).
- ✓ 1 estación meteorológica acoplada al lisímetro ISL-1 del Salar de la Isla.
- ✓ Todos los cercos respectivos.

4.2.2.1 Estación meteorológica (Fase 3)

Para la ubicación de la nueva estación meteorológica de esta Fase 3 del estudio, se consideraron los resultados y conclusiones de Fase 2 (DGA-Arcadis, 2015), así como las cotas topográficas de las cuencas analizadas con el fin de caracterizar el gradiente precipitación-altura. En este sentido, se privilegiaron las cuencas ubicadas más al norte de la zona de estudio, por lo que finalmente en conjunto con la Inspección Fiscal se decidió ubicar la estación en la cuenca Salar de la Isla (C31).

Hay que resaltar que, la estación meteorológica es de alto estándar, constituyendo la segunda estación (de parte de la DGA) en las cuencas Alto-Andinas y la misma ya se encuentran registrando datos meteorológicos para seguir avanzar en el conocimiento de los efectos de las variables hidrológicas (radiación solar, velocidad y dirección del viento, temperatura, precipitación líquida/sólida, etc.) en la recarga de los acuíferos de las cuencas analizadas. En la Figura 4-8 se presenta una fotografía de la estación meteorológica instalada en el Salar de la Isla. El detalle de los instrumentos y sensores con que cuenta la estación meteorológica se incluyen en la Tabla 4-7.



Figura 4-8: Estación Meteorológica instalada en el Salar de la Isla en la Fase 3.

4.2.2.2 Lisímetros (Fase 3)

La especificación de la instrumentación de los 7 lisímetros, se detalla en la Tabla 4-6. Cabe mencionar que además de la instrumentación señalada se instaló un sensor de altura de nieve JUDD en uno de los 4 lisímetros de la cuenca del Salar Grande. Otro de estos sensores está integrado en la estación meteorológica ubicada en Salar de la Isla (ISL-1). Para mayor detalle, consultar Anexo 6 (A6.1)

Adicionalmente, se utilizó GPS diferencial para conocer las cotas a las que están ubicados los diferentes componentes del lisímetro, siendo este dato clave en la cuantificación de la tasa de evaporación.

Tabla 4-6: Instrumentación Lisímetros Fase 3

| <u>Lisímetro</u> | |
|---|---|
| Componentes | Link |
| Datalogger Campbell CR295X for GOES | https://www.campbellsci.com/cr295x |
| Fuente Regulada 12V batería PS150 | https://s.campbellsci.com/documents/us/product-brochures/b_ch150_ps150.pdf |
| Kit panel solar 45W con doble soporte | http://www.ingproy.com/productos/energia-solar/ |
| Caja NEMA 12/14 | https://s.campbellsci.com/documents/us/product-brochures/b_enclosure.pdf |
| Sensor Temperatura Humedad HMP60 | http://www.ingp.cl/wp-content/uploads/2015/08/hmp60.pdf |
| RM Young 6-Plate Solar Radiation Shield | |
| Sensor pluviómetro TE525mm | https://s.campbellsci.com/documents/us/product-brochures/b_te525ws.pdf |
| Lisímetro para conductividad WQ-Conxx con temperatura agua | http://www.globalw.com/downloads/WQ/WQ-CondB.pdf |
| 2 sensores de presión hidrostática 0 a 2 mt (columna agua con compensación atmosférica) | http://www.finecontrols.co.uk/image/data/manuals/SIEMENS%20PDFS/mps.pdf |
| Torre Ventada IP280 de 3 MTS tipo OMW | http://www.ingproy.com/productos/estructura/ |

Tabla 4-7: Instrumentación Estación Meteorológica, Fase 3

| Estación Meteorológica | |
|--|---|
| Componentes | Link |
| Datalogger Campbell 4MB CR-1000 | https://s.campbellsci.com/documents/us/product-brochures/b_cr1000.pdf |
| Fuente Regulada 12V batería PS150 | https://s.campbellsci.com/documents/us/product-brochures/b_ch150_ps150.pdf |
| Kit panel solar 45W con doble soporte | http://www.ingproy.com/productos/energia-solar/ |
| Caja NEMA 12/14 | https://s.campbellsci.com/documents/us/product-brochures/b_enclosure.pdf |
| Sistema satelital GOES TX321 | https://s.campbellsci.com/documents/us/product-brochures/b_tx321.pdf |
| GOES 11dBi Yagi RHCP Antenna w/Mounting Hardware | https://s.campbellsci.com/documents/us/product-brochures/b_tx321.pdf |
| COAXNTN-L Antenna Cable RG8 w/2 Type N Male Connectors | |
| 30dB GPS Antenna 3.3V Jam- Resistant Active w/o Cable | |
| PS Antenna Cable | |
| Young Ultrasonic Anemometer Model 86000 | http://www.youngusa.com/Brochures/86000(1014).pdf |
| Sensor de presión atmosférica Setra | http://www.ingp.cl/wp-content/uploads/2015/10/setra_278.pdf |

| <u>Estación Meteorológica</u> | |
|---|---|
| Componentes | Link |
| Sensor Temperatura Humedad HMP60 | http://www.ingp.cl/wp-content/uploads/2015/08/hmp60.pdf |
| RM Young 6-Plate Solar Radiation Shield | |
| Sensor de radiación solar Li-Cor | http://www.ingp.cl/wp-content/uploads/2015/08/licor_li200x.pdf |
| Base para sensor Li-Cor | |
| Sensor pluviómetro TE525mm | https://s.campbellsci.com/documents/us/product-brochures/b_te525ws.pdf |
| Pluviómetro OTT2 sin calefactor con base | http://www.ingp.cl/wp-content/uploads/2015/10/Pluvi%C3%B3metro-ott2.pdf |
| Pantalla de viento para OTT2 | http://www.ingproy.com/pluviometria/ |
| Sensor altura de nieve Judd | http://www.ingp.cl/wp-content/uploads/2015/10/judd.pdf |
| 2 sensores de presión hidrostática 0 a 2 mt (columna agua con compensación atmosférica) | http://www.finecontrols.co.uk/image/data/manuals/SIEMENS%20PDFS/mps.pdf |
| Lisímetro para conductividad WQ-Conxx con temperatura agua | http://www.globalw.com/downloads/WQ/WQ-CondB.pdf |
| Soporte para montaje de sensores | |
| Torre Ventada IP280-10 de 10 MTS tipo OMW | http://www.ingproy.com/productos/estructura/ |

4.2.3 Ubicación de los sensores

En la Tabla 4-8 se presenta la ubicación de los lisímetros instalados en la Fase 3 de este proyecto.

Tabla 4-8: Ubicación sensores hidrométricos Fase 3

| Punto | Coordenada X (E) | Coordenada Y (N) | Altitud (msnm) |
|--|------------------|------------------|----------------|
| ISL-1 | 537256 | 7161378m | 3966 |
| ISL-2 | 538142 | 7.160.652 | 3969 |
| ISL-3 | 543.483 | 7.155.766 | 3967 |
| GRA-1 | 531.705 | 7.124.522 | 3988 |
| GRA-2 | 527.040 | 7.121.549 | 3990 |
| GRA-3 | 530.992 | 7.119.951 | 3987 |
| GRA-4 | 529.499 | 7.122.813 | 3986 |
| Estación Meteorológica (acoplada a ISL-1) | 537256 | 7161378m | 3966 |

4.3 Resumen Instrumentación (Fases 2 y 3)

En la Tabla 4-9 y Figura 4-9 se presenta la ubicación general de la instrumentación realizada durante las Fases 2 y 3 de este proyecto. En el Anexo 6 (A6.1) se encuentra una ficha para cada lisímetro en el que se resumen las características técnicas, mientras que en la Figura 4-10 se muestra un ejemplo de dicha ficha técnica.

Tabla 4-9: Resumen ubicación de sensores hidrométricos Fase 2 y Fase 3. Coordenadas en WGS 84.

| Fase del proyecto | Punto | Coordenada X (E) | Coordenada Y (N) | Altitud (msnm) |
|-------------------|---|------------------|------------------|----------------|
| Fase 2 | Estación meteorológica Nevado Tres Cruces | 482408 | 7004564 | 3787 |
| | PED-1 | 477622 | 7086624 | 3388 |
| | PED-2 | 480482 | 7106113 | 3378 |
| | PED-3 | 494226 | 7112124 | 3381 |
| | PED-4 | 476514 | 7086962 | 3371 |
| | MAR-1 | 493553 | 7025908 | 3781 |
| | MAR-2 | 488284 | 7014950 | 3785 |
| | MAR-3 | 494016 | 7016016 | 3791 |
| | MAR-4 | 484744 | 7004715 | 3802 |
| | LNF-1 | 478056 | 6959317 | 4157 |
| | LNF-2 | 477700 | 6964215 | 4156 |
| | LNF-3 | 483522 | 6962762 | 4161 |
| Fase 3 | ISL-1 | 537256 | 7161378m | 3966 |
| | ISL-2 | 538142 | 7.160.652 | 3969 |
| | ISL-3 | 543.483 | 7.155.766 | 3967 |
| | GRA-1 | 531.705 | 7.124.522 | 3988 |
| | GRA-2 | 527.040 | 7.121.549 | 3990 |
| | GRA-3 | 530.992 | 7.119.951 | 3987 |
| | GRA-4 | 529.499 | 7.122.813 | 3986 |
| | Estación Meteorológica (acoplada a ISL-1) | 537256 | 7161378m | 3966 |

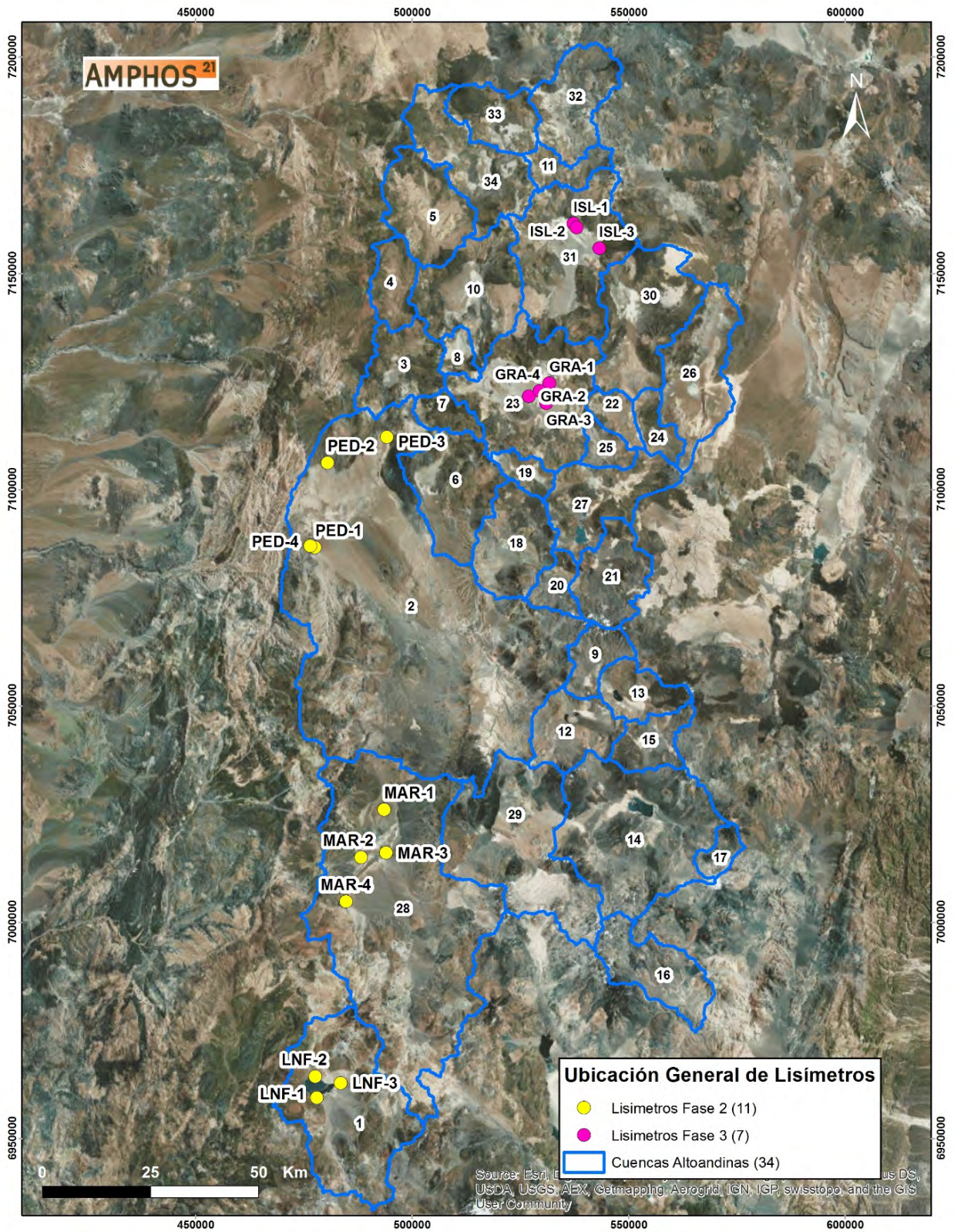


Figura 4-9: Distribución de los lisímetros instalados en Fase 2 y Fase 3.

| CARACTERÍSTICAS LISÍMETRO | | | GRA-1 | Fecha construcción abr-16 | |
|---|---------|----------|------------|------------------------------|-------|
| Ubicación Coordenadas UTM Datum WGS84 Huso 19J (m), Cota (msnm) | | | | | |
| Este | 531.705 | Norte | 7.124.522 | Zt | 3988 |
| Características Técnicas (m) | | | | | |
| Φ_L | 0,400 | Φ_P | 0,400 | | |
| Cotas Equipo (msnm) | | | | | |
| Zd | 3988,1 | Zdpm | 3988,14 | Zppm | 3989 |
| Zplu | - | Zcs | 3976,05 | | |
| Alturas (m) | | | | | |
| hd | 1,350 | hcs | 1,200 | hp | 3,000 |
| Diferencia altura entre depósito y columna de suelo (m) | | | | | |
| dz | 0,05 | | | | |
| Profundidad (m) y cota de transductores (msnm) | | | | | |
| ptd | 1,250 | ptp | 2,900 | | |
| ztd | 3986,85 | ztp | 3986,100 | | |
| Esquema | | | Fotografía | | |
| | | | | | |
| <p>Zt: Cota terreno, Φ_L: Diám. lisímetro, Φ_P: Diám. piezómetro, Zd: Cota depósito, Zplu: Cota pluviómetro, Zdpm: Cota depósito en punto de medición, Zppm: Cota piezómetro en punto de medición, Zcs: cota lisímetro, hd: Altura depósito, hcs: Altura columna de suelo, hp: Altura piezómetro, dz: Dif. Cota entre depósito y columna de suelo, ptd: Profundidad transductor depósito, ztd: Cota transductor depósito, ptp: Profundidad transductor piezómetro, ztp: Cota transductor piezómetro</p> | | | | | |

Figura 4-10: Ejemplo de ficha con las características de cada lisímetro instalado en la Fase 3.

4.4 Lisímetros y tipo de suelo

Los lisímetros fueron diseñados con el objetivo de medir la evaporación en función de la profundidad del nivel de agua subterránea en un lugar en concreto. Las variables que se monitorean son la temperatura del aire, la precipitación, la profundidad del nivel freático, la conductividad eléctrica y temperatura del agua subterránea, y el nivel del agua en el estanque. A partir de este último parámetro también se calcula la profundidad del nivel de agua dentro de la columna de suelo, que controla la tasa de evaporación.

Debido a que la ubicación de los lisímetros tiene relación con un tipo de suelo con características específicas, se realizó una cartografía preliminar, mediante análisis de imágenes satelitales, de los tipos de suelo de cada una de las cuencas que presentan salares.

La finalidad de esto es asociar las tasas de evaporación conocidas de los lisímetros instalados en las Fases 2 y 3 con su respectiva tipología de suelo y así extrapolar esta información a aquellas cuencas que presentan salares, pero que no disponen de instrumentación específica. Con esta correlación se podrán estimar tasas de evaporación para aquellas cuencas en las que no se tiene esa información específica.

Se distinguió la siguiente tipología de suelo cuyas características son las que siguen:

i. Suelo 1: Salino Reciente

- ✓ Zonas de recarga
- ✓ Zonas transicionales de agua dulce y agua salada
- ✓ Nivel freático somero
- ✓ Suelos en constante formación por precipitación química de sales.
- ✓ Alta reflectividad

ii. Suelo 2: Transicional entre 1 y 3

- ✓ Presenta características intermedias entre los suelos 1 y 3.

iii. Suelo 3: Núcleo Salino

- ✓ Baja reflectividad
- ✓ Baja permeabilidad

- ✓ Presencia de una costra salina
- ✓ Nivel de agua más profundo

iv. Suelo 4: Suelo Salino-Clástico

- ✓ Baja reflectividad
- ✓ Sedimentación particulada. Mezcla de sales y sedimentos clásticos.
- ✓ Nivel de agua profundo

Las cartografías preliminares de las cuencas que presentan salar se muestran en los informes individuales, mientras que a continuación se muestran aquellas cuencas donde se han instalado lisímetros (Figura 4-11, Figura 4-12, Figura 4-13, Figura 4-14 y Figura 4-15)

Por último, cabe mencionar que en la Fase 2 se realizó una cartografía de los suelos de las cuencas Laguna del Negro Francisco (C1), Salar de Maricunga (C28) y Salar de Pedernales (C28), las cuales fueron reajustadas y adaptadas en esta Fase 3 del proyecto a excepción de la primera por tratarse de una laguna y no de un salar.

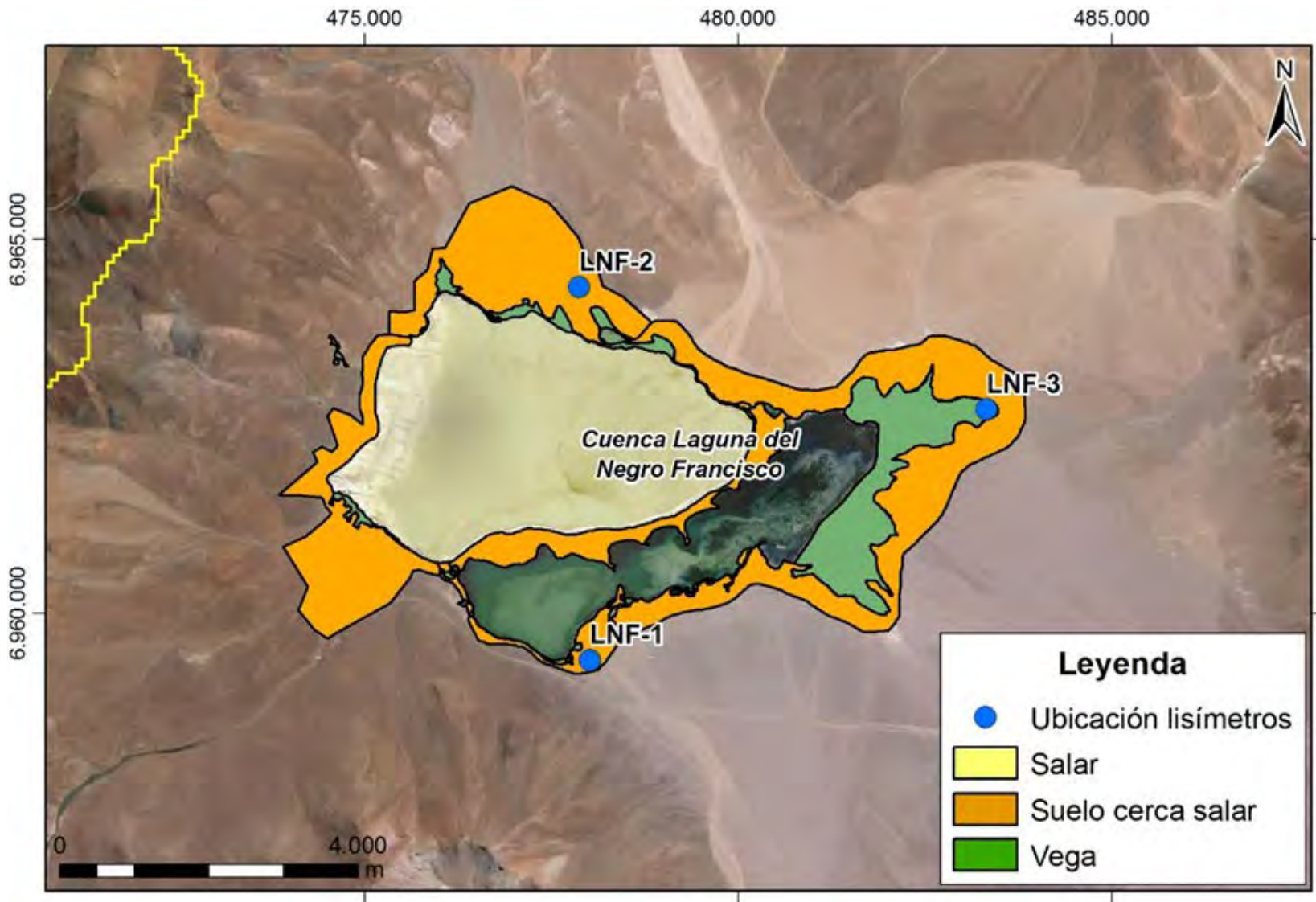


Figura 4-11: Ubicación lisímetros y tipos de suelo en Laguna del Negro Francisco (C1). Modif. Fase 2, DGA-Arcadis (2015).

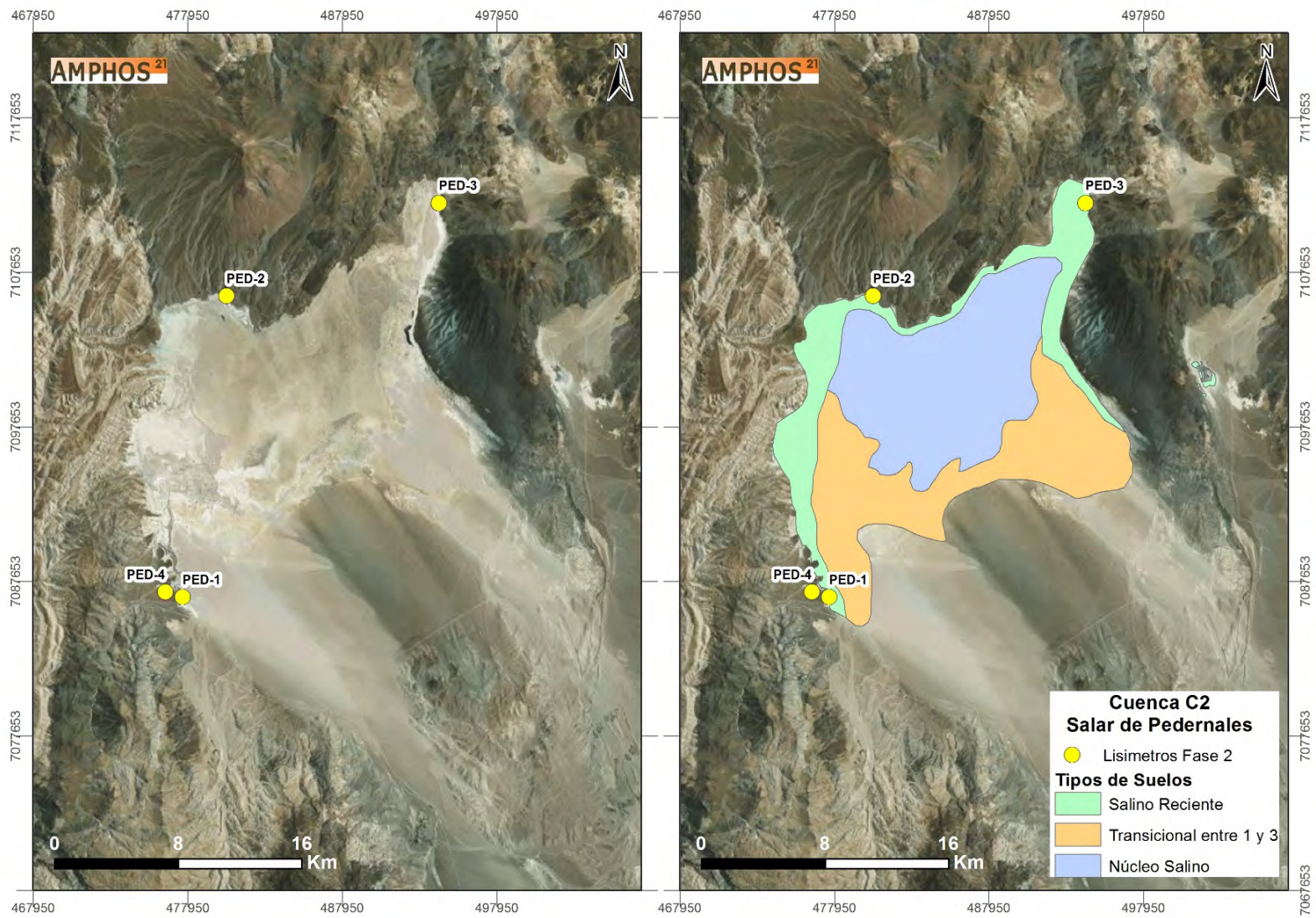


Figura 4-12: Ubicación lisímetros y tipos de suelo en Salar de Pedernales (C2).

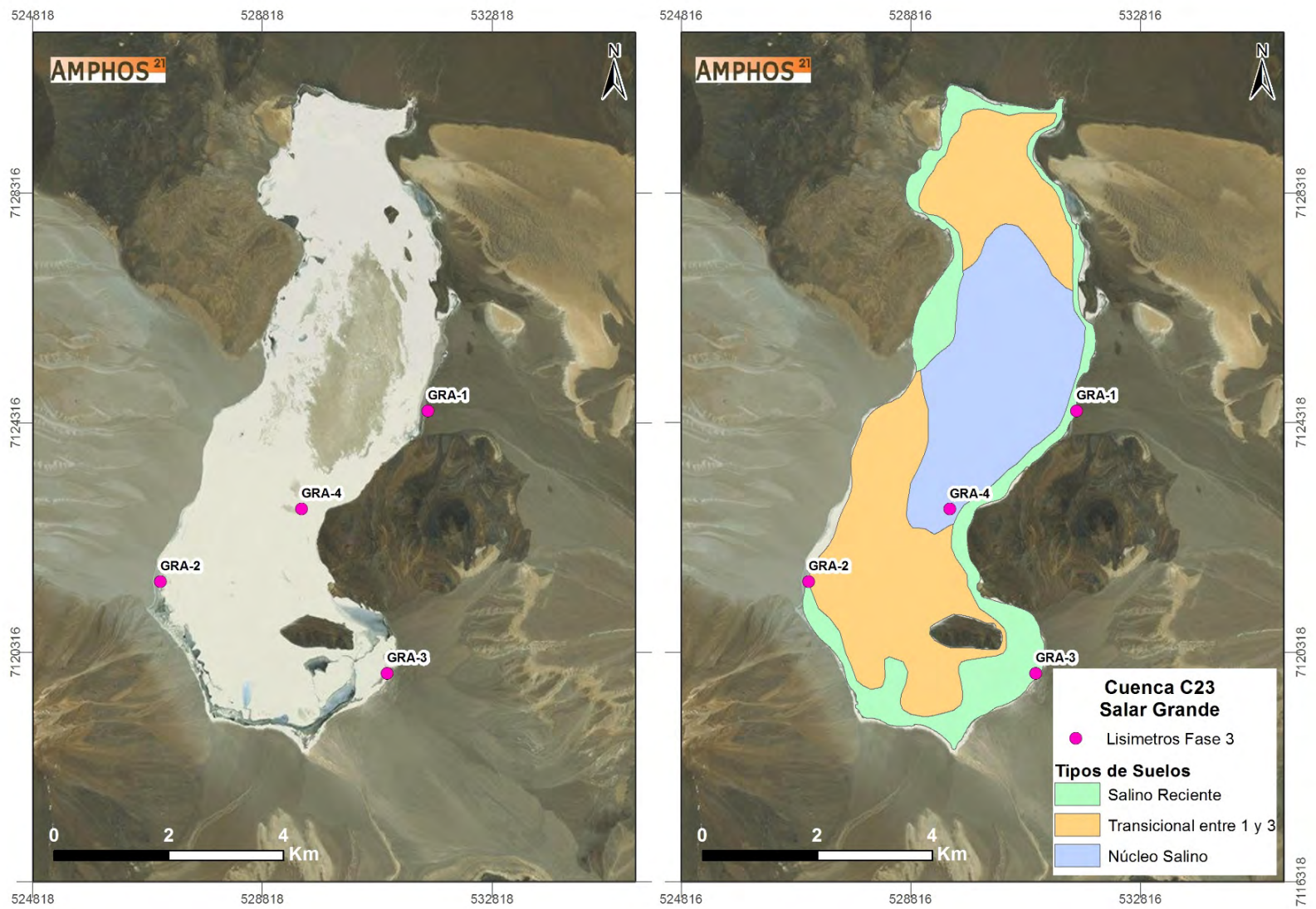


Figura 4-13: Ubicación lisímetros y tipos de suelo en Salar Grande (C23).

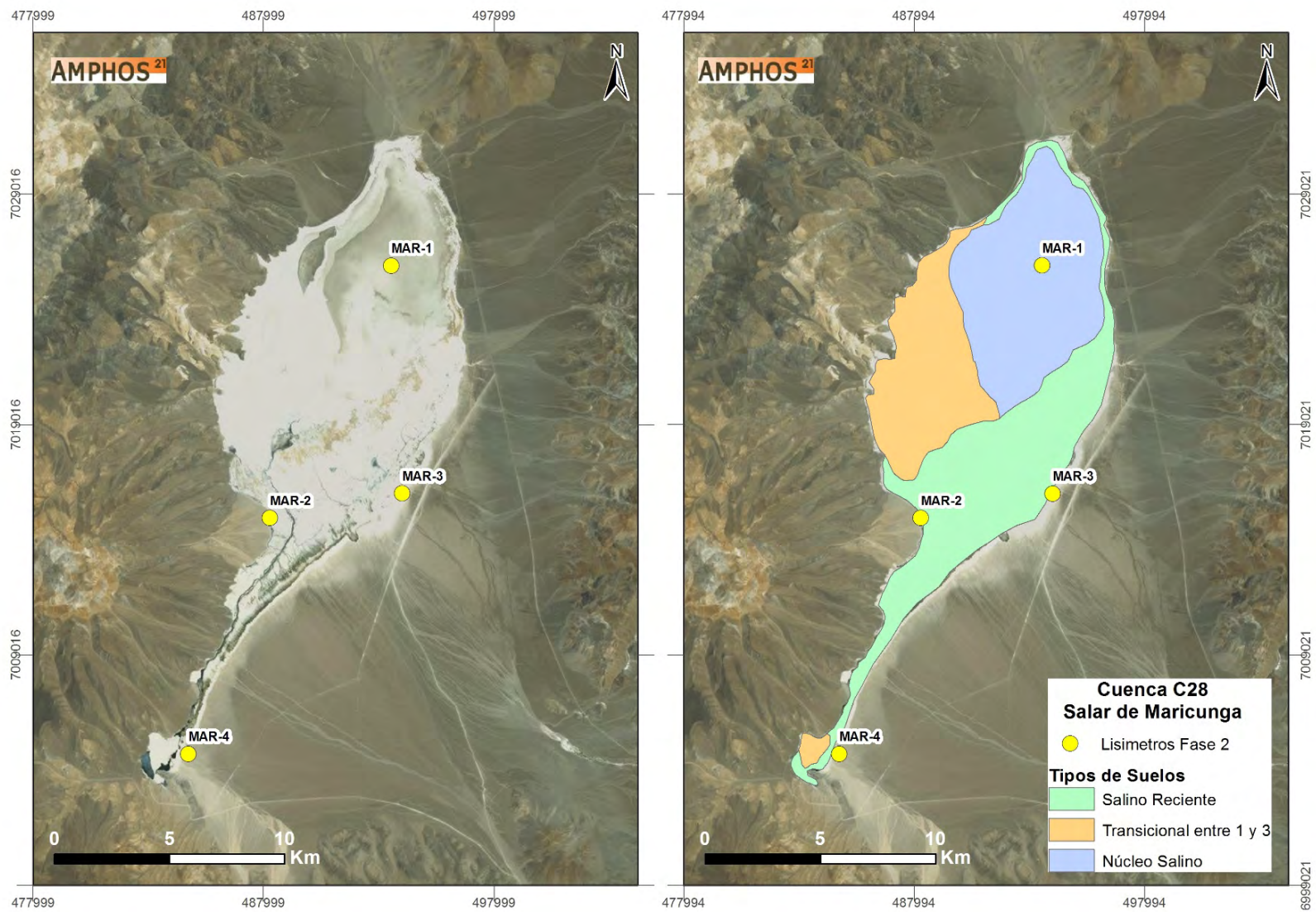


Figura 4-14: Ubicación lisímetros y tipos de suelo en Salar de Maricunga (C28).

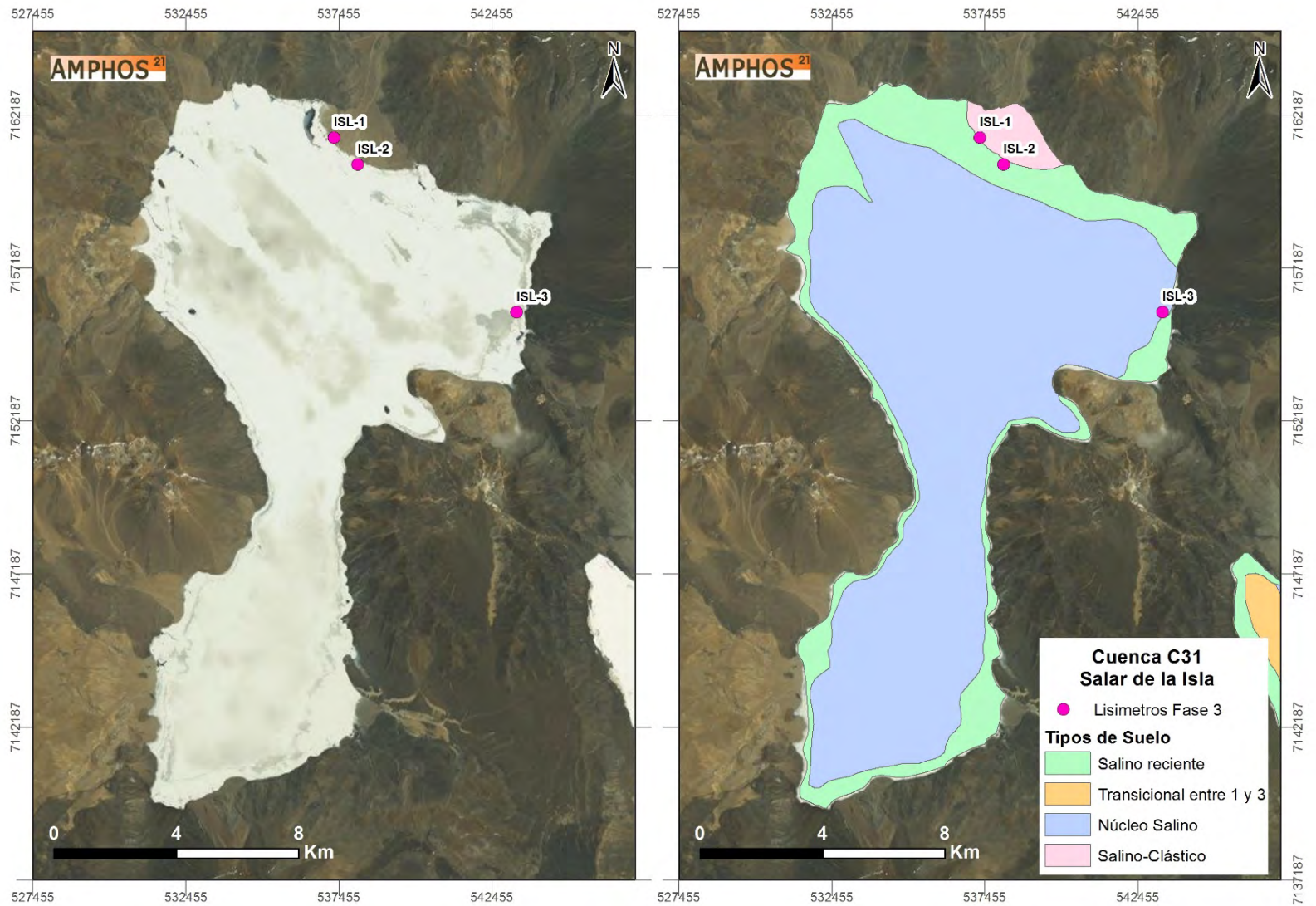


Figura 4-15: Ubicación lisímetros y tipos de suelo en Salar de La Isla (C31).

4.5 Análisis de evolución de presión y precipitación en las punteras de los lisímetros de Fase 2

Durante la última campaña de terreno se descargaron tanto los datos de los 10 piezómetros (o punteras) instalados junto a los lisímetros en la Fases 2 del estudio (DGA-Arcadis, 2015). Estos datos serán comparados con los valores de precipitación registrados en los pluviómetros instalados al lado de cada una de los piezómetros, para evaluar el comportamiento del nivel freático ante los eventos de precipitación que permita dilucidar los efectos de sobre la recarga.

En las Figura 4-16 a Figura 4-18 se presentan los diagramas de la evolución de la presión de los 10 piezómetros de los que se dispone registro donde se observa que en 6 de ellos ocurre un aumento en los niveles de la de la presión de agua a final de septiembre e inicio de octubre, lo que indica un aporte de las precipitaciones producto del derretimiento de la nieve en esos meses. Sin embargo, en los registros de precipitación se han observados anomalías que pueden estar relacionadas con la falla técnica del pluviométrico debido a los efectos propios de la nieve y del viento, dado que el equipo instalado no mide altura de nieve sino únicamente registra precipitación líquida.

En los diagramas correspondientes a los piezómetros de la Laguna del Negro Francisco (LNF), se puede observar que después de un mes con precipitaciones en octubre se observa un ascenso en los niveles piezométricos, a excepción de la estación LNF-3 donde salvo algunas anomalías en el registro de los niveles piezométricos se mantiene estable el nivel.

Por otro lado, en los diagramas de los piezómetros de Salar de Maricunga (MAR) para el periodo registrado (febrero a noviembre 2015) no se presentan precipitaciones significativas, a excepción de la estación MAR-4 donde se observan variaciones del nivel freático fluctuando de manera independiente a las precipitaciones registradas.

Finalmente, en los diagramas de los piezómetros de Salar de Pedernales (PED) los eventos de precipitación son puntuales en la estación PED-2. Sin embargo presenta una tendencia de ascenso del nivel piezométrico. En la estación PED-3 los niveles de piezométricos permanecen estables a pesar de las precipitaciones que se registran a partir de octubre de 2015. Asimismo, en la estación PED-4 el registro sin precipitaciones provoca el ascenso de 1 mm en el nivel piezométrico, y una estabilización del nivel piezométrico a partir de octubre donde se registran las precipitaciones.

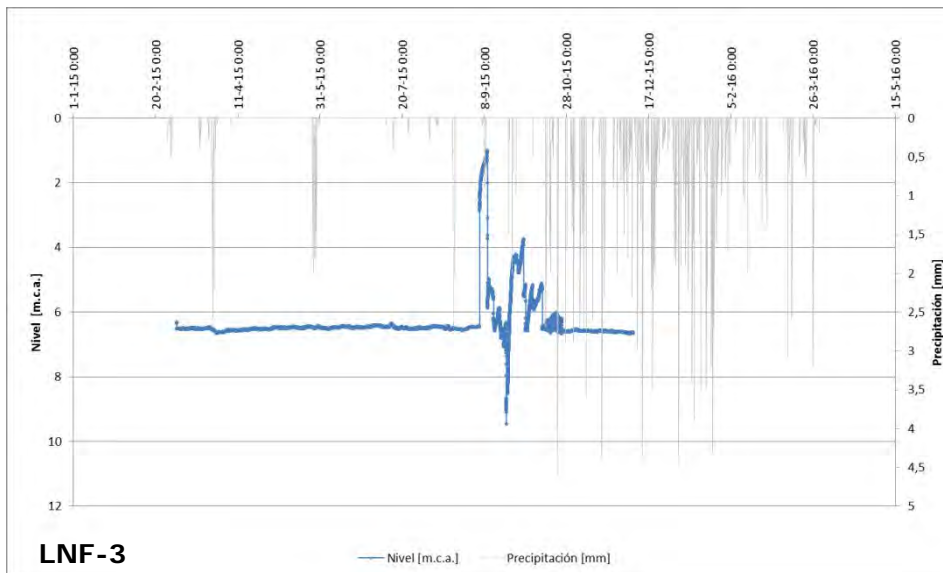
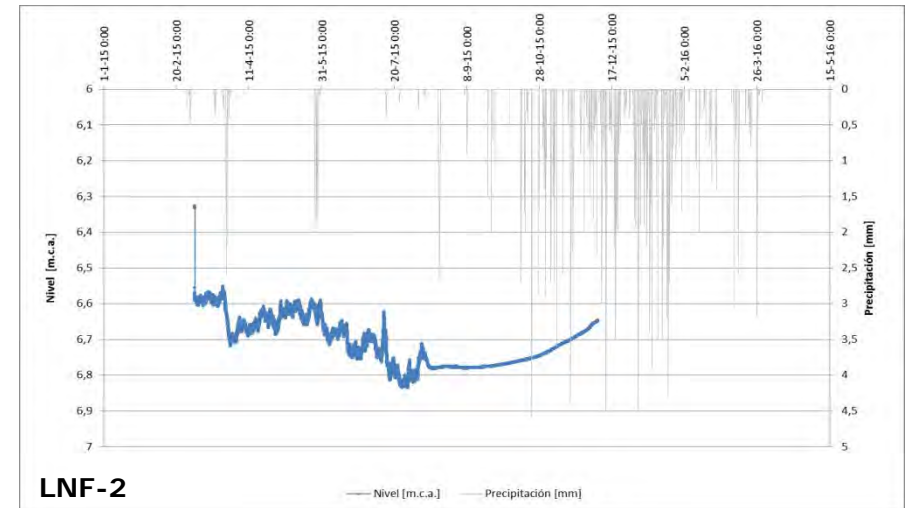
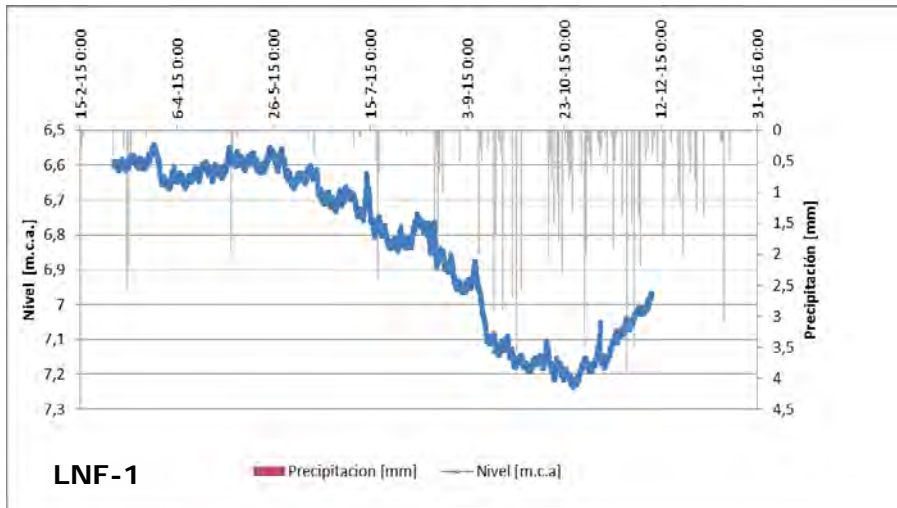


Figura 4-16. Diagramas de evolución de la presión y la precipitación en los piezómetros de la Laguna Negro Francisco.

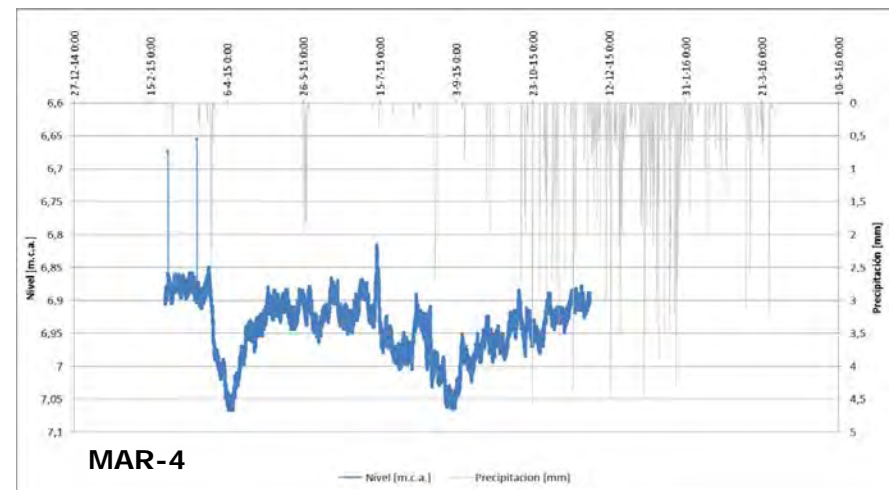
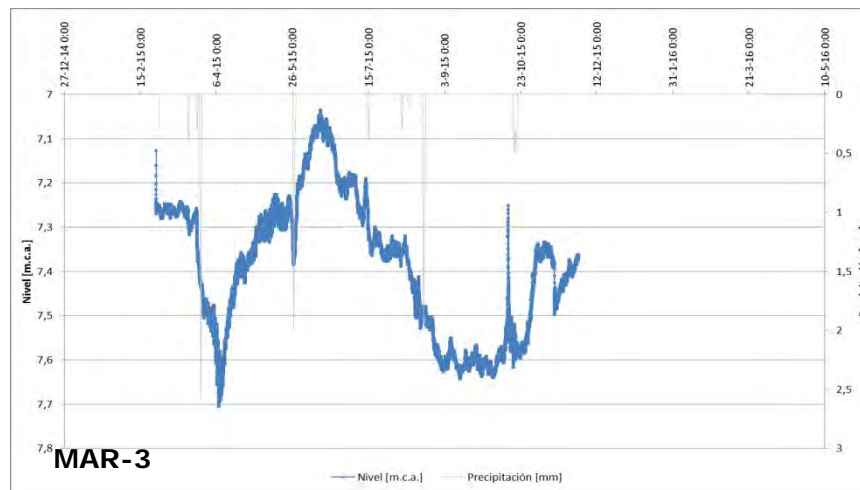
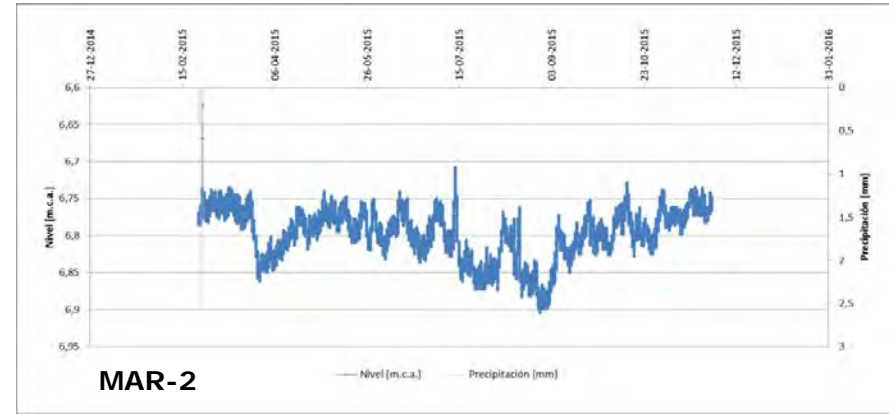
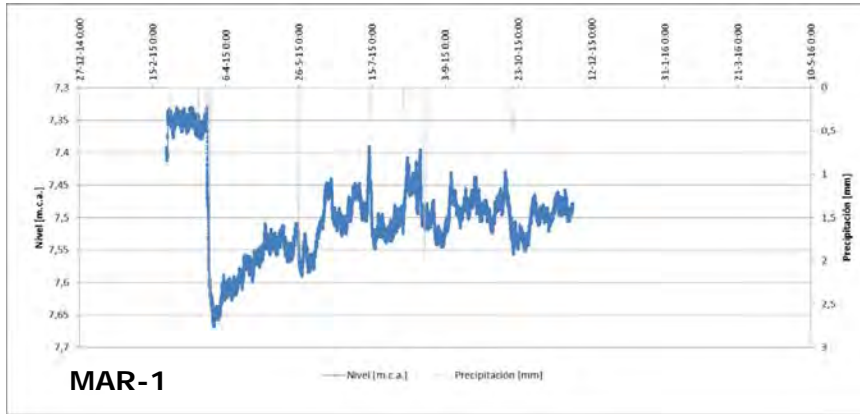


Figura 4-17. Diagramas de evolución de la presión y la precipitación en los piezómetros Salar de Maricunga.

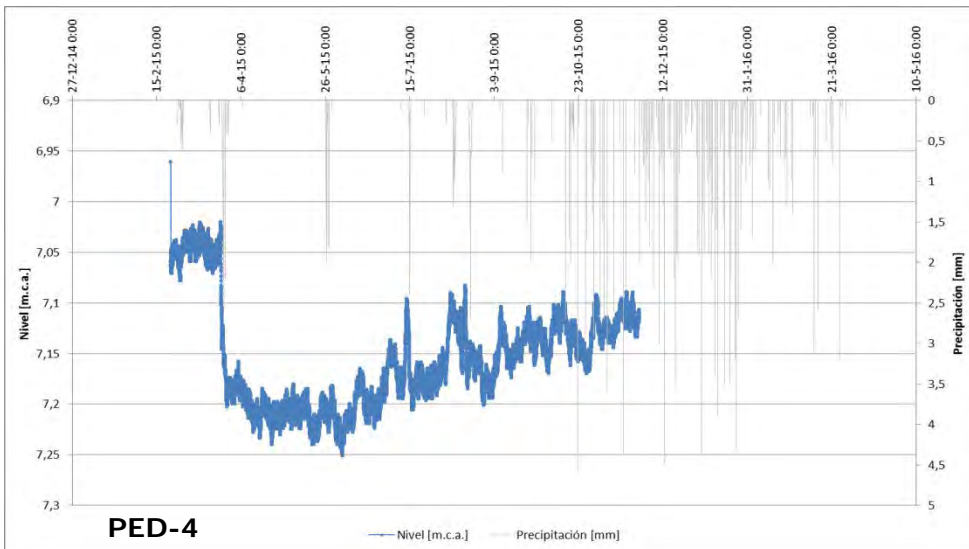
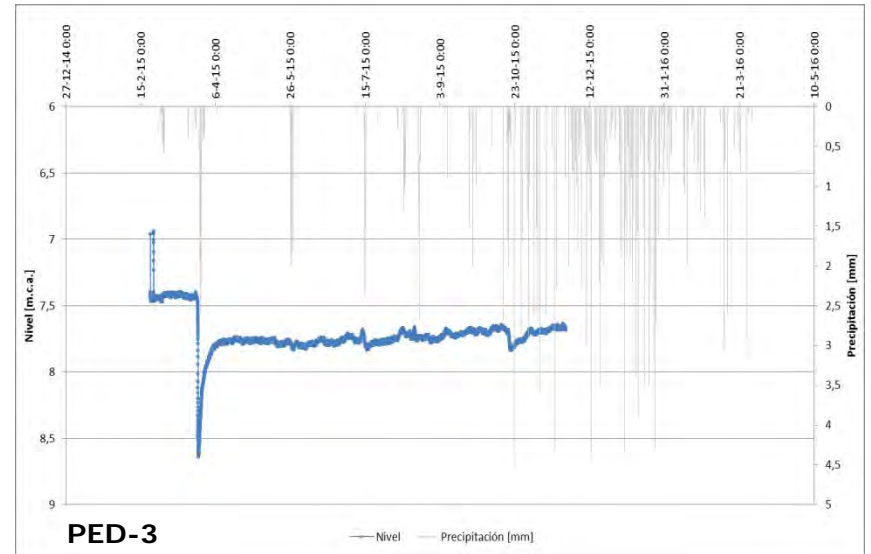
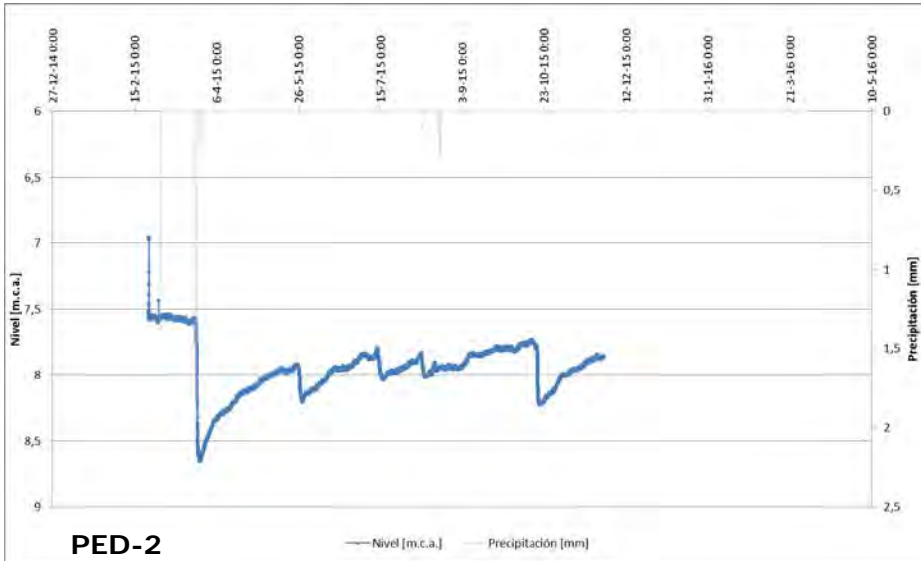


Figura 4-18. Diagramas de evolución de la presión y la precipitación en los piezómetros de la Salar de Pedernales

4.6 Red de estaciones meteorológicas

Según los registros de las estaciones meteorológicas facilitadas por la DGA y en base a la información levantada de las fases anteriores (DGA-Aquaterra, 2013; DGA-Arcadis, 2015), se ha creado una base de datos hidrológicos y una red de estaciones meteorológicas de la zona de estudio. Por lo tanto, se han revisado cada uno de los registros disponibles con el objetivo de evaluar su representatividad, extensión temporal y distribución espacial para el análisis hidrológico actual y futuro de la zona. De acuerdo a la base de datos generada, se han identificado un total de 15 estaciones meteorológicas (Tabla 4-10) situadas en las cuencas Salar de Maricunga (3), Laguna del Negro Francisco (2), Salar Grande (1), Piedra Pómez (2), Laguna Verde (1), y Río Jorquera (6), esta última se encuentra fuera de las 34 cuencas altiplánicas analizadas en este estudio. En la Figura 4-19 se presenta la ubicación referencial de las estaciones meteorológicas analizadas.

Tal como se presentan en la Tabla 4-10, la mayoría de las estaciones identificadas (pertenecientes a empresas mineras) cuentan con un registro de datos horarios de diferentes parámetros meteorológicos, principalmente precipitación, altura de nieve, velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y radiación solar. Sin embargo, a excepción de la estación Chile-Maricunga (que cuenta con 18 años de datos), los registros de datos son muy cortos (menos de 5 años) y las estaciones no siempre cuentan con instrumentos que permitan medir eficientemente tanto la precipitación líquida como la sólida, lo cual dificulta dilucidar si la precipitación sólida es un aporte importante para la recarga.

Tabla 4-10. Resumen de la información de las estaciones meteorológicas analizadas

| Nombre Estación | Cuenca | Período Registro | Parámetros |
|---------------------------|--------------------|-------------------------|---|
| Nevado Nevado Tres Cruces | Salar de Maricunga | 24/04/2015 - 25/10/2016 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atmosférica, Radiación Solar. |
| Campamento | Río Jorquera | 10/09/2008 - 24/05/2015 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atmosférica, Altura nieve, Radiación Solar. |
| Caspiche Central | Río Jorquera | 24-05-2010 - 24-05-2015 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atmosférica, Altura nieve, Radiación Solar. |

| Nombre Estación | Cuenca | Período Registro | Parámetros |
|----------------------|---|-------------------------|---|
| Cuenca-1 | Piedra Pómez | 17-10-2010 - 20-02-2015 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atmosférica, Altura nieve, Radiación Solar. |
| Laguna Verde | Laguna Verde | 08-03-2012 - 12-05-2015 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atmosférica, Altura nieve, Radiación Solar. |
| Salares Norte* | Salar Grande | 23/03/2014 - 05/08/2016 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atmosférica, Altura nieve, Radiación Solar. |
| Río la Gallina (AL1) | Río Jorquera | 07/01/10 - 31/12/13 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atmosférica, Radiación Solar. |
| Planta Mina (AL2) | Río Jorquera | 07/01/10 - 31/12/13 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atmosférica, Radiación Solar. |
| Piedra Pómez (AL3) | Piedra Pómez | 07/01/10 - 31/12/13 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atmosférica, Radiación Solar. |
| Campamento (AL4) | Río Jorquera | 07/01/10 - 31/12/13 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atmosférica, Radiación Solar. |
| Refugio* | S. Maricunga | 16/04/13 - 30/11/13 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Temperatura, Humedad Relativa, Presión Atm., Altura nieve, Radiación Solar. |
| Abanico | S. Maricunga | 22/03/13 - 30/11/13 | Velocidad/Dirección Viento, Temperatura, Humedad Relativa. |
| Chile-Maricunga* | Río Jorquera / Laguna del Negro Francisco | 01/06/94 - 31/12/12 | Velocidad Viento, Temperatura, Humedad Relativa, Evaporación, Presión Atmosférica. |
| Pantaniillo Belfort* | Laguna del Negro Francisco/ Salar Maricunga | 14/02/14 - 03/04/14 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Humedad Relativa, Temperatura, Radiación Solar. |
| Refugio Belfort* | Laguna del Negro Francisco/ Salar Maricunga | 14/02/14 - 22/07/14 | Precipitación, Velocidad/Dirección Viento, Humedad Relativa, Temperatura, Radiación Solar. |

*Nota: En algunas estaciones identificadas (Pantaniillo Belfort, Refugio, Salares Norte y Chile-Maricunga) no se dispone de información de sus coordenadas de ubicación y/o altura geográfica.

Fuente: Elaborado a partir de DGA, 2016 y DGA-Arcadis, 2015.

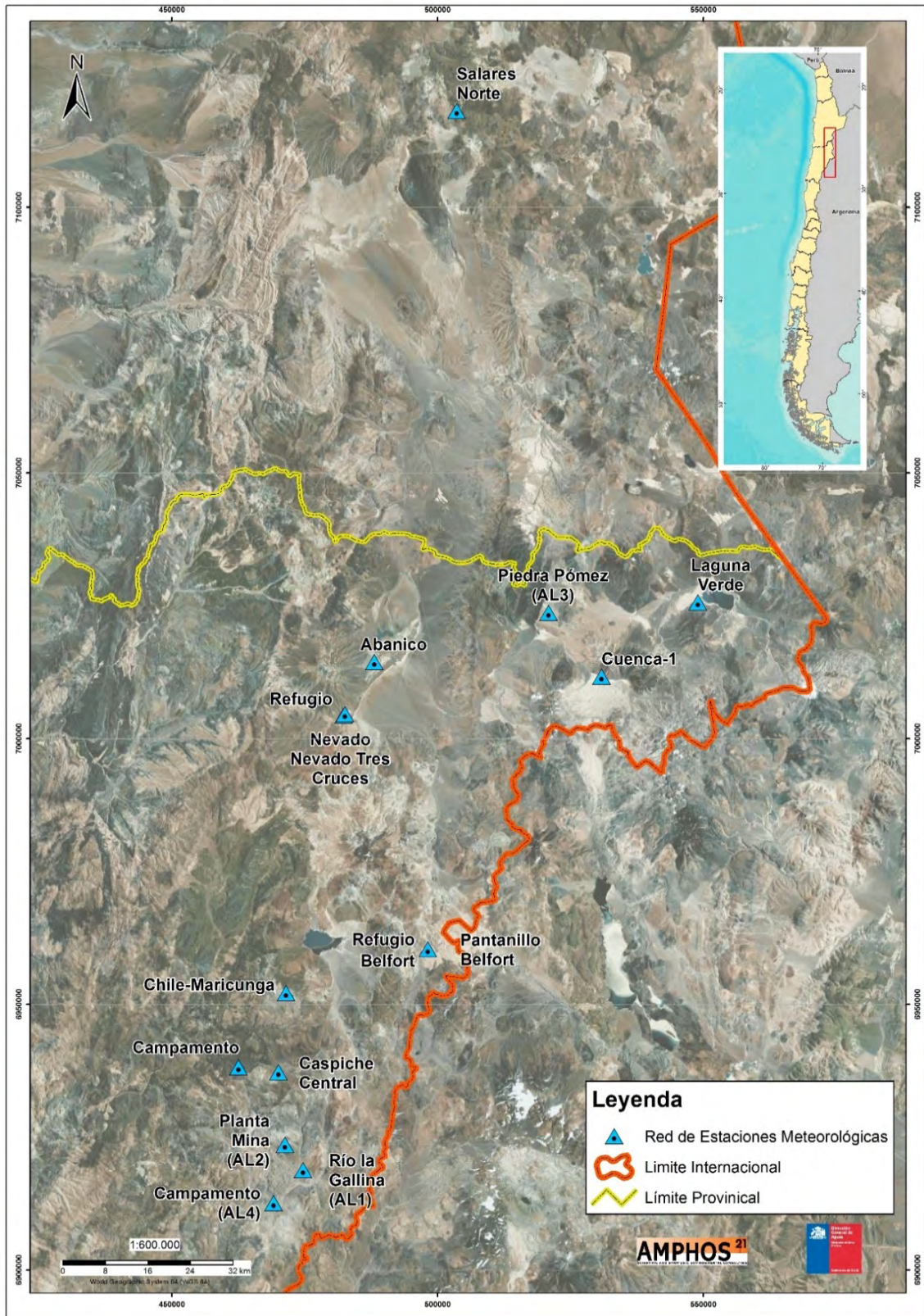


Figura 4-19. Ubicación de las estaciones meteorológicas analizadas.

A partir de los datos de las estaciones meteorológicas disponibles se analizarán las variables meteorológicas para encontrar correlaciones entre las distintas variables y entre las características geográficas como altitud, latitud y longitud.

En este contexto, es importante resaltar la información de la **estación meteorológica DGA Nevado Tres Cruces** que fue instalada durante el mes de marzo-abril del año 2015 y que hasta la fecha ha registrado exitosamente datos de precipitación (lluvia acumulada), velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar, etc. Constituyendo la primera estación -por parte de la autoridad en la zona de estudio- que permitirá complementar los datos meteorológicos disponibles y analizar los efectos de las variables hidrológicas en la recarga subterránea de los acuíferos de la zona de estudio. La estación se encuentra ubicada en el costado poniente de la laguna Santa Rosa, al sur del Parque Nacional Nevado Tres Cruces administrado por CONAF y sus coordenadas son 482.328 m Este, 7.004.336 m Norte, 3.784 m.s.n.m. correspondientes al Datum WGS84 y Huso S 19J. En la Tabla 4-11 se presenta el detalle de los equipos que componen la estación meteorológica, cuyas características técnicas son recogidas en el estudio de DGA-Arcadis, 2015.

Tabla 4-11: Equipos y sensores hidrométricos de la estación meteorológica DGA Nevado Tres Cruces

| Sensor/equipo hidrométrico | Cantidad |
|--|----------|
| Sensor Temperatura HMP45C L 11 pies | 1 |
| Protector de 6 Elementos 41003-5A | 1 |
| Datalogger Campbell 4 MB CR1000 | 1 |
| Caja Nema 4 - 12/14 | 1 |
| Fuente Regulada 12 Volt PS 101 doble batería 25 Ah | 1 |
| Kit Panel Solar 20w Doble Soporte | 1 |
| Sensor Pluviómetro Texas TR525-L25 | 1 |
| Windsonic 4 Ultrasonido SDI-12 | 1 |
| Sensor Rad. Solar CMP3 Kipp & Zonen | 1 |
| Licencia Adicional LoggerNet V 4.1 | 1 |
| Soporte para el montaje de sensores | 1 |
| Torre Ventada IP280-10 de 10 mts Tipo OMW | 1 |
| Modem Satelital I/O Sat | 1 |
| OTT Pluvio2 400 | 1 |
| Pantalla protectora para pluviómetro | 1 |
| Kit Energía Solar para calefactor OTT Pluvio2 | 1 |

Durante la última campaña de terreno, se descargaron datos registrados por los sensores de la estación DGA Nevado Tres Cruces para validar su correcto funcionamiento y el comportamiento de las variables meteorológicas locales. En la Figura 4-20 a Figura 4-23, se puede observar una gran variabilidad de las precipitaciones en el periodo analizado (abril, 2015 hasta octubre, 2016), las cuales se concentran entre los meses de mayo y agosto presentándose precipitaciones muy escasas entre los meses de octubre a diciembre y eventualmente en los meses de febrero y abril. A pesar de que la estación no presenta un registro extenso de datos que permita establecer un patrón de precipitación en la zona, se puede dilucidar que el año hidrológico comienza en abril y finaliza en marzo del año calendario siguiente. Además, se observa una buena correlación de las precipitaciones con otras variables como la temperatura que registró en promedio un mínimo de $-5,2^{\circ}\text{C}$ en el mes de julio y un máximo de $8,9^{\circ}\text{C}$ en el mes de febrero. Respecto a la radiación solar (Figura 4-25) se registró en promedio un valor mínimo de 182 W/m^2 en el mes de junio y un valor máximo de 453 W/m^2 en el mes de diciembre (Figura 4-25 y Figura 4-29); la velocidad del viento (Figura 4-26) osciló entre $2,2$ y $4,4\text{ m/s}$ en promedio y la humedad relativa (Figura 4-27) alcanzó un máximo 41% en junio y un mínimo $15,9\%$ en noviembre, respectivamente. En la Figura 4-20 a Figura 4-29 se presentan los diagramas de evolución de los distintos parámetros registrados en la estación.

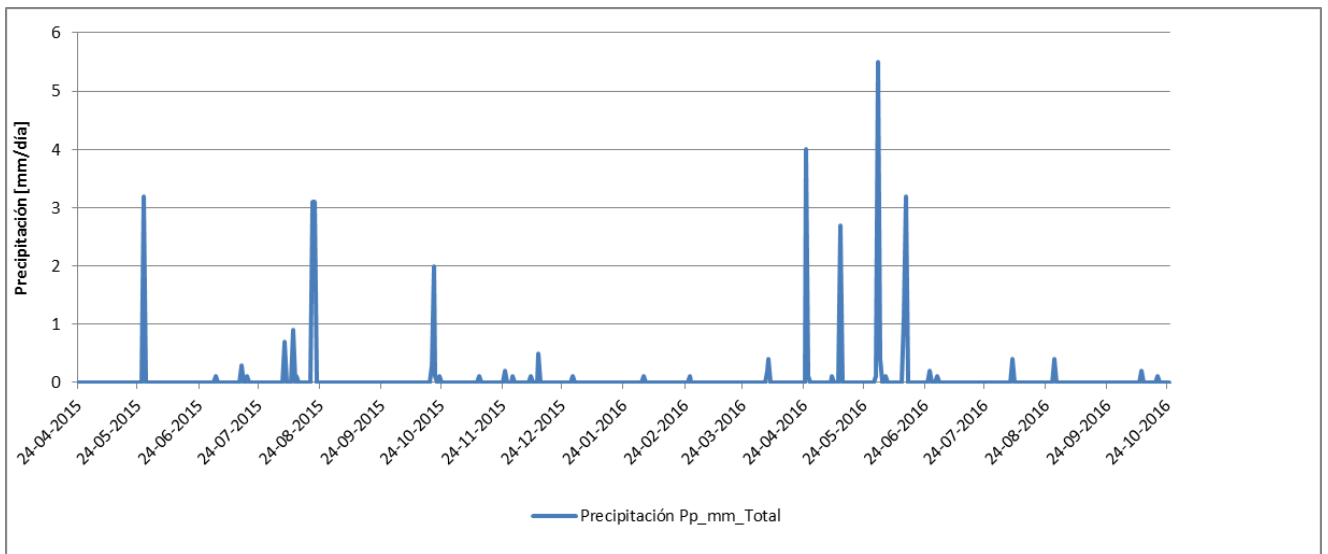


Figura 4-20. Evolución de la precipitación media diaria registrada en la estación

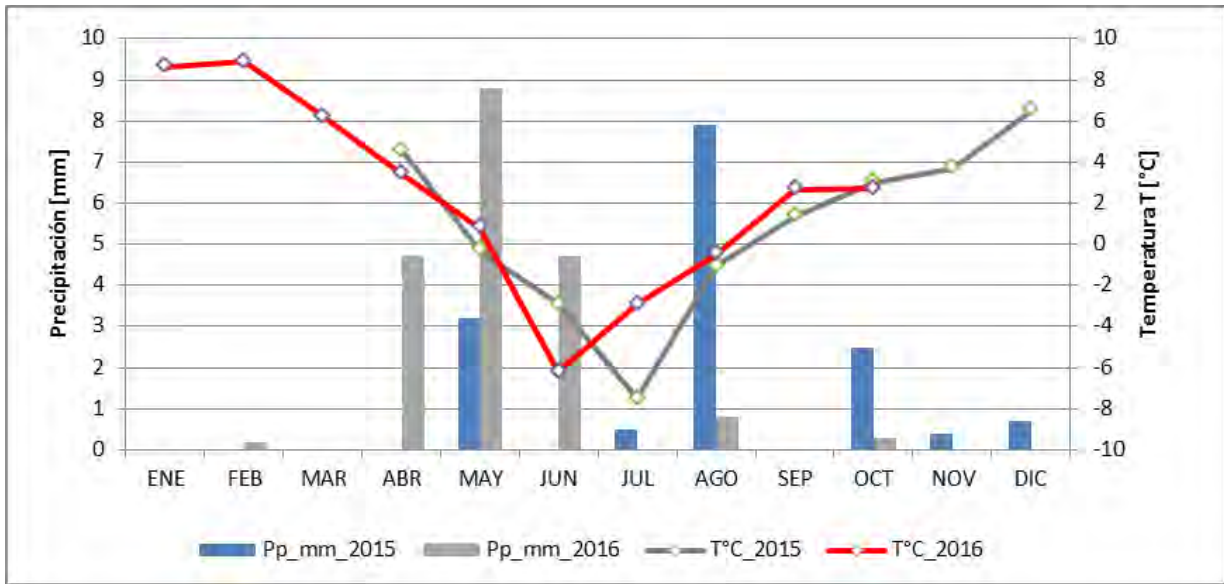


Figura 4-21. Climograma de precipitación vs temperatura media mensual registrada en la estación durante los años 2015 y 2016.

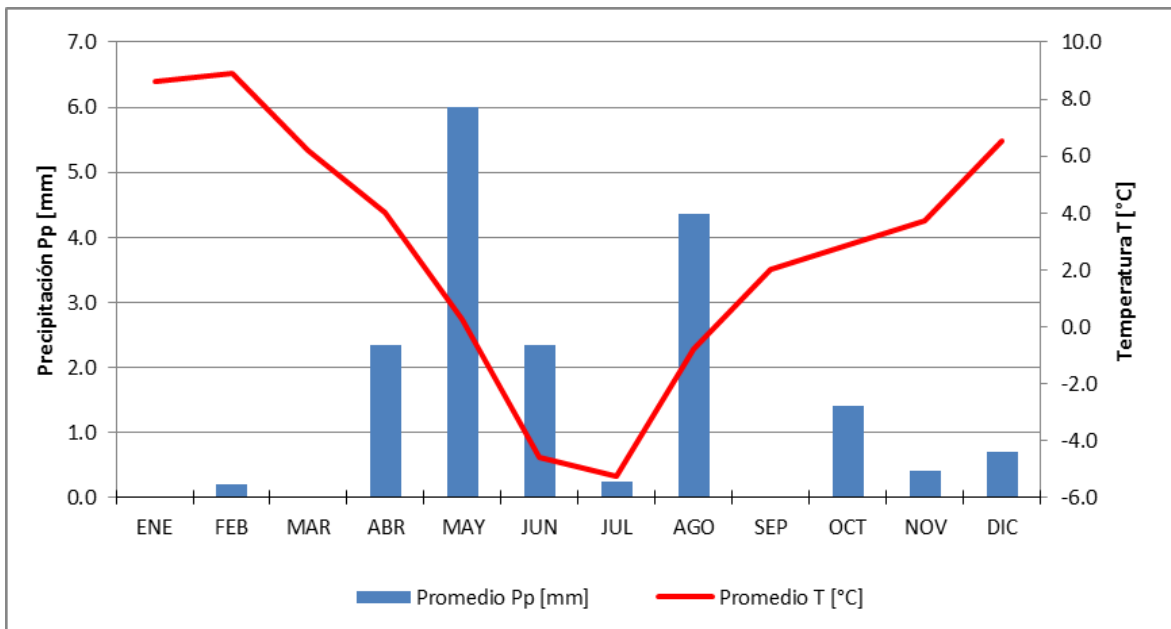


Figura 4-22. Climograma de precipitación vs temperatura media mensual registrada en la estación.

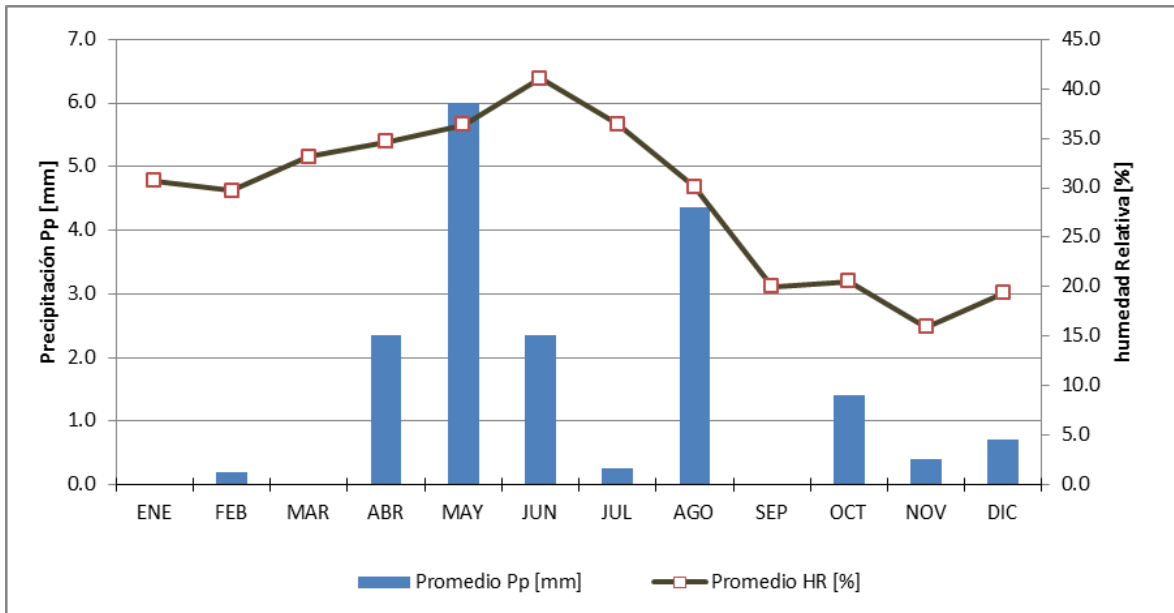


Figura 4-23. Diagrama de precipitación y humedad relativa (HR) media mensual registrada en la estación.

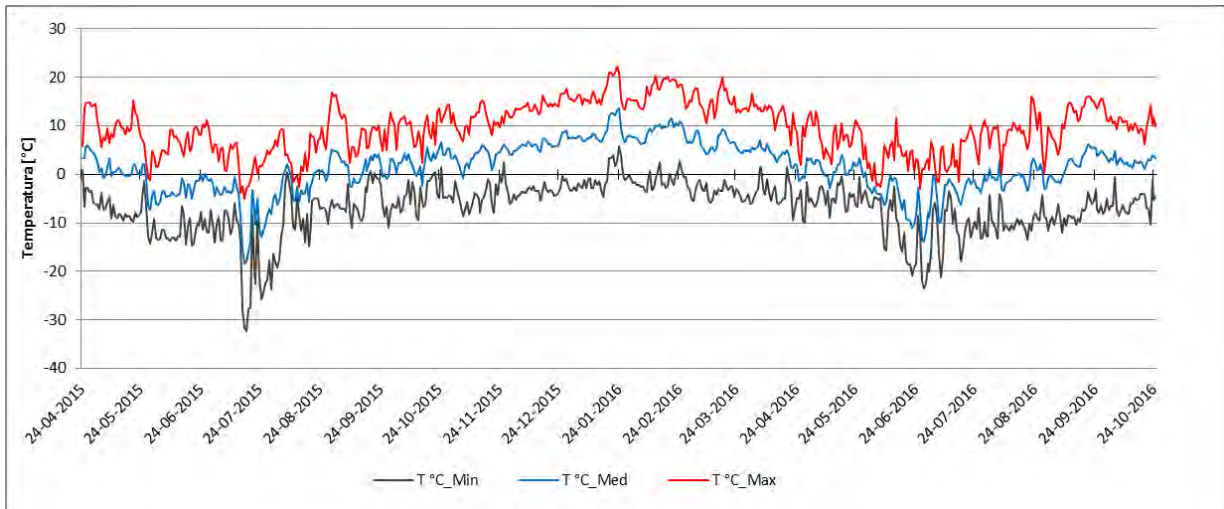


Figura 4-24. Evolución de la temperatura media diaria registrada en la estación

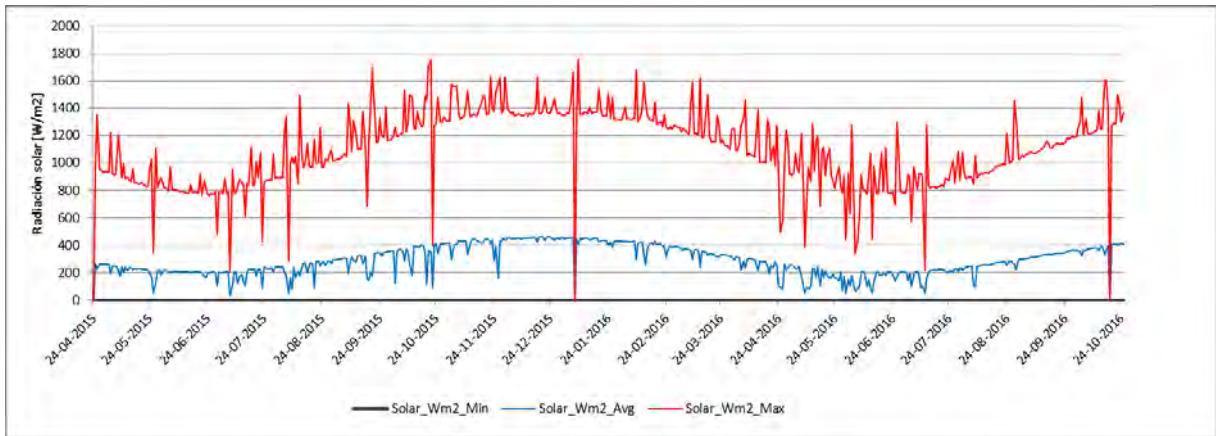


Figura 4-25. Diagrama de evolución de la radiación solar en la estación

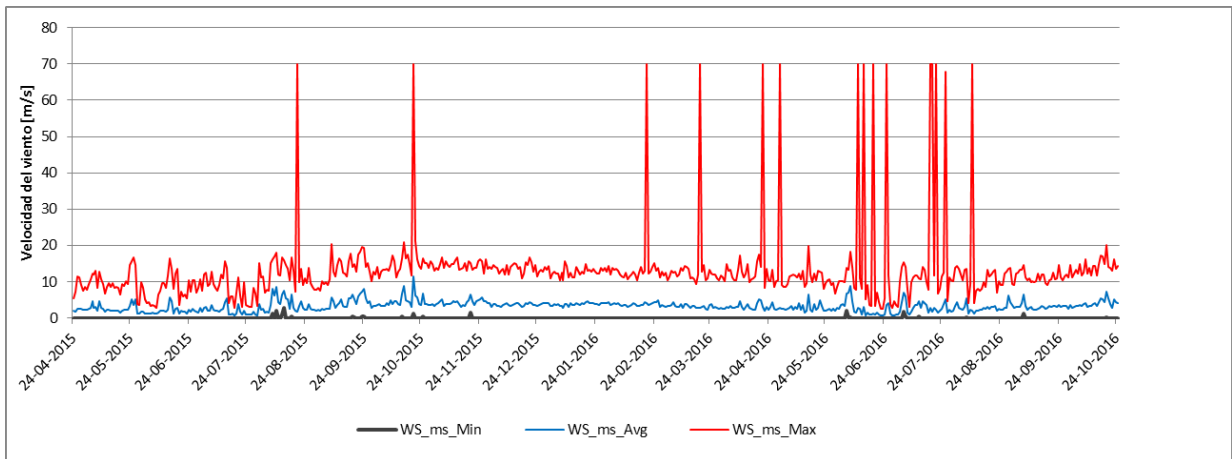


Figura 4-26. Diagrama de evolución de la velocidad del viento (WS) registrada en la estación

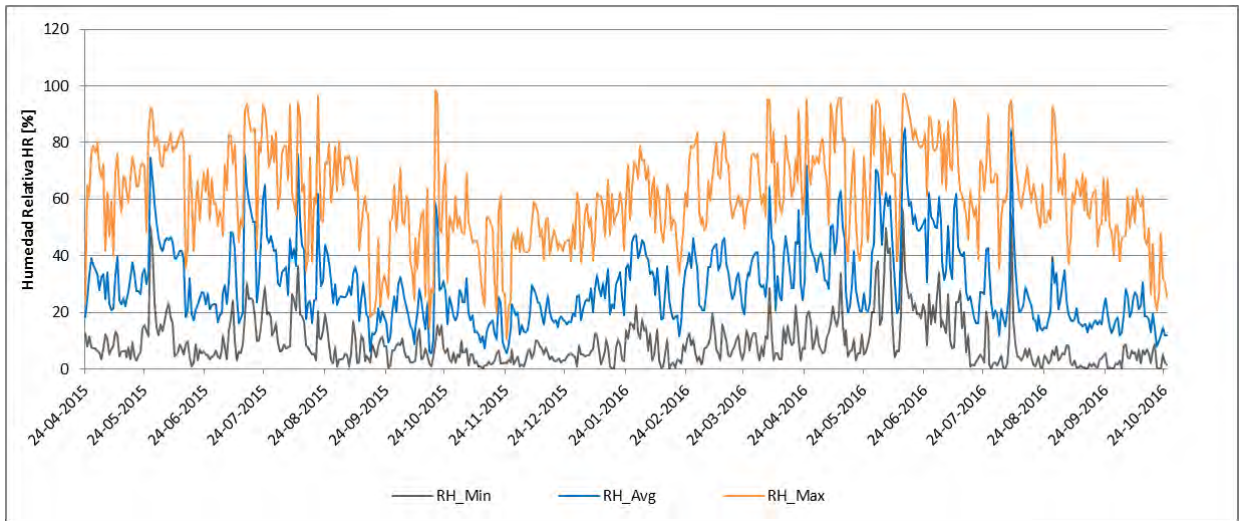


Figura 4-27. Diagrama de evolución de la humedad relativa (HR) registrada en la estación

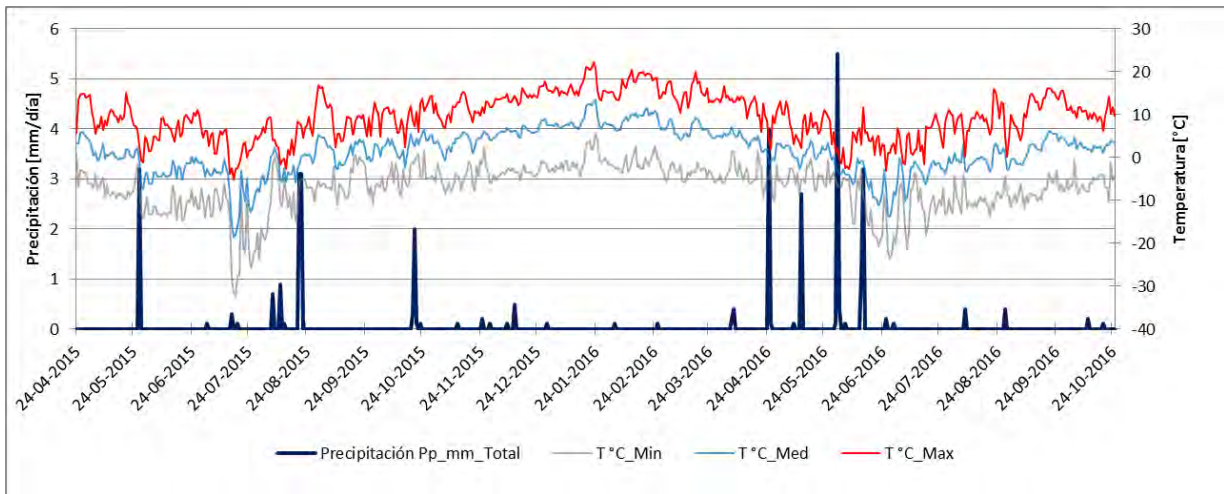


Figura 4-28. Climograma de precipitación vs temperatura registrada en la estación

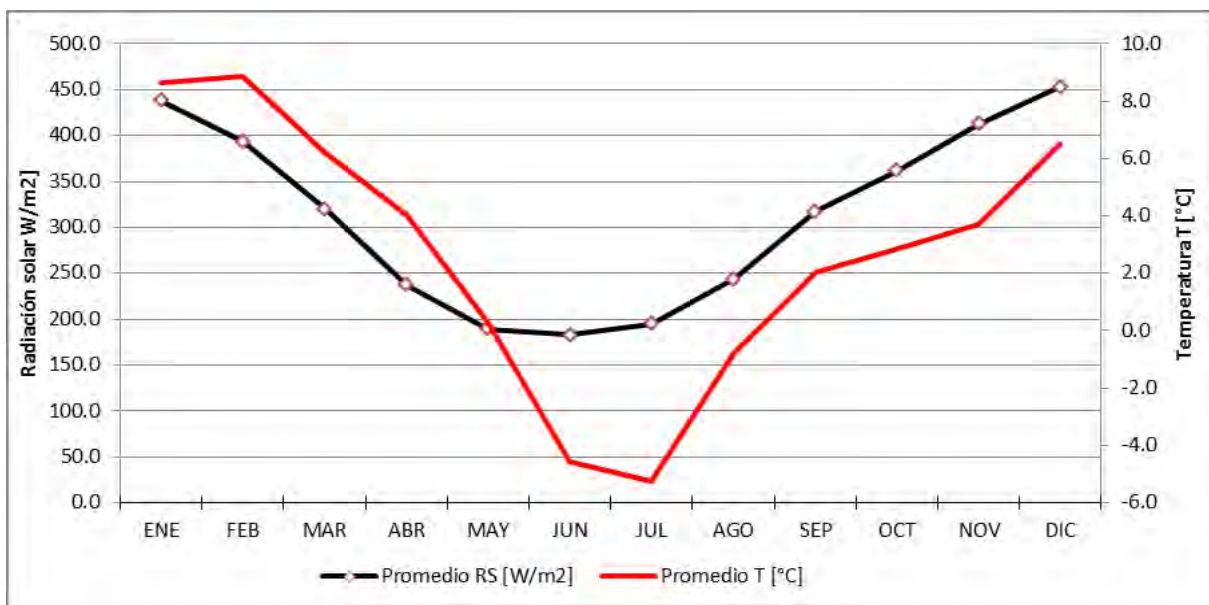


Figura 4-29. Diagrama de evolución de la radiación solar (RS) vs temperatura promedio en la estación.

Respecto al resto de la estaciones y tal como se pudo observar en la Tabla 4-10, la información meteorológica de mayor calidad se localiza en la cuenca del Río Jorquera, con 6 estaciones (Campamento, Caspiche Central, Río la Gallina-AL1, Planta Mina-AL2, Piedra Pómez (AL3) y Campamento-AL4,) con registro de 7 años (2008-2015). A pesar de que estas 6 estaciones se encuentran fuera del área de estudio, la información registrada en ella es de relevancia para los objetivos del presente estudio. Los datos de precipitación contemporáneos con los registros de las otras estaciones pueden ser objeto de análisis en busca de correlaciones entre las diferentes estaciones. Los datos registrados en estas estaciones son suficientes para calcular la evaporación mediante métodos empíricos. Los datos de precipitación, temperatura, humedad relativa pueden ser analizados en función de la altitud geográfica para entender su correlación (DGA-Arcadis, 2015).

Una variable de relevancia hidrológica para el presente estudio, registrada por algunas de las estaciones presentadas en la Figura 4-19, corresponde a la **altura de nieve en la zona y su evolución temporal**, ya que esta información permite analizar el comportamiento estacional de la recarga debido a aportes provenientes del deshielo. En este contexto, se presentan a continuación las series temporales de altura de nieve en las estaciones que contaban con registros de la calidad adecuada, las cuales son Campamento, Caspiche y Cuenca-1. Los valores medios anuales de nieve registrados son: 30,8 [cm] (Campamento); 44,68 [cm] (Caspiche) y 94,1 [cm] (Cuenca-1).

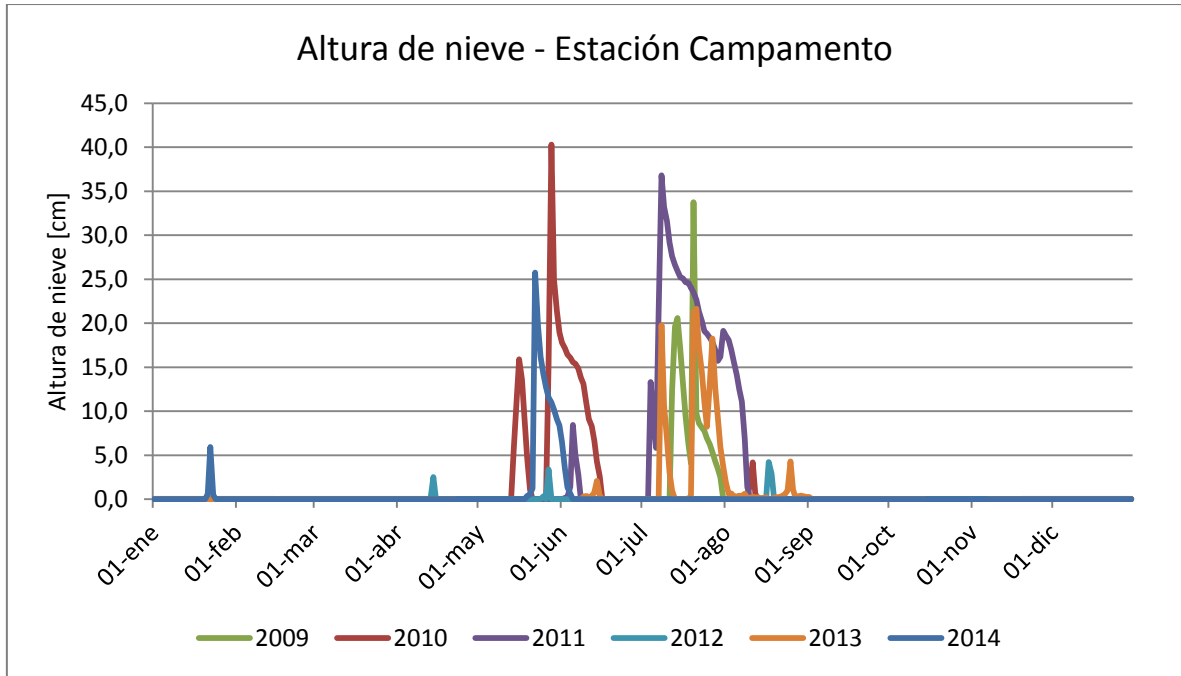


Figura 4-30: Evolución temporal de la altura de nieve, estación Campamento.

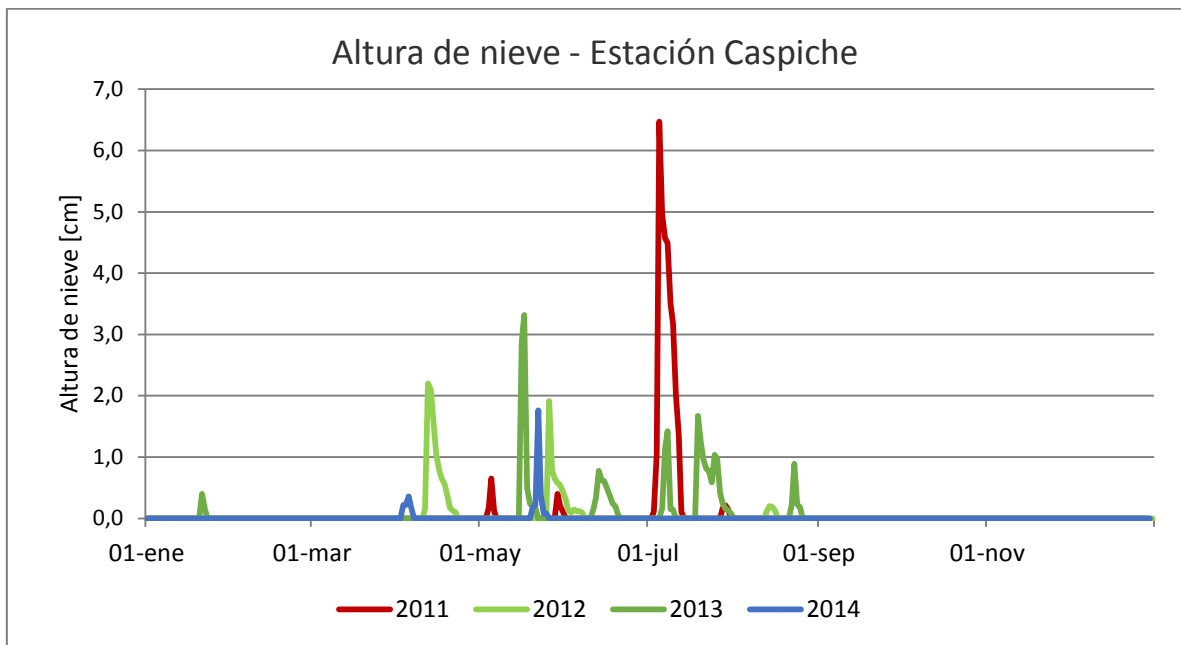


Figura 4-31: Evolución temporal de la altura de nieve, estación Caspiche.

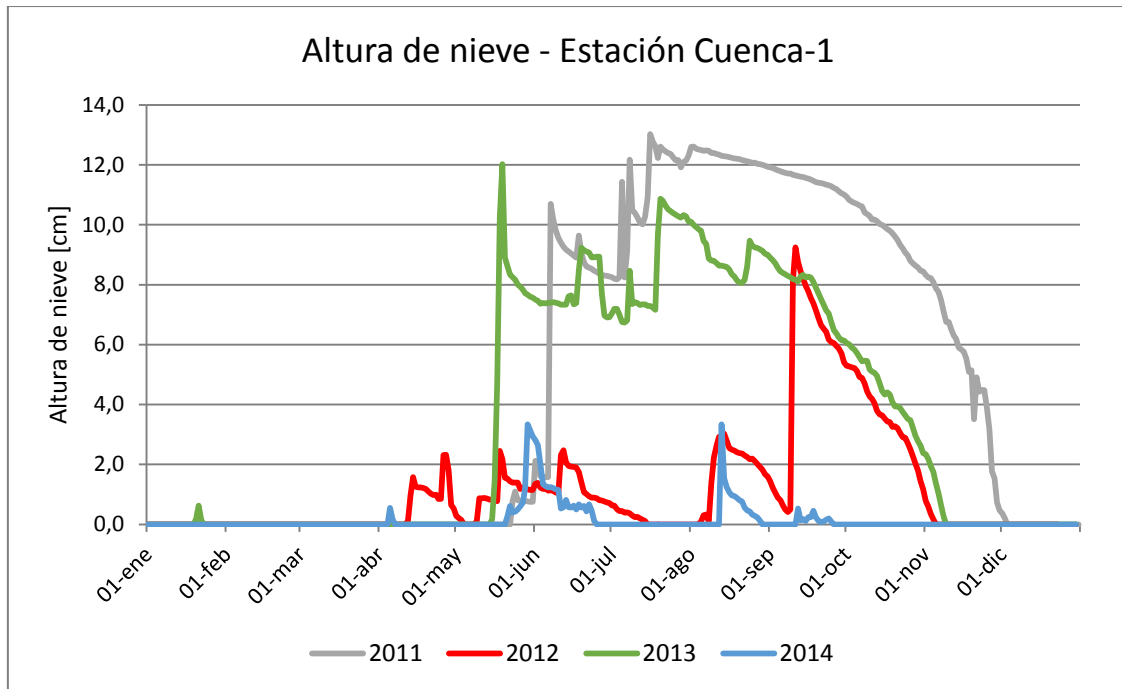


Figura 4-32: Evolución temporal de la altura de nieve, estación Cuenca-1.

En las figuras anteriores, se puede apreciar el comportamiento estacional de la cobertura nival, evidenciándose dos eventos de nevadas en las estaciones Campamento y Caspiche en los meses de Mayo y Agosto, aproximadamente; mientras que la estación Cuenca-1 presenta cobertura nival continua entre los meses de Mayo y Noviembre, lo cual es consistente con lo esperado ya que esta estación se encuentra a una cota de 4900 [msnm], la cual es considerablemente mayor que los 4.200 y 3.600 [msnm] correspondientes a las estaciones Caspiche y Campamento, respectivamente. Además, las alturas de nieve son mucho mayores en la estación Cuenca-1, ya que su elevada cota implica una disminución en las temperaturas, lo que explica la ocurrencia de precipitación sólida, a diferencia de lo que ocurre con las otras dos estaciones presentadas. Estas diferencias se presentan en la Figura 4-33 correspondiente al gradiente altimétrico de la altura de nieve y en la Tabla 4-12 se presenta un resumen de los eventos registrados en las estaciones analizadas.

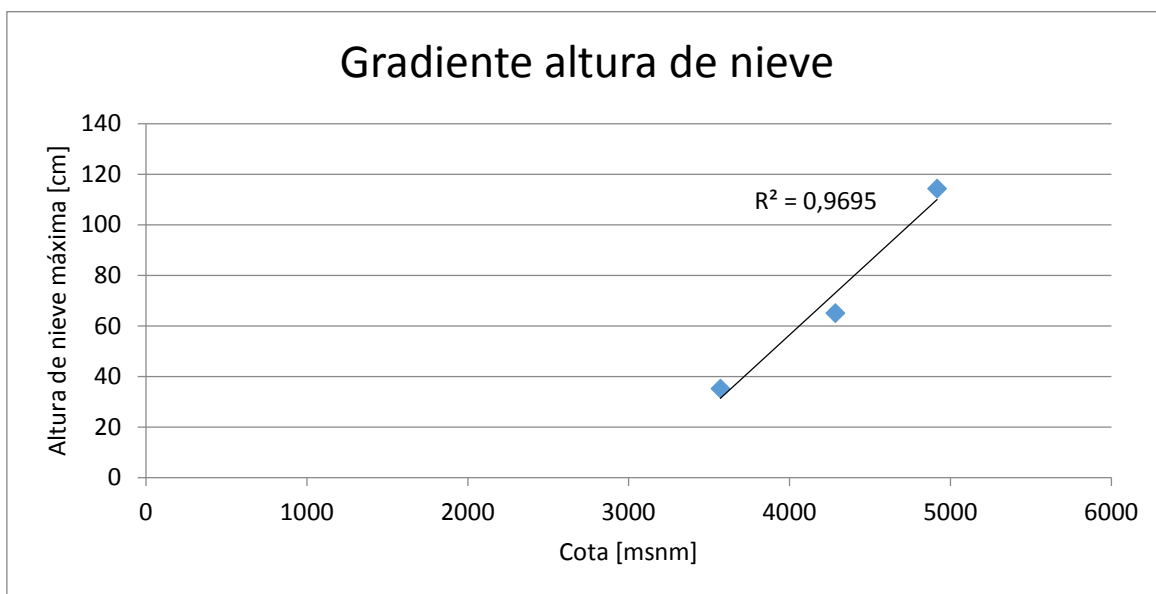


Figura 4-33: Gradiente altimétrico de altura de nieve máxima. Estaciones Campamento, Caspiche y Cuenca-1.

Tabla 4-12: Eventos nivales registrados en las estaciones meteorológicas

| Estación | Año | Altura máxima [cm] | Duración nieve [días] | Fecha Inicio | Observaciones |
|--------------|------|--------------------|-----------------------|--------------|---|
| Campamento | 2009 | 33,8 | 19 | 13-jul | Dos nevadas consecutivas |
| | 2010 | 40,3 | 20 | 28-may | Nevada de 15,9 [cm] 15-may |
| | 2011 | 36,8 | 37 | 05-jul | Nevada de 8,5 [cm] 4-jun |
| | 2012 | 4,2 | 4 | 15-ago | Poca nieve |
| | 2013 | 21,6 | 50 | 08-jul | Tres nevadas consecutivas durante el periodo |
| | 2014 | 25,8 | 17 | 20-may | Nevada de 5 [cm] mediados de enero |
| Caspiche | 2015 | 53,1 | 9 | 21-mar | Tormenta excepcional, generó aluviones en parte baja de la cuenca del Río Copiapó |
| | 2010 | 39,4 | 6 | 23-jun | Nevada 13 [cm] 2-oct |
| | 2011 | 64,7 | 11 | 06-jul | Nevadas de 5 [cm] en Mayo y Junio |
| | 2012 | 22 | 12 | 11-abr | Nevada de 20 [cm] 23 de Mayo, 14 días de duración |
| | 2013 | 33,2 | 7 | 16-may | Cuatro nevadas de 15 [cm] entre Junio y Agosto |
| | 2014 | 17,6 | 6 | 21-may | nevada de 3,5 [cm] Inicio de Abril |
| Cuenca 1 | 2015 | 91,2 | 32 | 21-mar | Tormenta excepcional, generó aluviones en parte baja de la cuenca del Río Copiapó |
| | 2011 | 130,3 | 194 | 22-may | Nieve con alturas en torno a 90 [cm] desde Mayo a Diciembre |
| | 2012 | 92,5 | 91 | 12-ago | Altura de nieve cercana a 10 [cm] desde Mayo a Agosto, con máximas de 30 [cm] |
| | 2013 | 120,2 | 178 | 15-may | Nieve con alturas en torno a 80 [cm] desde Mayo a Noviembre |
| Laguna Verde | 2014 | 33,4 | 35 | 22-may | Evento nival similar 16-ago, 33 [cm] 16 días de duración de nieve |
| | 2012 | 6,2 | 5 | 16-jun | Evento nival 7-ago, 4 cm y 10 días de duración de nieve. Estación OLD |
| | 2015 | 24,3 | 32 | 10-jul | Evento a inicios de Mayo de 15 [cm] y dos semanas de duración. Estación NEW |

En las cuencas Piedra Pómez, Salar Grande y Laguna Verde se dispone del registro de datos meteorológicos de las mismas características y periodo que las estaciones situadas en la cuenca del Río Jorquera y mencionadas anteriormente. Además de los análisis mencionados se podrán comparar los registros de las dos cuencas y buscar posibles correlaciones.

En la cuenca del Salar de Maricunga hay registro de dos estaciones entre abril-marzo de 2013 y noviembre del mismo año. Las dos estaciones dentro de la cuenca se sitúan a poca distancia por lo que la comparación de los parámetros comunes registrados puede usarse como validación.

La estación Chile-Maricunga identificada en las fases anteriores, según DGA-Arcadis, 2015 se sitúa en la cuenca del Río Jorquera, cerca de la cuenca de Laguna del Negro Francisco. El registro de esta estación tiene un periodo de más de 18 años, presentando mediciones de la evaporación junto con otros parámetros.

En la cuenca de la Laguna del Negro Francisco se dispone de datos por periodos de 2 y 5 meses. En el registro de la estación Refugio Belfort los datos de precipitación tienen poca fiabilidad, ya que según el análisis realizado por DGA-Arcadis (2015) tiene datos de precipitación horaria superiores a los 200 mm. Una vez eliminados estos datos erróneos la lámina de agua acumulada es de casi 2 m, precipitación que no corresponde a la climatología de la zona.

De los datos disponibles dentro del área de estudio, la cuenca con mejor registro es la cuenca Piedra Pómez por tener un registro de los parámetros más relevantes como precipitación, velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, y radiación solar por un periodo de 4 años entre el 2010 y el 2013 ambos incluidos (DGA-Arcadis, 2015).

5. Geología y suelos de salar

En el presente capítulo se exponen los aportes más relevantes generados durante este proyecto en lo referente a geología y cartografía preliminar de suelos de los salares. Cabe mencionar que en los informes individuales estos capítulos se presentan de manera más específica y extensa para cada cuenca en particular.

5.1 Geología

Las principales tareas referentes a **geología** han sido:

- Recopilación de todos los mapas geológicos de la zona de estudio incluyendo mapas tanto chilenos como argentinos. Durante la Fase 1, DGA-Aquaterra (2013) recopiló y elaboró mapas geológicos en 9 de las 34 cuencas, los cuales fueron utilizados en los informes individuales de las cuencas correspondientes.
- Se ha caracterizado la geología de cada una de las 34 cuencas de estudio a partir de los mapas geológicos oficiales del SERNAGEOMIN y SEGEMAR. Esta actividad se ha clasificado y ordenado en Depósitos no consolidados, Rocas Estratificadas, Rocas Intrusivas y Conjuntos Volcánicos, cuando corresponda.
- 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. En los informes individuales se han expuesto las más representativas.
- Se han recopilado 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.
- Finalmente, se ha concentrado toda esta información en un proyecto SIG de modo de poder facilitar su visualización.

En la Figura 5-1 se presenta un mapa resumen que muestra aquellas zonas cubiertas por mapas geológicos y aquellas que no.

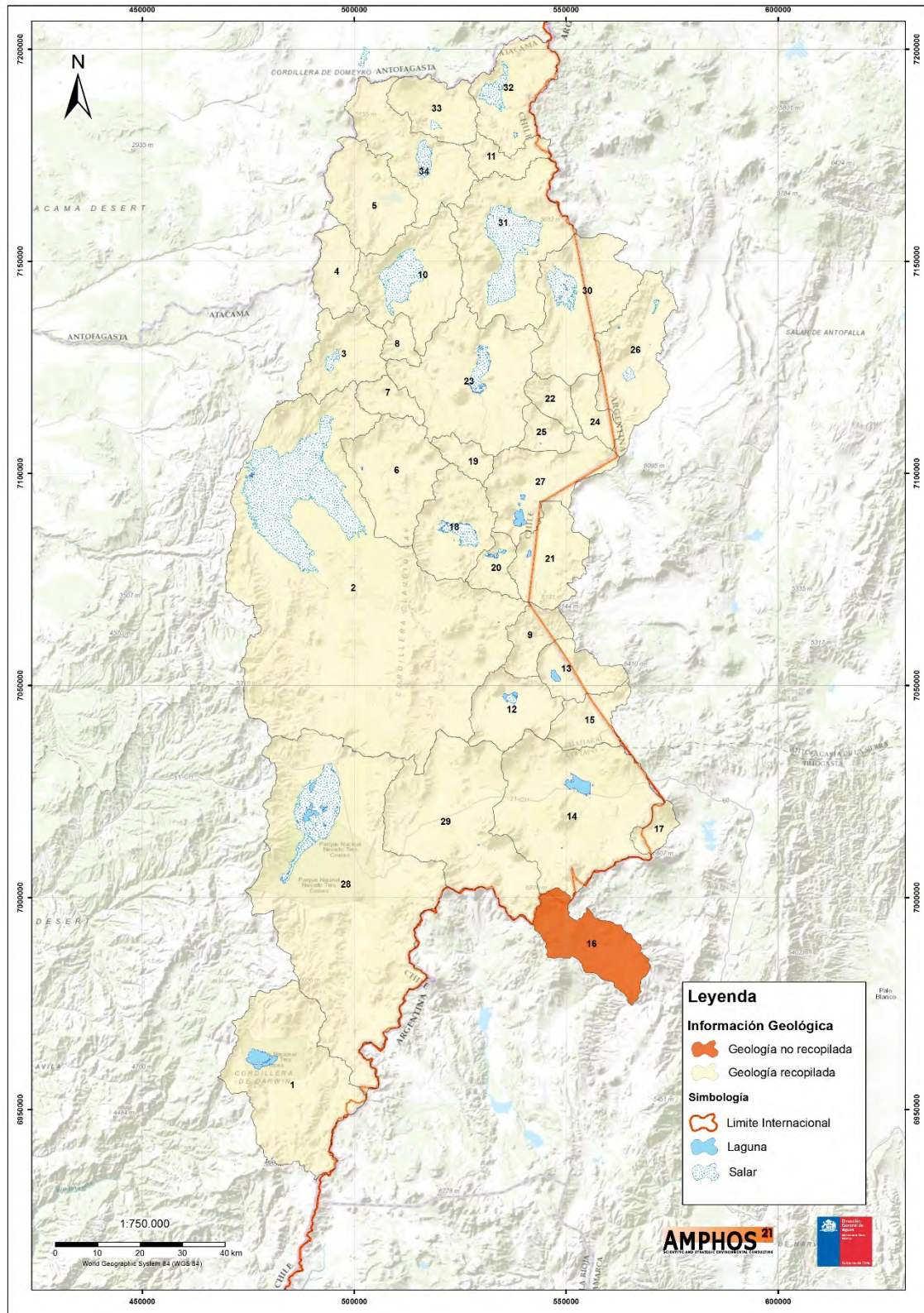


Figura 5-1: Resumen de la información geológica recopilada.

5.2 Cartografía Preliminar de Suelos

Durante la ejecución de los trabajos de esta Fase 3 se ha confeccionado una **cartografía preliminar de tipos de suelo del salar** para aquellas cuencas que poseen este tipo de formación. Corresponden a cartografías básicas, elaboradas en base a análisis de imágenes satelitales cuyo objetivo es exponer una idea referencial de la tipología de suelos de los salares (Figura 5-2).

Se distinguió la siguiente tipología de suelo cuyas características son las que siguen:

a) Suelo 1: Salino Reciente

- ✓ Zonas de recarga
- ✓ Zonas de transición de agua dulce y agua salada
- ✓ Nivel freático somero
- ✓ Suelos en constante formación por precipitación química de sales.
- ✓ Alta reflectividad

b) Suelo 2: Transicional entre 1 y 3

- ✓ Presenta características intermedias entre los suelos 1 y 3.

c) Suelo 3: Núcleo Salino

- ✓ Baja reflectividad
- ✓ Baja permeabilidad
- ✓ Presencia de una costra salina
- ✓ Nivel de agua más profundo

d) Suelo 4: Suelo Salino-Clástico

- ✓ Baja reflectividad
- ✓ Sedimentación particulada. Mezcla de sales y sedimentos clásticos.
- ✓ Nivel de agua profundo

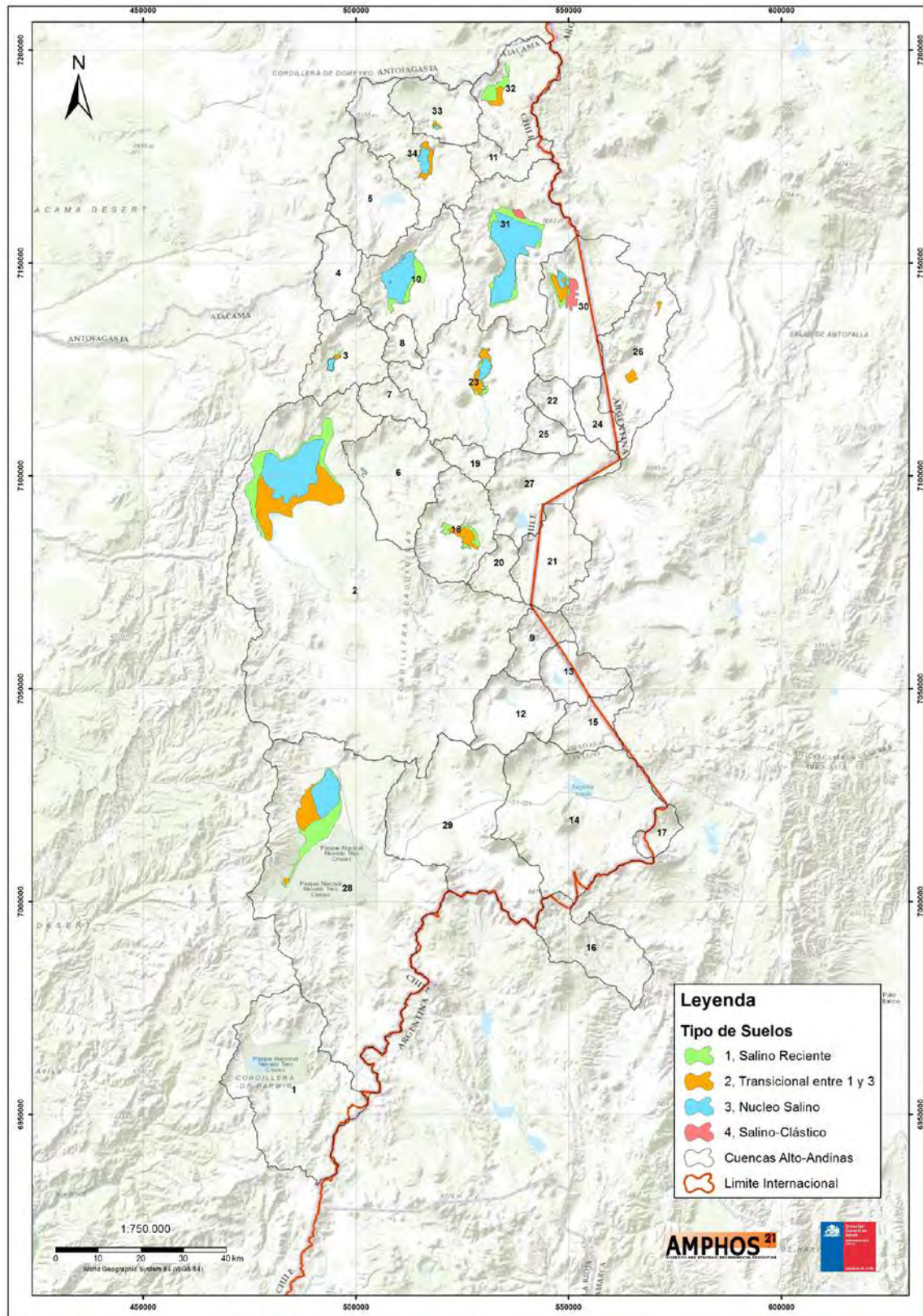


Figura 5-2: Mapa resumen de la cartografía preliminar del tipo de suelos de salar

6. Geofísica

En este capítulo se exponen los aportes más relevantes generados en este estudio referentes al tema geofísico. Se distingue entre la geofísica histórica y la ejecutada durante el transcurso del presente proyecto (Fase 1, 2 y 3)

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 destaca lo siguiente:

- Se ha proyectado la totalidad de la geofísica histórica en el 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 toda la información recabada, se ha utilizado la información más relevante de las prospecciones geofísicas para validar y esclarecer conexiones laterales inter cuencas, 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. A continuación se resumen las principales conclusiones de los estudios geofísicos ejecutados durante este proyecto, separándolos por Fase.

Adicionalmente, en la Figura 6-1 se presenta un resumen de la distribución de las prospecciones geofísicas históricas y las referentes a cada una de las Fases de este proyecto.

6.1.1 Fase 1, DGA-Aquaterra (2013)

Se realizaron prospecciones de Transiente Electromagnético (TEM), a cargo de la empresa Geodatos, en 4 cuencas. Las estaciones fueron distribuidas sin generar perfiles geofísicos y se resumen en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1: Resumen Prospecciones Geofísicas realizadas durante la Fase 1.

| Nombre Cuenca | N° Cuenca | Cantidad de estaciones TEM |
|-----------------------------|-----------|----------------------------|
| La Laguna | 6 | 3 |
| Laguna Verde | 14 | 7 |
| Piedra Pómez | 28 | 4 |
| Laguna del Negro Francisco | 1 | 6 |
| Total Estaciones TEM | | 20 |

6.1.2 Fase 2, DGA-Arcadis (2015)

Durante esta Fase del proyecto, se ejecutó 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.

Dentro de la cuenca Laguna del Negro Francisco, se repartieron las estaciones TEM en 11 perfiles a modo de caracterizar las unidades geoelectricas en subsuperficie y una posible interpretación hidrogeológica para ellos. Los perfiles se ubicaron en zonas en que las distintas quebradas llegan al llano sedimentario más amplio y profundo, donde se encuentra la laguna.

En la cuenca del Salar de Maricunga, se realizaron 5 perfiles TEM repartidos en 2 grupos; 2 perfiles en el límite noroeste de la cuenca para estimar la posible conexión subterránea de agua con la cuenca del Salar de Pedernales. Los 3 perfiles restantes se ubicaron en la salida de una quebrada situada al suroeste con el objeto de estudiar el aporte hídrico de las subcuencas aportantes.

En la Tabla 6-2 se presenta el resumen de los perfiles realizados indicando su longitud, número de estaciones, diámetro de la espiral y separación entre estaciones TEM. En total

se realizaron 100 ensayos TEM con espirales de 50 y 100 metros que corresponden a una longitud total del orden de 30 km de perfiles.

Tabla 6-2: Resumen Prospecciones Geofísicas realizadas durante la Fase 2.

| Identificación | Longitud (m) | Nº Estaciones TEM | Espiral TEM (m) | Separación promedio (m) | Ubicación |
|----------------|--------------|-------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|
| 1A | 1.150 | 5 | x50 | 288 | S. Lag. Negro Fco |
| 1B | 825 | 3 | x50 | 413 | S. Lag. Negro Fco |
| 2A | 2.750 | 7 | x100 | 458 | S. Lag. Negro Fco |
| 2B | 900 | 3 | x50 | 450 | S. Lag. Negro Fco |
| 5B | 670 | 4 | x50 | 223 | SE. Lag. Negro Fco |
| 6A | 930 | 5 | x100 | 233 | N. Lag. Negro Fco |
| 6B | 1.020 | 3 | x50 | 510 | N. Lag. Negro Fco |
| 7A | 3.670 | 9 | x100 | 459 | E. Lag. Negro Fco |
| 7B | 880 | 3 | x50 | 440 | E. Lag. Negro Fco |
| 8A | 630 | 3 | x50 | 315 | N. Lag. Negro Fco |
| 8B | 1.030 | 4 | x50 | 343 | N. Lag. Negro Fco |
| M1A | 3.850 | 12 | x100 | 350 | NE Salar de Maricunga |
| M1B | 5.070 | 20 | x100 | 267 | NE Salar de Maricunga |
| M2A | 3.800 | 9 | x50 | 475 | S Salar de Maricunga |
| M2B | 970 | 8 | x50 | 139 | S Salar de Maricunga |
| M2C | 930 | 2 | x50 | 930 | S Salar de Maricunga |
| TOTAL | 30.085 | 100 | | | |

Fuente: Modif. DGA-Arcadis (2015)

6.1.3 Fase 3, DGA-Amphos 21 (2016)

La geofísica referente a la Fase 3 fue ejecutada por la empresa Geodatos en los puntos de interés. Se realizó prospección geofísica mediante el método de Transiente Electromagnético (TEM) y de Gravimetría en dos sectores: borde oriental del Salar de Maricunga y en Pampa Pantanillo, límite entre la cuenca del Salar de Maricunga y Laguna del Negro Francisco (ver Figura 6-2 para ubicación).

El objetivo del estudio geofísico fue complementar la información geofísica obtenida en las Fases 1 y 2 del presente proyecto, de modo de poder obtener modelos conceptuales de mayor detalle. Además, se busca esclarecer la existencia de conexiones entre las diferentes

cuencas así como la geometría y nivel freático de los diferentes acuíferos existentes en el área de estudio.

Las bases técnicas, que originalmente consistían en la materialización de 90 estaciones TEM y 90 estaciones de prospección gravimétrica, fueron modificadas según previo acuerdo con la DGA (Minuta de reunión 6, entre Amphos21, DGA y Geodatos, el 21-03-2016). Se disminuyen las estaciones gravimétricas en pos de mayor cantidad de estaciones TEM.

Las prospecciones consistieron en la ejecución de 58 estaciones TEM en el sector oriental del Salar de Maricunga distribuidas en 7 perfiles. A su vez, en el sector Pampa Pantanillo se midieron 40 estaciones TEM y 60 gravimétricas formando 6 perfiles (Tabla 6-3, Tabla 6-4, Tabla 6-5 y Figura 6-2).

Tabla 6-3: Detalle estaciones TEM medidas. Sector Salar de Maricunga.

| Sector | Perfil TEM | Estaciones | Longitud [m] |
|--------------------|--------------|------------|--------------|
| Salar de Maricunga | M1 | 11 | 6995 |
| | M2 | 12 | 7687 |
| | M3 | 12 | 7692 |
| | M4 | 4 | 2095 |
| | M5 | 13 | 8330 |
| | M6 | 4 | 2108 |
| | M7 | 8 | 4897 |
| | Total | 58 | 39804 |

*Como los perfiles son consecutivos comparten una estación entre ellos, totalizando 58 y no 64 estaciones.

Tabla 6-4: Detalle estaciones TEM medidas. Sector Pampa Pantanillo

| Sector | Perfil TEM | Estaciones | Longitud [m] |
|------------------|--------------|------------|--------------|
| Pampa Pantanillo | P1 | 4 | 343 |
| | P3 | 7 | 609 |
| | P4 | 7 | 600 |
| | P5 | 3 | 83 |
| | P6 | 2 | 40 |
| | P7 | 17 | 3187 |
| | Total | 40 | 4862 |

Tabla 6-5: Detalle estaciones Gravimétricas medidas. Sector Pampa Pantanillo

| Sector | Perfil Grav | Estaciones | Longitud [m] |
|------------------|--------------|------------|--------------|
| Pampa Pantanillo | P1 | 8 | 697 |
| | P3 | 11 | 1004 |
| | P4 | 11 | 1001 |
| | P5 | 7 | 266 |
| | P6 | 6 | 178 |
| | P7 | 17 | 3191 |
| | Total | 60 | 6337 |

6.1.3.1 Resultados

Los resultados e interpretación de los perfiles geofísicos se exponen a continuación. Adicionalmente, se adjunta el Anexo 4: Geofísica Fase 3 con el detalle de los trabajos de terreno, descripción de los métodos geofísicos, procesos de inversión de datos, resultados y conclusiones elaboradas por Geodatos.

i. Sector Pampa Pantanillo

A partir de la información generada por la empresa Geodatos y el conocimiento más acabado que se tiene de la geología e hidrogeología de la cuenca, se procede a ajustar la interpretación propuesta por el subcontratista, definiendo las siguientes unidades geoelectricas (UG):

- **Unidad resistiva superficial (UG1):** Presenta valores de resistividad entre 180 y 2769 [Ohm-m]. Desarrolla continuidad horizontal y se orienta paralela a la superficie, con pequeñas ondulaciones asociadas al horizonte de la siguiente unidad. Potencia de 20 a 30 m. Se asocia a depósitos sedimentarios secos o de baja humedad, compuestos por material aluvial y coluvial de diversa granulometría.
- **Unidad de media conductividad (UG2):** Presenta valores de resistividad entre 30 y 140 [Ohm-m]. Desarrolla continuidad horizontal y su potencia varía entre 40 y 60 m. Se interpreta como gravas y arenas saturadas, a partir de información litológica disponible de diversos sondajes existentes, tales como EA-1, EA-2 y EA-6 (Sernageomin, 1998) [Ref. 32], y RPG-21, RPG-32, RPG-38 (EIA Proyecto Lobo Marte, 2011) [Ref. 18]. Esta UG se correlaciona con la unidad acuífera principal, donde el nivel piezométrico se ha registrado entre 8 y 30 m de profundidad.

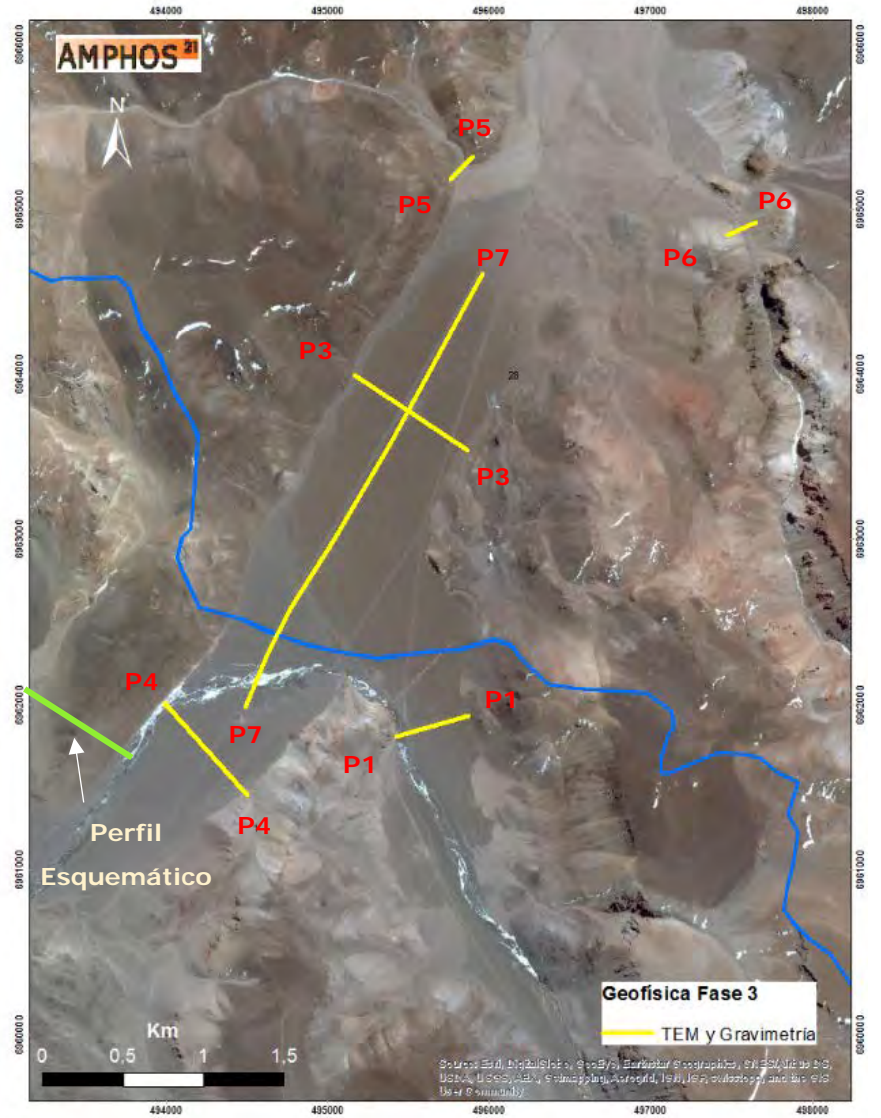


Figura 6-2: Ubicación de la Geofísica realizada en la Fase 3. Izq: Salar de Maricunga. Der: Pampa Pantanillo

- **Unidad resistiva (UG3):** Presenta valores de resistividad entre 200 y 786 [Ohm-m]. Su potencia varía entre 34 y 154 m. Se interpreta como rocas volcánicas donde los valores de resistividad más altos denotan menor grado de alteración. Se observa que podrían corresponder a la continuación de rocas volcánicas visibles en superficie (lavas volcánicas posiblemente del OMmv), que forman parte del basamento y en ocasiones se presentan de forma somera conformando singularidades en la hidrogeología local, generando por ejemplo la divisoria de aguas subterráneas visible en el perfil P7.
- **Unidad conductora (UG4):** Presenta valores de resistividad de 2 a 23 [Ohm-m]. Subyace a la UG2 y en algunos perfiles se encuentra intercalada con la UG3. Su potencia varía entre 60 y 200 m. Se interpreta como tobas arcillosas, donde los valores de resistividad más bajos indicarían mayor contenido de arcillas. Este material conforma el basamento o bien depósitos muy poco permeables asociados a ignimbritas del Oligoceno Mioceno.

Conclusiones:

El Perfil P1, ubicado perpendicular al río Astaburuaga, permite caracterizar el acuífero del río inmediatamente aguas arriba de Pampa Pantanillo. Éste corresponde a un acuífero libre que se desarrolla en el relleno sedimentario depositado en el eje de la quebrada el cual, de acuerdo al perfil, alcanzaría su potencia máxima en la sección central, donde presenta valores del orden de 300 m, y se reduce hacia los extremos donde afloran las formaciones de roca volcánica del basamento. Cabe destacar que, de acuerdo a revisión de columnas litológicas e información de pozos existentes, el perfil TEM indicaría el nivel base del acuífero de mejor modo que el perfil gravimétrico, posiblemente debido a la existencia de roca alterada somera que afecta la precisión del último método.

El perfil P4, también perpendicular al río Astaburuaga, caracteriza el acuífero del río aguas abajo de Pampa Pantanillo. Se confirma la continuidad horizontal del relleno sedimentario en cual se desarrolla el acuífero libre. A diferencia del perfil P1, la potencia determinada alcanza valores máximos del orden de 130 m, presentando un nivel basal sinuoso que implica variaciones en el espesor de la unidad acuífera, la cual desaparece hacia los extremos del perfil donde aflora la roca volcánica.

El perfil P7 (Figura 6-4), emplazado en la Pampa Pantanillo con orientación SW-NE, permite explorar las condiciones hidrogeológicas en el límite de las cuencas Laguna del Negro

Francisco y Salar de Maricunga. El perfil gravimétrico permite confirmar la continuidad longitudinal de la unidad acuífera principal, que se desarrolla en el relleno sedimentario existente. El nivel basal se presenta como un horizonte sinuoso, en el cual se producen singularidades que modifican la potencia del acuífero y condicionan la dirección del flujo subterráneo en la vecindad de la divisoria de aguas. El espesor mínimo registrado, de 48 m, se ubica inmediatamente al NE del río Astaburuaga, mientras que los valores máximos se encuentran hacia el SW y NE de este punto, alcanzando valores del orden de 150 m.

El perfil TEM, además, presenta un núcleo de muy baja resistividad eléctrica, distante aproximadamente 900 m hacia el NE de la divisoria de aguas de superficie, es decir en la cuenca Salar de Maricunga. Esta zona de muy baja resistividad se asocia a coladas de lava de época Mioceno, coincidente con las formaciones que se observan a ambos lados del cauce, lo cual conformaría una barrera hidrogeológica entre ambas cuencas que controla el flujo preferente del río Astaburuaga hacia el SW, así como de los flujos subterráneos del acuífero hacia la cuenca del Salar del Negro Francisco.

En la Figura 6-3 se presenta un perfil esquemático donde se ha calculado el flujo subterráneo mediante Darcy, resultando un caudal entre 140 y 230 l/s.

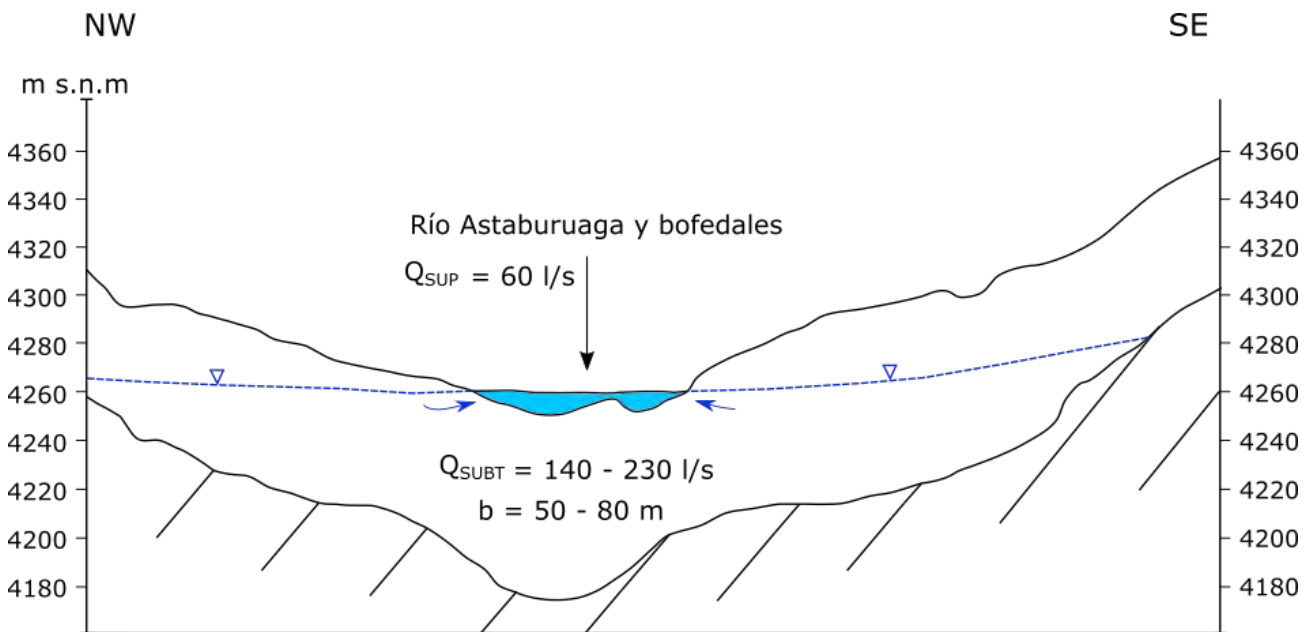


Figura 6-3: Perfil esquemático del sector Pampa Pantanillo, límite entre las cuencas Laguna del Negro Francisco (C1) y Salar de Maricunga (C28). Elaboración propia.

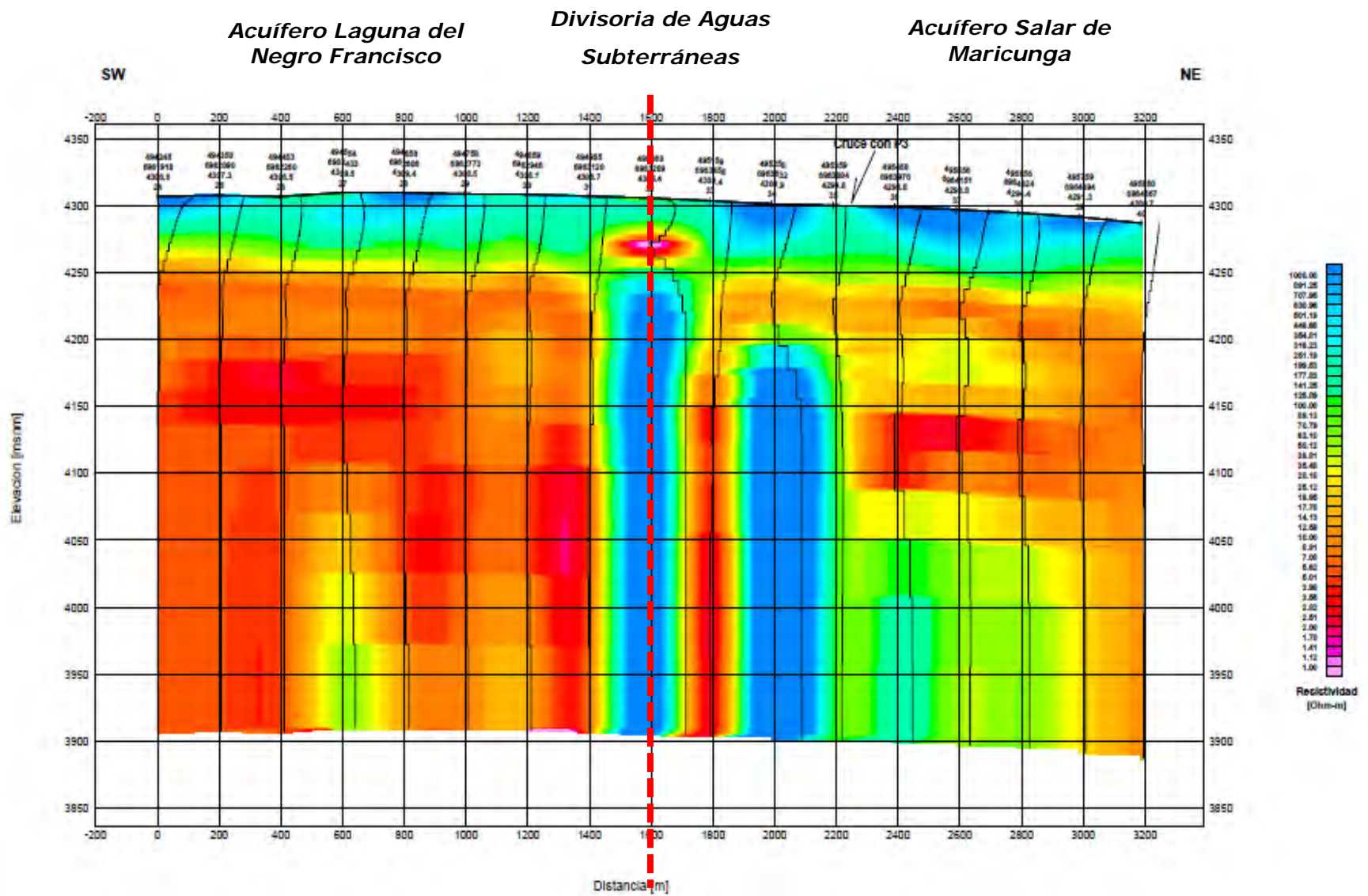


Figura 6-4: Perfil TEM P7, en sentido longitudinal al cauce en sector Pampa Pantanillo (DGA-Amphos21, 2016)

ii. Sector Salar de Maricunga

En el sector del Salar de Maricunga se levantó un total de 7 perfiles TEM, representando en aproximadamente 40 km lineales de exploración, los cuales se ubicaron paralelos al margen oriental y norte del salar, comenzando en el sector de la Laguna Santa Rosa y extendiéndose en dirección NE sobre material sedimentario seco, tal como se muestra en la Figura 6-2. El trabajo se realizó mediante la instalación de 58 estaciones TEM, colocadas a una distancia de aproximadamente 700 m entre sí (Figura 6-2).

A partir de la información recolectada y la revisión de antecedentes disponibles, se definen 4 unidades geoelectricas principales:

- **Unidad resistiva superficial (UG1):** Valores de resistividad > 100 [Ohm-m]. Presenta continuidad horizontal y se orienta paralela a la superficie, con mayor desarrollo hacia el sur del salar, donde se registran las mayores potencias. Su espesor registrado varía entre 3 y 7 m. Se asocia a depósitos aluviales secos, compuestos por material aluvial y coluvial de diversa granulometría.
- **Unidad de media conductividad (UG2):** Valores de resistividad entre 15 y 80 [Ohm-m]. Subyace a la UG1. La potencia de la UG2 se encuentra entre 20 y 100 m, siendo de mayor relevancia hacia el sur del salar. Se interpreta como gravas de granulometría gruesa, posiblemente húmedas y/o saturadas. Los valores de resistividad mayores se asocian con predominancia de material granular sobre la matriz.
- **Unidad conductora (UG3):** Valores de resistividad menores a 1 [Ohm-m]. Subyace a la UG2. Presenta continuidad lateral entre todos los perfiles. Su potencia varía entre 107 y 270 m, siendo más somero hacia el norte del Salar. Se interpreta como depósitos salinos constituidos por arcillas y limos salinos húmedos y/o saturados. Los valores de resistividad más bajos indicarían mayor contenido de salmueras.
- **Unidad de media conductividad (UG4):** Valores de resistividad entre 15 y 80 [Ohm-m]. Subyace a la UG-3. Se identifica como unidad característica del basamento.

Conclusiones

A partir del análisis de los perfiles TEM, se destacan las siguientes observaciones:

- a) En términos generales, los perfiles TEM muestran una estratificación horizontal regular que se desarrolla a lo largo de todos los perfiles, posiblemente asociada a secuencias de material sedimentario no consolidado de constitución no homogénea, con variaciones en el grado de saturación y/o contenido salino de las aguas subterráneas. Se presentan variaciones suaves en la potencia de las UG, reconocidas principalmente en la zona central del perfil M3 y hacia el extremo N del salar, en el perfil M5.
- b) En relación a la resistividad, se aprecia que los materiales más resistivos se encuentran en superficie (UG1), posiblemente asociados a la existencia de suelos granulares con bajo contenido de finos, normalmente secos a nivel superficial, y a la recarga lateral del salar con agua con menor contenido salino respecto a la que satura las unidades más profundas. Este estrato presenta su mayor desarrollo en el extremo sur del salar (50 m en el sector Laguna Santa Rosa) y decrece hacia el norte, hasta desaparecer entorno al perfil M3 y reaparecer de forma intermitente en el perfil M5. Este desarrollo coincide con la zona mayormente influenciada por el llano Ciénaga Redonda y la depositación de abanicos aluviales.
- c) En profundidad se aprecia un decaimiento en la resistividad medida, lo cual es indicativo de mayor presencia de materiales finos (limos, arcillas) y/o un incremento en el contenido de sales disueltas de las aguas subterráneas almacenadas.
- d) En todos los perfiles se observa un horizonte basal en el cual se presenta un incremento abrupto de resistividad (UG3), en profundidades de 140 a 350 m. Este cambio se asocia al nivel de basamento del salar, bajo el cual se reduce notoriamente su desarrollo. En ausencia de sondajes de exploración no es posible evaluar el potencial acuífero de esta unidad.

7. Hidroquímica

En este capítulo se presentan los aportes más relevantes generados en este proyecto en lo que respecta a hidroquímica. Se distingue entre la hidroquímica histórica y la realizada durante el transcurso del presente estudio (Fase 2 y Fase 3).

Los aspectos generales más relevantes se resumen a continuación (ver Figura 7-1 para complementar el texto):

- Se recopiló una gran cantidad de información a partir de diversos documentos como EIA's 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 filtrar aquellos estudios cuya analítica fuera de fácil 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 recopilados, se rescataron 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 sulfato, cloruro, 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.**

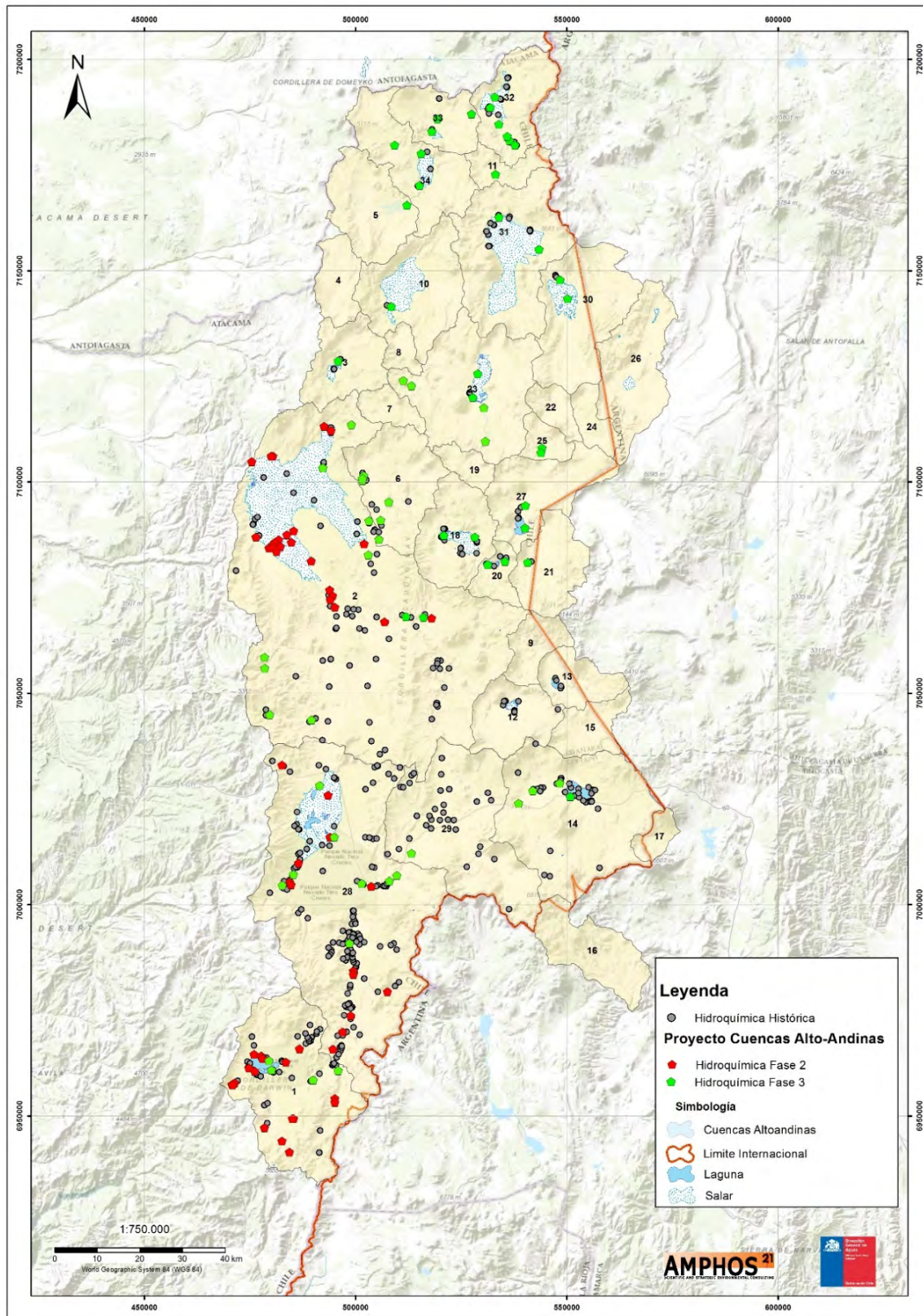


Figura 7-1: Distribución de la hidroquímica histórica y la referente a este proyecto.

Procesos en la evolución química del agua

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 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 derrite.

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. 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. 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 disolución de sales evaporíticas. Dichas aguas de descarga son, predominantemente, de facies clorurada-sódica y tiene una conductividad eléctrica muy elevada ($>100.000 \mu\text{S}$) (Figura 7-2). 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 la 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.

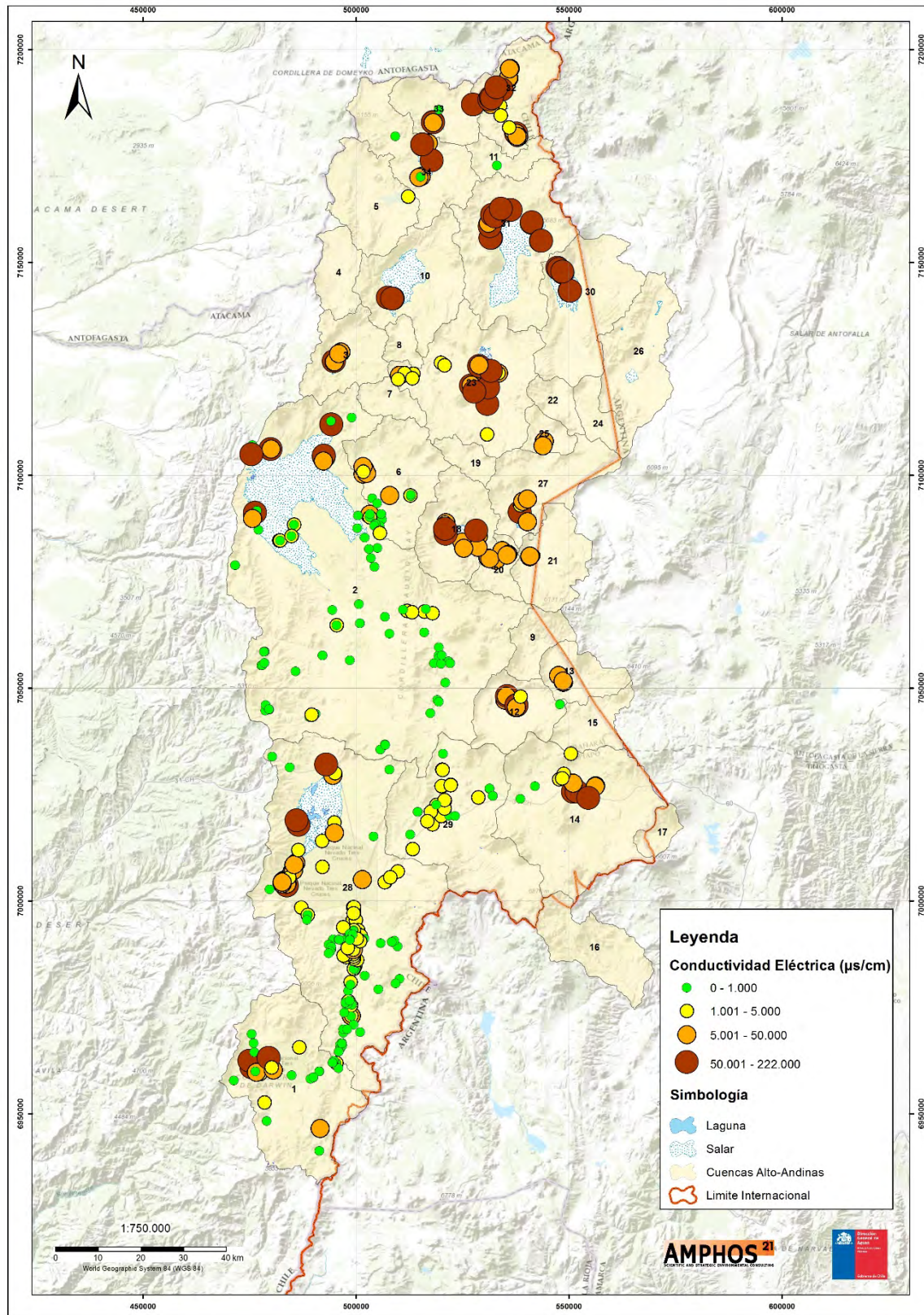


Figura 7-2: Mapa regional con la distribución de Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

8. Hidrología

A partir del modelo conceptual hidrogeológico se ha realizado el balance hídrico de cada una de las 34 cuencas Alto-Andinas analizadas. Para llevar a cabo lo anterior, se ha seguido la metodología que se describe a continuación:

8.1 Análisis hidrológico

Esta sección contempla la cuantificación de las entradas y salidas del sistema a partir de herramientas hidrológicas, junto con la interacción entre estas y el suelo. En este sentido, se destacan cuatro etapas:

8.1.1 Análisis de la precipitación

De acuerdo los estudios realizados por DGA-Aquaterra (2013) y DGA-Arcadis (2015), en la zona de estudio 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 las cuencas Alto Andinas, DICTUC (2009) y Golder (2011) señalan que las precipitaciones producidas son del tipo orográficas, donde las tormentas de invierno (nivales) son la principal fuente hídrica, y la influencia de tormentas estivales es menor con la ocurrencia de tormentas remanentes (que generan precipitación líquida) del denominado "Invierno Boliviano o Altiplánico". Si bien en la zona de estudio se ha creado una base de datos hidrológicos y una red de estaciones meteorológicas (15 en total) -en su mayoría pertenecen a empresas mineras-, que cuentan con un registro de datos horarios de diferentes parámetros meteorológicos, principalmente precipitación, altura de nieve, velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa, presión atmosférica y radiación solar. Sin embargo, a excepción de la estación Chile-Maricunga (que cuenta con 18 años de datos), los registros de datos son muy cortos (menos de 5 años) y las estaciones **no siempre cuentan con instrumentos que permitan medir eficientemente tanto la precipitación líquida como la sólida**, lo cual dificulta dilucidar si la precipitación sólida es un aporte importante para la recarga.

De acuerdo al análisis de antecedentes hidrológicos, 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 en la zona de interés se han utilizado distintas metodologías para estimar la precipitación, las cuales

se han fundamentado en la generación de isoyetas (DGA, 1987; DICTUC, 2009; DGA-Aquaterra, 2013; DGA-Arcadis, 2015) a partir de registros meteorológicos existentes en otras cuencas cercanas.

En este sentido y dado la disponibilidad de información se ha optado por usar dicho método para estimar la precipitación incorporando los registros de todas las estaciones cercanas (públicas y privadas) y comparándolo con las isoyetas generadas por los estudios DGA (1987), DICTUC (2009), DGA-Aquaterra, 2013; DGA-Arcadis (2015). El detalle de la metodología del análisis de la precipitación se describe en profundidad en cada uno de los 34 informes individuales. En la Figura 8-1 se presentan las isoyetas precipitación media anual [mm/año] generadas en este estudio y en la Tabla 8-1 la comparación con los estudios anteriores.

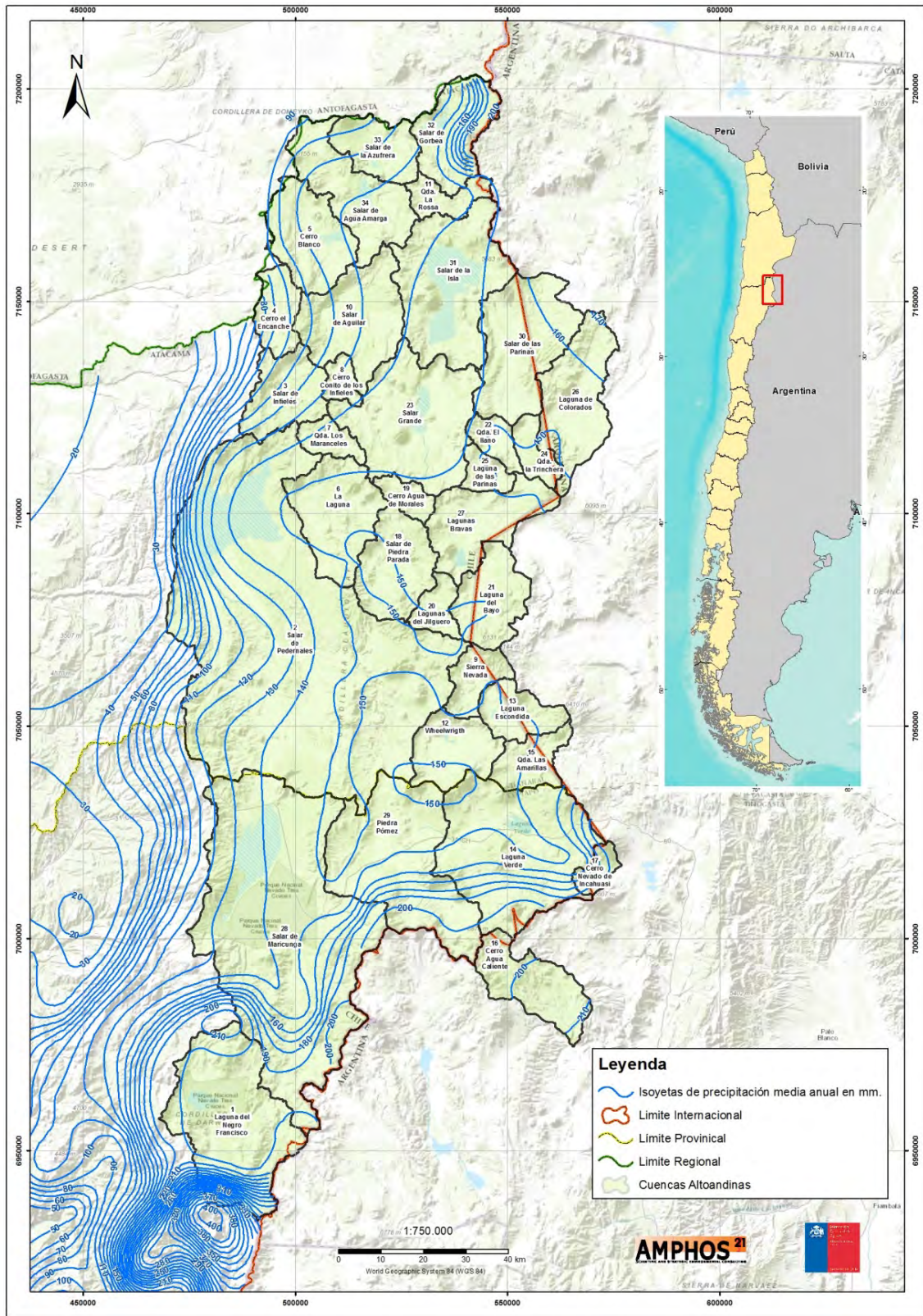


Figura 8-1: Isoyetas de precipitación media anual [mm/año] en las cuencas Alto-Andinas.

Tabla 8-1: Estimación de precipitación media anual y comparación con estudios previos

| N° Cuenca | Nombre cuenca | Altitud | Área | Pp media B. Hídrico Chile (1987) | Pp media DICTUC (2009) | Pp media Aquaterra (2013) | Pp media II Región ARCADIS (2015) | Pp media Huasco ARCADIS (2015) | Pp media ARCADIS (2015) | Pp media Isoyetas (Amphos 21, 2016) |
|-----------|------------------------------|------------|--------|----------------------------------|------------------------|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| | | [m.s.n.m.] | [km²] | [mm/año] | [mm/año] | [mm/año] | [mm/año] | [mm/año] | [mm/año] | [mm/año] |
| 1 | Laguna del Negro Francisco | 4.547 | 905,4 | 200 | 200 | 197 | 130 | 218 | 174 | 214 |
| 2 | Salar de Pedernales | 3.996 | 3587,7 | 128 | 127 | 145 | 100 | 194 | 147 | 133 |
| 3 | Salar de Infieles | 4.040 | 304,6 | 104 | 108 | 132 | 103 | 196 | 150 | 116 |
| 4 | Cerro el Encanche | 4.268 | 176,3 | 63 | 100 | 62 | 115 | 206 | 161 | 94 |
| 5 | Cerro Blanco | 4.023 | 379,3 | 98 | 109 | 112 | 102 | 195 | 149 | 119 |
| 6 | La Laguna | 4.205 | 456,9 | 141 | 140 | 153 | 112 | 203 | 158 | 149 |
| 7 | Qda. Los Maranceles | 4.389 | 107,1 | 124 | 126 | 145 | 122 | 211 | 167 | 144 |
| 8 | Cerro Conito de los Infieles | 4.287 | 76,3 | 115 | 118 | 147 | 116 | 207 | 162 | 132 |
| 9 | Sierra Nevada | 5.112 | 141,8 | 150 | 150 | 152 | 161 | 244 | 203 | 150 |
| 10 | Salar de Aguilar | 3.920 | 513,9 | 115 | 119 | 142 | 96 | 191 | 144 | 127 |
| 11 | Qda. La Rossa | 4.457 | 128,9 | 150 | 150 | 155 | 125 | 214 | 170 | 137 |
| 12 | Wheelwright | 4.674 | 292,3 | 150 | 150 | 152 | 137 | 224 | 181 | 150 |
| 13 | Laguna Escondida | 4.847 | 217,2 | 150 | 150 | 157 | 146 | 232 | 189 | 150 |
| 14 | Laguna Verde | 4.914 | 1001,8 | 184 | 164 | 185 | 150 | 235 | 193 | 165 |
| 15 | Qda. Las Amarillas | 4.893 | 183,6 | 150 | 150 | 164 | 149 | 234 | 192 | 153 |
| 16 | Cerro Agua Caliente | 5.108 | 344 | 167 | 200 | 225 | 161 | 243 | 202 | 201 |
| 17 | Cerro Nevado de Incahuasi | 5.053 | 37 | 170 | 185 | 204 | 158 | 241 | 200 | 182 |
| 18 | Salar de Piedra Parada | 4.503 | 380,6 | 150 | 150 | 151 | 128 | 217 | 173 | 150 |
| 19 | Cerro Agua de Morales | 4.789 | 89,4 | 150 | 150 | 148 | 143 | 229 | 186 | 150 |
| 20 | Lagunas del Jilguero | 4.729 | 112,9 | 150 | 150 | 152 | 140 | 227 | 184 | 150 |
| 21 | Laguna del Bayo | 4.873 | 317,1 | 150 | 150 | 152 | 148 | 233 | 191 | 150 |
| 22 | Qda. El Llano | 4.761 | 104,2 | 150 | 150 | 150 | 142 | 228 | 185 | 150 |
| 23 | Salar Grande | 4.400 | 781,1 | 135 | 143 | 147 | 122 | 212 | 167 | 145 |
| 24 | Qda. la Trinchera | 4.807 | 111,8 | 150 | 150 | 153 | 144 | 230 | 187 | 150 |
| 25 | Laguna de las Parinas | 4.666 | 95,6 | 150 | 150 | 151 | 137 | 224 | 181 | 150 |
| 26 | Laguna de Colorados | 4.420 | 416,7 | 150 | 150 | 161 | 123 | 213 | 168 | 157 |
| 27 | Lagunas Bravas | 4.614 | 408,1 | 150 | 150 | 150 | 134 | 221 | 178 | 150 |
| 28 | Salar de Maricunga | 4.265 | 2194,6 | 167 | 149 | 172 | 115 | 206 | 161 | 155 |
| 29 | Piedra Pómez | 4.910 | 918,8 | 171 | 166 | 174 | 150 | 235 | 193 | 165 |
| 30 | Salar de las Parinas | 4.373 | 613,8 | 150 | 150 | 158 | 121 | 211 | 166 | 157 |
| 31 | Salar de la Isla | 4.325 | 736,4 | 150 | 150 | 157 | 118 | 209 | 164 | 144 |
| 32 | Salar de Gorbea | 4.446 | 363,8 | 142 | 159 | 148 | 125 | 214 | 170 | 154 |
| 33 | Salar de la Azufrera | 3.998 | 250,2 | 117 | 123 | 129 | 100 | 194 | 147 | 121 |
| 34 | Salar de Agua Amarga | 4.037 | 461,8 | 116 | 120 | 140 | 102 | 196 | 149 | 121 |

8.1.2 Estimación de la recarga

La recarga de los acuíferos altiplánicos tiene como fuente principal la precipitación, que se infiltra en zonas de mayor permeabilidad, favorecida por eventos de mayor envergadura que son capaces de saturar el suelo y conducir agua hasta el acuífero (DICTUC, 2009). En la zona de estudio, la recarga se ha estimado de acuerdo a la metodología del DICTUC (2009) que considera la litología de superficie de las cuencas, la influencia de los cauces en la geomorfología y los montos de precipitación en distintas banda de altura. Además, se considera la característica endorreica de la cuenca, los coeficientes de infiltración y escorrentía que ponderan las características hidráulicas de las unidades litológicas presentes en la cuenca analizada. A continuación se presenta la estimación de la recarga media anual (R_T), como la suma de una recarga directa o recarga en la zona acuífera (R_D) dada por la precipitación que cae sobre los depósitos sedimentarios, y una recarga lateral o recarga en la zona no acuífera (R_L), producida por la precipitación que cae sobre la roca impermeable o semipermeable de la cuenca aportante. En este sentido las expresiones que se utilizaron para calcular el valor de las recargas son las siguientes:

- **Recarga Total (R_T)**

$$R_T = R_D + R_L$$

- **Recarga Directa (R_D)**

$$R_D = C_I \cdot Pp \cdot A_D$$

- **Recarga Lateral (R_L)**

$$R_L = C_I \cdot C_E \cdot Pp \cdot A_L$$

Donde Pp es precipitación en la cuenca (LT^{-1}), A_D es el área acuífera (L^2), A_L es el área No acuífera (LT^{-1}), C_E es el coeficiente de escorrentía que sea ha estimado a partir de los parámetros geomorfológicos (superficie de la cuenca, longitud del cauce principal, ancho equivalente y factor de forma) usando ArcGIS versión 10.3. Finalmente, C_I es un coeficiente de infiltración adimensional que DICTUC (2009) ha estimado entre 0,05 y 0,30 dependiendo del grado de permeabilidad y consolidación de la unidad litológica analizada (Tabla 8-2).

Tabla 8-2. Valores del coeficiente de infiltración (CI) en función de la permeabilidad cualitativa de las unidades litológicas

| Permeabilidad cualitativa | CI |
|---------------------------|------|
| Alta | 0,30 |
| Media a Alta | 0,25 |
| Media | 0,20 |
| Media Baja | 0,15 |
| Baja | 0,10 |
| Muy Baja | 0,05 |

Fuente: DICTUC (2009) a partir de Xu *et al.* (2005) y Wang *et al.* (2008).

Según el DICTUC (2009), la metodología presentada anteriormente para el cálculo de la recarga no considera los efectos de la morfología local del terreno y condiciones de almacenamiento en el suelo, introduciendo cierta incertidumbre a los valores de recarga. Por lo tanto, para el ajuste de los valores de recarga media anual en la cuenca analizada se estableció una variación de entre un 5% y un 20% en los coeficientes C_E y C_I y realizando una comparación de dichos coeficientes con los obtenidos en estudios anteriores (DICTUC, 2005; Aquaterra, 2013; DARH, 2009; DICTUC, 2009).

En el Anexo 6 se muestran los valores del coeficiente de infiltración (CI) obtenidos en cada una de las cuencas Alto-Andinas. Además, en los informes por cuenca también se especifican dichos coeficientes tanto para la zona acuífera como para la zona no acuífera.

De acuerdo a los parámetros obtenidos anteriormente, se han obtenidos los valores de recarga total en las cuencas Alto-Andinas, los cuales se muestran en la Figura 8-2.

En la Figura 8-3 se muestra la comparación de los valores de recarga obtenidos y en la Tabla 8-3 la recarga y comparación en cada una de las cuencas con respecto a otros estudios previos.

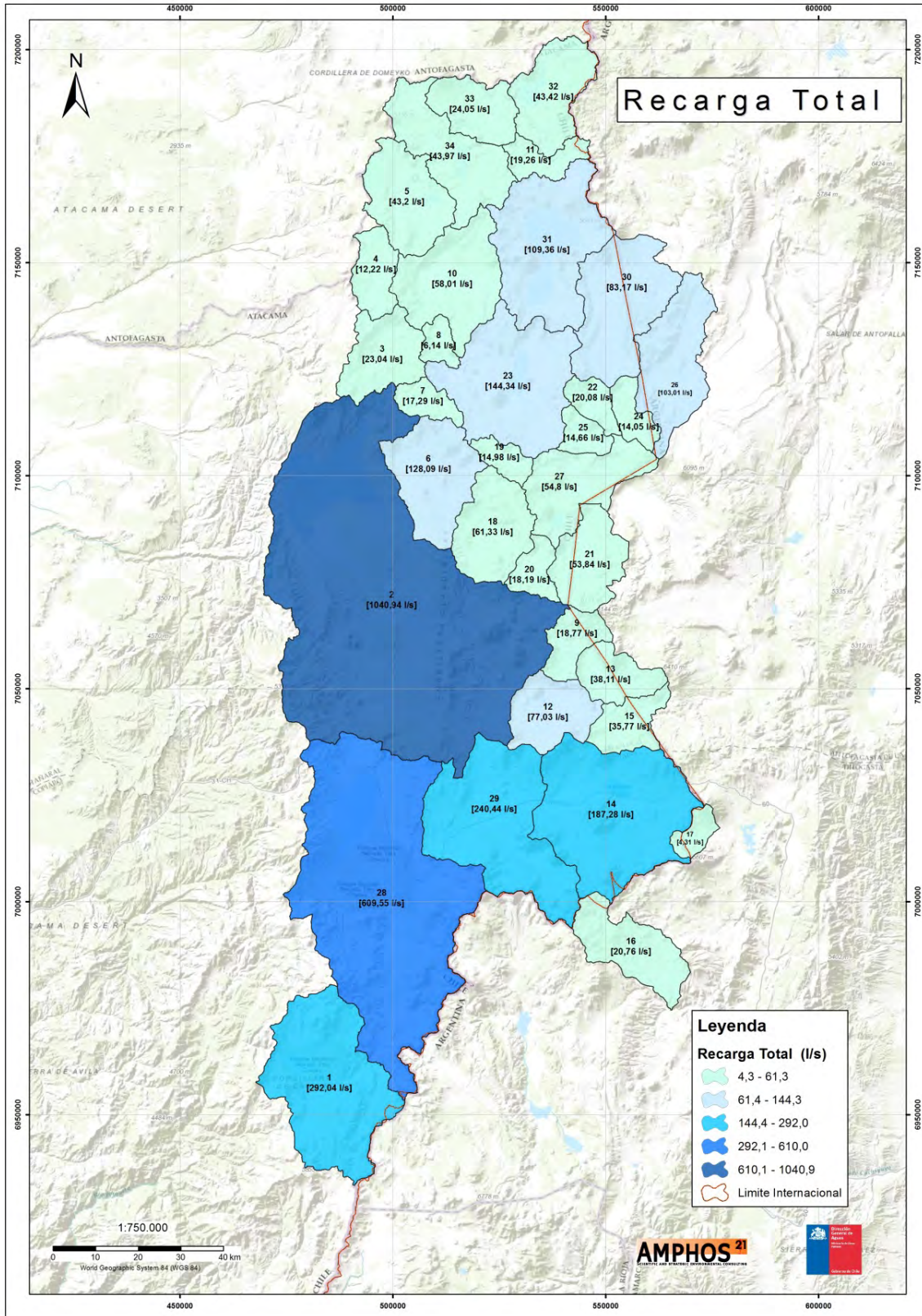


Figura 8-2: Estimación de la recarga total en las cuencas Alto-Andinas

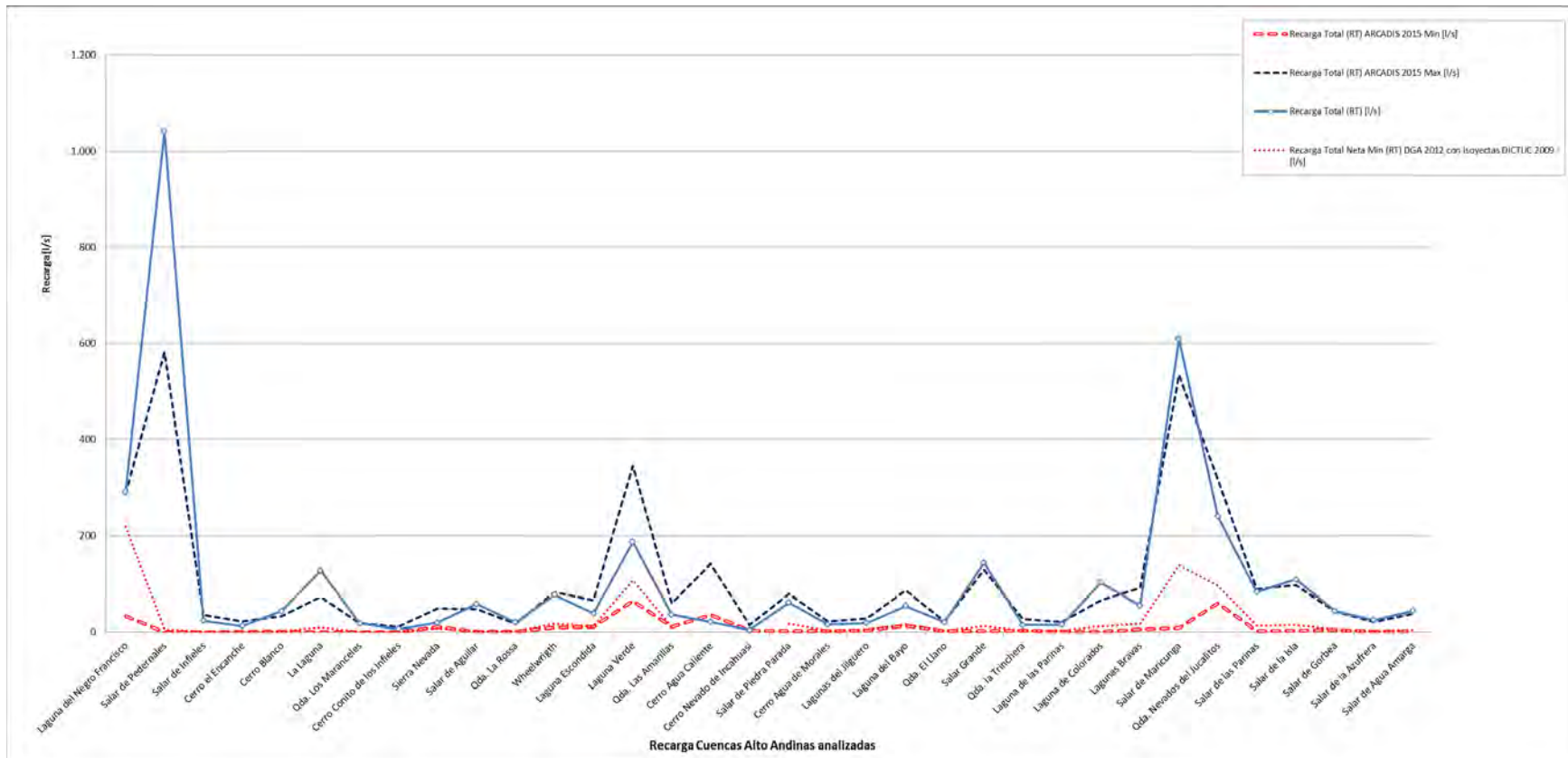


Figura 8-3. Comparación de la recarga con estudios previos.

Tabla 8-3. Valores del recarga total estimados en las cuencas Alto-Andinas y comparación con estudios previos

| N° Cuenca | Nombre cuenca | Altitud [msnm] | Área Total [Km2] | Área Acuífera [Km2] | Área No Acuífera [Km2] | Pp media anual [mm/año] | Coef. de infiltración (C _{AD}) | Coef. de infiltración (C _{NAC}) | Recarga Directa (R _D) [l/s] | Recarga Lateral (R _L) [l/s] | Recarga Total (R _T) [l/s] | Recarga Total (R _T) DARH 2009 [l/s] | Recarga Total (R _T) ARCADIS 2015 Min [l/s] | Recarga Total (R _T) ARCADIS 2015 Max [l/s] | Recarga Total Neta Min (R _T) DGA 2012 con Isoyetas DICTUC 2009 [l/s] | Recarga Total Neta Min (R _T) DGA 2012 con Isoyetas BH 1987 [l/s] |
|-----------|------------------------------|----------------|------------------|---------------------|------------------------|-------------------------|--|---|---|---|---------------------------------------|---|--|--|--|--|
| 1 | Laguna del Negro Francisco | 4.547 | 906,0 | 146 | 760 | 214,3 | 0,23 | 0,08 | 232,9 | 59,2 | 292 | 350 | 33 | 288 | 218,8 | 218,8 |
| 2 | Salar de Pedernales | 3.996 | 3592,3 | 1.049 | 2.543 | 133,0 | 0,20 | 0,12 | 885,2 | 155,7 | 1.041 | | 0 | 583 | 6,1 | 8,0 |
| 3 | Salar de Infieles | 4.040 | 305,3 | 13 | 292 | 116,3 | 0,13 | 0,12 | 6,2 | 16,8 | 23 | 68 | 0 | 35 | 0,6 | 0,5 |
| 4 | Cerro el Encanche | 4.268 | 178,6 | 7 | 172 | 93,5 | 0,24 | 0,14 | 4,6 | 7,6 | 12 | 34 | 1 | 22 | 0,4 | |
| 5 | Cerro Blanco | 4.023 | 391,7 | 29 | 363 | 118,8 | 0,24 | 0,14 | 25,8 | 17,4 | 43 | 91 | 1 | 33 | 1,9 | |
| 6 | La Laguna | 4.205 | 456,9 | 65 | 392 | 149,2 | 0,25 | 0,13 | 78,2 | 49,9 | 128 | 91 | 0 | 73 | 9,0 | 10,0 |
| 7 | Qda. Los Maranceles | 4.389 | 107,1 | 6 | 101 | 143,9 | 0,24 | 0,17 | 6,4 | 10,9 | 17 | 21 | 0 | 18 | 0,3 | 0,3 |
| 8 | Cerro Conito de los Infieles | 4.287 | 75,4 | 0 | 75 | 132,2 | 0,00 | 0,18 | 0,0 | 6,1 | 6 | | 0 | 11 | 0,2 | 0,2 |
| 9 | Sierra Nevada | 5.112 | 161,9 | 6 | 156 | 150,0 | 0,19 | 0,10 | 5,1 | 13,6 | 19 | | 11 | 48 | 7,3 | 7,3 |
| 10 | Salar de Aguilar | 3.920 | 516,6 | 90 | 427 | 127,3 | 0,09 | 0,11 | 31,8 | 26,2 | 58 | 203 | 1 | 47 | 2,3 | 2,1 |
| 11 | Qda. La Rossa | 4.457 | 129,1 | 7,1 | 122 | 137,3 | 0,21 | 0,16 | 6,6 | 12,7 | 19 | 28 | 1 | 17 | 1,7 | 1,7 |
| 12 | Wheelwright | 4.674 | 291,2 | 62 | 229 | 150,0 | 0,20 | 0,12 | 60,4 | 16,6 | 77 | 99 | 9 | 83 | 17,0 | 17,0 |
| 13 | Laguna Escondida | 4.847 | 199,6 | 30 | 170 | 150,0 | 0,18 | 0,11 | 26,0 | 12,1 | 38 | | 10 | 66 | 11,9 | 11,9 |
| 14 | Laguna Verde | 4.914 | 1004,5 | 129 | 876 | 165,0 | 0,19 | 0,09 | 129,5 | 57,7 | 187 | 358 | 65 | 346 | 107,7 | 166,4 |
| 15 | Qda. Las Amarillas | 4.893 | 182,1 | 22 | 160 | 152,9 | 0,24 | 0,09 | 25,8 | 10,0 | 36 | | 10 | 59 | 10,7 | 10,7 |
| 16 | Cerro Agua Caliente | 5.108 | 344,5 | 0 | 345 | 200,6 | 0,00 | 0,06 | 0,0 | 20,8 | 21 | | 35 | 142 | | |
| 17 | Cerro Nevado de Incahuasi | 5.053 | 78,8 | 0 | 79 | 182,3 | 0,00 | 0,06 | 0,0 | 4,3 | 4 | | 3 | 14 | | |
| 18 | Salar de Piedra Parada | 4.503 | 376,4 | 58 | 318 | 150,0 | 0,13 | 0,13 | 35,2 | 26,1 | 61 | 114 | 2 | 79 | 16,7 | 16,7 |
| 19 | Cerro Agua de Morales | 4.789 | 90,3 | 5 | 85 | 150,0 | 0,24 | 0,17 | 6,1 | 8,9 | 15 | 21 | 2 | 21 | 3,2 | 3,2 |
| 20 | Lagunas del Jilguero | 4.729 | 114,5 | 13 | 101 | 150,0 | 0,17 | 0,11 | 10,7 | 7,5 | 18 | 30 | 3 | 28 | 4,9 | 4,9 |
| 21 | Laguna del Bayo | 4.873 | 312,1 | 39 | 274 | 150,0 | 0,20 | 0,09 | 37,4 | 16,5 | 54 | | 13 | 87 | 15,0 | 15,0 |
| 22 | Qda. El Llano | 4.761 | 104,2 | 14 | 90 | 150,0 | 0,20 | 0,15 | 13,2 | 6,8 | 20 | | 2 | 22 | 3,0 | 3,0 |
| 23 | Salar Grande | 4.400 | 780,7 | 152 | 630 | 144,5 | 0,13 | 0,14 | 90,2 | 54,1 | 144 | 227 | 2 | 129 | 11,1 | 3,6 |
| 24 | Qda. la Trinchera | 4.807 | 112,8 | 5 | 108 | 150,0 | 0,20 | 0,14 | 5,0 | 9,1 | 14 | | 3 | 26 | 3,6 | 3,6 |
| 25 | Laguna de las Parinas | 4.666 | 95,0 | 11 | 84 | 150,0 | 0,15 | 0,13 | 8,0 | 6,7 | 15 | 28 | 1 | 20 | 3,1 | 3,1 |
| 26 | Laguna de Colorados | 4.420 | 467,4 | 67 | 400 | 157,4 | 0,22 | 0,14 | 75,5 | 27,5 | 103 | | 1 | 66 | 12,0 | 12,0 |
| 27 | Lagunas Bravas | 4.614 | 410,1 | 27 | 383 | 150,0 | 0,16 | 0,16 | 20,8 | 34,0 | 55 | 102 | 5 | 92 | 16,3 | 16,3 |
| 28 | Salar de Maricunga | 4.265 | 2208,8 | 580 | 1.629 | 155,2 | 0,18 | 0,09 | 513,6 | 96,0 | 610 | 1.210 | 8 | 534 | 139,7 | 236,3 |
| 29 | Piedra Pómez | 4.910 | 915,9 | 176 | 740 | 165,2 | 0,20 | 0,11 | 185,1 | 55,4 | 240 | 239 | 59 | 317 | 96,0 | 107,5 |
| 30 | Salar de las Parinas | 4.373 | 590,1 | 73 | 517 | 156,8 | 0,13 | 0,10 | 47,7 | 35,5 | 83 | 241 | 2 | 89 | 13,4 | 13,4 |
| 31 | Salar de la Isla | 4.325 | 759,3 | 201 | 559 | 144,2 | 0,09 | 0,08 | 80,8 | 28,6 | 109 | 279 | 3 | 97 | 13,8 | 13,8 |
| 32 | Salar de Gorbea | 4.446 | 356,9 | 46 | 311 | 154,0 | 0,13 | 0,06 | 28,7 | 14,7 | 43 | 116 | 4 | 42 | 6,1 | 4,6 |
| 33 | Salar de la Azufrera | 3.998 | 248,3 | 23 | 225 | 120,7 | 0,15 | 0,09 | 13,4 | 10,6 | 24 | 81 | 1 | 20 | 2,4 | 2,1 |
| 34 | Salar de Agua Amarga | 4.037 | 460,8 | 39 | 422 | 121,3 | 0,12 | 0,11 | 18,0 | 26,0 | 44 | 127 | 2 | 38 | 4,2 | 3,8 |

8.1.3 Estimación de la escorrentía

La escorrentía superficial en las cuencas Alto-Andinas 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" (DGA-Aquaterra, 2013). Por su parte, durante el invierno, la escorrentía se explica en eventos de precipitación líquida, asociados a contracciones de la isoterma cero, los cuales saturan los estratos superficiales del suelo, generando el escurrimiento superficial en los cauces.

Para estimar la escorrentía superficial neta en la cuenca Laguna del Negro Francisco, se ha utilizado el método de precipitación-escorrentía descrito por DGA-Aquaterra (2013), que es similar al método DICTUC (2009) en la estimación de la recarga lateral, el cual se basa en la siguiente relación:

$$Q = CE \cdot A_L \cdot Pp$$

Donde Q es el caudal medio anual [m^3/s], CE es un coeficiente de escorrentía, A_L [km^2] corresponde al área lateral o no acuífera de la cuenca y Pp [mm/año] es la precipitación media anual.

Para la determinación del coeficiente de escorrentía, DGA-Aquaterra (2013) propone:

$$CE = 0,23 \cdot F$$

Con F el factor de forma de la cuenca, dado por:

$$F = \frac{M}{L} \text{ si } M < L$$

$$F = \frac{L}{M} \text{ si } L < M$$

donde L [km] es la longitud del cauce principal y M [km] es el ancho equivalente de la cuenca, definido como:

$$M = \frac{A}{L}$$

Con A [km^2] el área aportante de la cuenca.

Para lograr un obtener un mejor ajuste de los coeficientes determinados por el método descrito anteriormente, se determinaron los parámetros geomorfológicos de la cuenca en

la "Zona No Acuífero" a partir del software ArcGIS versión 10.3 y considerando la permeabilidad de los materiales explicada en el apartado anterior.

Dado lo anterior, se ha estimado un valor de escorrentía superficial para cada una de las 34 cuencas Alto-Andinas, los cuales se muestran en la Figura 8-4.

En la

Tabla 8-4 se muestra el caudal de escorrentía estimado para cada una de las cuencas analizadas en comparación con los valores obtenidos en estudios anteriores.

Tabla 8-4. Valores del escorrentía total estimada en las cuencas Alto-Andinas y comparación con estudios previos

| N° Cuenca | Nombre cuenca | Área Total [Km2] | L [Km] | M [Km] | F | CE A21 ArcGIS | Caudal de Escorrentía (Q _T) [l/s] | Caudal de Escorrentía DGA 2012 (Q _T) [l/s] | Caudal de Escorrentía Aquaterra 2013 (Q _T) [l/s] |
|-----------|------------------------------|------------------|--------|--------|------|---------------|---|--|--|
| 1 | Laguna del Negro Francisco | 906 | 31 | 29 | 0,74 | 0,14 | 702 | 383 | 725 |
| 2 | Salar de Pedernales | 3.592 | 53 | 68 | 0,53 | 0,11 | 1.126 | 282 | 1.270 |
| 3 | Salar de Infieles | 305 | 21 | 14 | 0,69 | 0,13 | 144 | 5 | 109 |
| 4 | Cerro el Encanche | 179 | 12 | 15 | 0,83 | 0,11 | 54 | 0 | 67 |
| 5 | Cerro Blanco | 392 | 50 | 8 | 0,46 | 0,09 | 127 | 0 | 227 |
| 6 | La Laguna | 457 | 22 | 20 | 0,92 | 0,12 | 221 | 57 | 221 |
| 7 | Qda. Los Maranceles | 107 | 18 | 6 | 0,34 | 0,14 | 66 | 8 | 38 |
| 8 | Cerro Conito de los Infieles | 75 | 8 | 9 | 0,89 | 0,11 | 35 | 7 | 45 |
| 9 | Sierra Nevada | 162 | 15 | 11 | 0,76 | 0,14 | 102 | 18 | 67 |
| 10 | Salar de Aguilar | 517 | 15 | 35 | 0,43 | 0,14 | 234 | 16 | 237 |
| 11 | Qda. La Rossa | 129 | 14 | 9 | 0,63 | 0,15 | 82 | 18 | 58 |
| 12 | Wheelwright | 291 | 13 | 22 | 0,58 | 0,13 | 142 | 33 | 206 |
| 13 | Laguna Escondida | 200 | 29 | 7 | 0,40 | 0,13 | 107 | 28 | 150 |
| 14 | Laguna Verde | 1.005 | 50 | 20 | 0,59 | 0,14 | 642 | 345 | 1.110 |
| 15 | Qda. Las Amarillas | 182 | 23 | 8 | 0,45 | 0,14 | 106 | 35 | 119 |
| 16 | Cerro Agua Caliente | 345 | 42 | 8 | 0,20 | 0,15 | 338 | 0 | 0 |
| 17 | Cerro Nevado de Incahuasi | 79 | 7 | 11 | 1,63 | 0,15 | 70 | 0 | 0 |
| 18 | Salar de Piedra Parada | 376 | 18 | 21 | 1,54 | 0,13 | 200 | 42 | 191 |
| 19 | Cerro Agua de Morales | 90 | 16 | 6 | 0,34 | 0,13 | 53 | 8 | 38 |
| 20 | Lagunas del Jilguero | 115 | 12 | 9 | 0,74 | 0,15 | 71 | 13 | 85 |
| 21 | Laguna del Bayo | 312 | 14 | 22 | 0,66 | 0,15 | 193 | 36 | 227 |
| 22 | Qda. El Llano | 104,24 | 14 | 7,67 | 0,57 | 0,10 | 44 | 11 | 58 |
| 23 | Salar Grande | 781 | 20 | 38 | 0,53 | 0,13 | 381 | 70 | 460 |
| 24 | Qda. la Trinchera | 113 | 23 | 5 | 0,22 | 0,12 | 63 | 14 | 34 |
| 25 | Laguna de las Parinas | 95 | 13 | 7 | 0,57 | 0,13 | 50 | 11 | 80 |
| 26 | Laguna de Colorados | 467 | 26 | 18 | 0,74 | 0,11 | 218 | 71 | 194 |
| 27 | Lagunas Bravas | 410 | 32 | 13 | 0,53 | 0,12 | 211 | 44 | 297 |
| 28 | Salar de Maricunga | 2.209 | 51 | 44 | 0,67 | 0,13 | 1.066 | 490 | 1.352 |
| 29 | Qda. Nevados del Jucalitos | 916 | 43 | 21 | 0,49 | 0,13 | 494 | 231 | 439 |
| 30 | Salar de las Parinas | 590 | 20 | 29 | 0,61 | 0,14 | 355 | 89 | 332 |
| 31 | Salar de la Isla | 759 | 22 | 35 | 0,64 | 0,14 | 368 | 113 | 352 |
| 32 | Salar de Gorbea | 357 | 19 | 19 | 0,85 | 0,15 | 234 | 34 | 150 |
| 33 | Salar de la Azufrera | 248 | 17 | 14 | 0,82 | 0,14 | 118 | 0 | 137 |
| 34 | Salar de Agua Amarga | 461 | 9 | 49 | 0,39 | 0,14 | 232 | 25 | 346 |

8.1.4 Cuantificación de la evaporación directa

En la zona de interés, la escasez de cubierta vegetal en el suelo, provoca que la evaporación desde la napa freática sea importante de 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 (Anexo 6.1), los cuales permiten estimar la tasa de evaporación a partir de la profundidad del nivel freático. La metodología utilizada para el procesamiento de la información se describe a continuación.

8.1.4.1 Marco Teórico

Los datos de los lisímetros corresponden al periodo comprendido entre febrero y noviembre de 2015, registrando la presión hidrostática dentro de la columna de agua cada 10 minutos. Con estos datos de presión, y la profundidad del sensor en la columna, es posible obtener la profundidad del nivel freático dentro de la columna de suelo, por lo que se conoce su variación temporal en la ventana de tiempo antes especificada. Al realizar un balance de masa dentro del lisímetro, considerando únicamente salidas por evaporación, se tiene que:

$$\frac{\partial V}{\partial t} = -E_v \cdot A_D$$
$$A_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = -E_v \cdot A_D$$

Donde h es la altura de agua sobre el sensor de presión, A_s y A_D corresponden al área transversal del suelo y del depósito, respectivamente, y E_v representa las salidas del sistema por evaporación. Como ambas áreas son iguales, se tiene que:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = -E_v$$

Se debe comentar además, que la variable temporal " h " se relaciona con la profundidad del nivel freático dentro de la columna de suelo, " z ", mediante la siguiente relación:

$$z(t) = p_{td} - (Z_{dpm} - Z_t) - h(t)$$

Donde p_{td} es la profundidad del sensor en el depósito, Z_{dpm} es la cota desde la cual se mide la profundidad del sensor y Z_t corresponde a la cota del terreno. De este modo, combinando las ecuaciones anteriores, se tiene finalmente que:

$$\frac{\partial z}{\partial t} = E_v$$

En base a lo anterior, considerando que las variaciones en la profundidad del nivel freático dentro de la columna de suelo del lisímetro se deben únicamente a pérdidas por evaporación, es posible conocer la tasa de evaporación que se tendría para distintas profundidades en la columna de suelo, ya que se tienen registros discretos de la profundidad en función del tiempo.

De acuerdo a lo planteado, se requieren analizar las señales de los sensores para cada uno de los lisímetros con el objetivo de estimar tasas de evaporación.

8.1.4.2 Procesamiento de la información

i. Salar de Pedernales.

En la cuenca del Salar de Pedernales (C2) se cuenta con información de 4 lisímetros instalados en la Fase 2 del proyecto. A partir de las señales temporales de profundidad del nivel freático en la columna de suelo del lisímetro, es posible identificar tramos que permitan estimar tasas de evaporación y asociarlas a la profundidad correspondiente. Las siguientes figuras muestran los tramos identificados, junto con las regresiones lineales respectivas cuya pendiente corresponde a la tasa estimada. Se muestran además los errores cuadráticos de cada una de las regresiones:

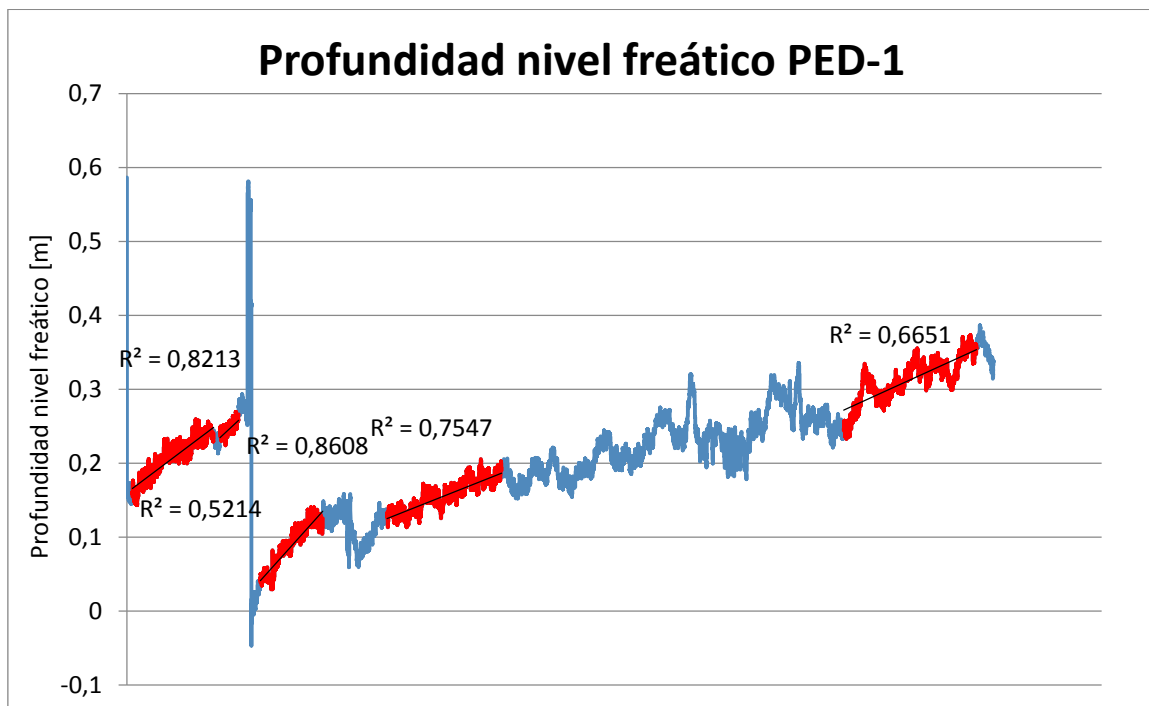


Figura 8-5: Variación temporal del nivel freático y tramos identificados, PED-1.

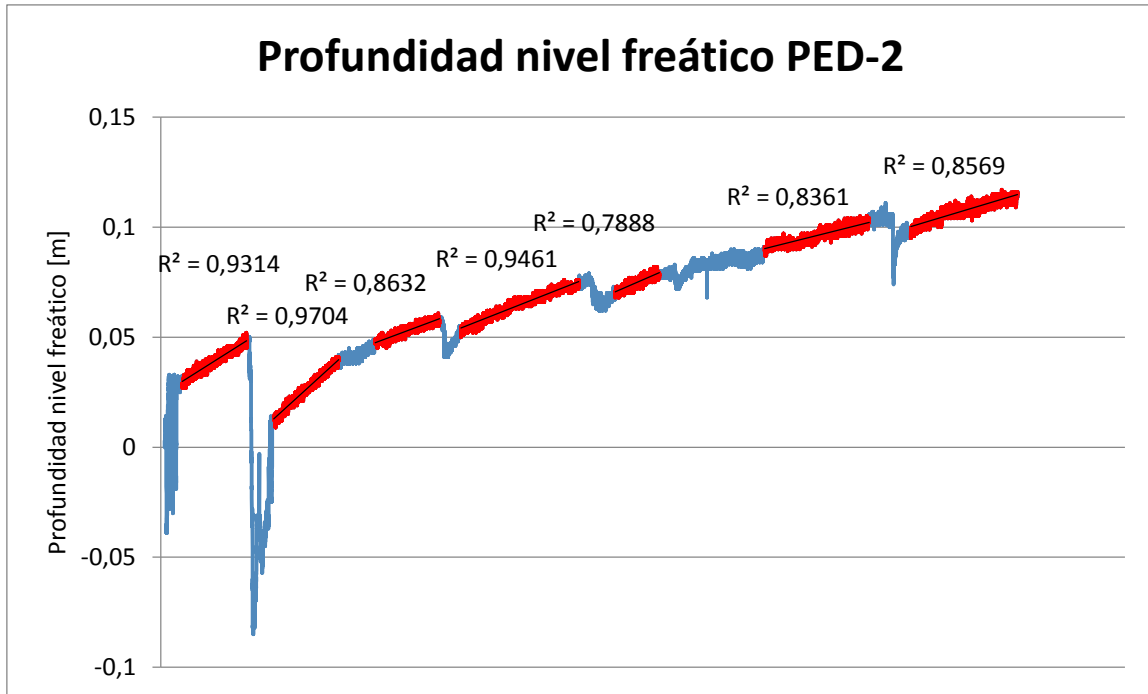


Figura 8-6: Variación temporal del nivel freático y tramos identificados, PED-2.

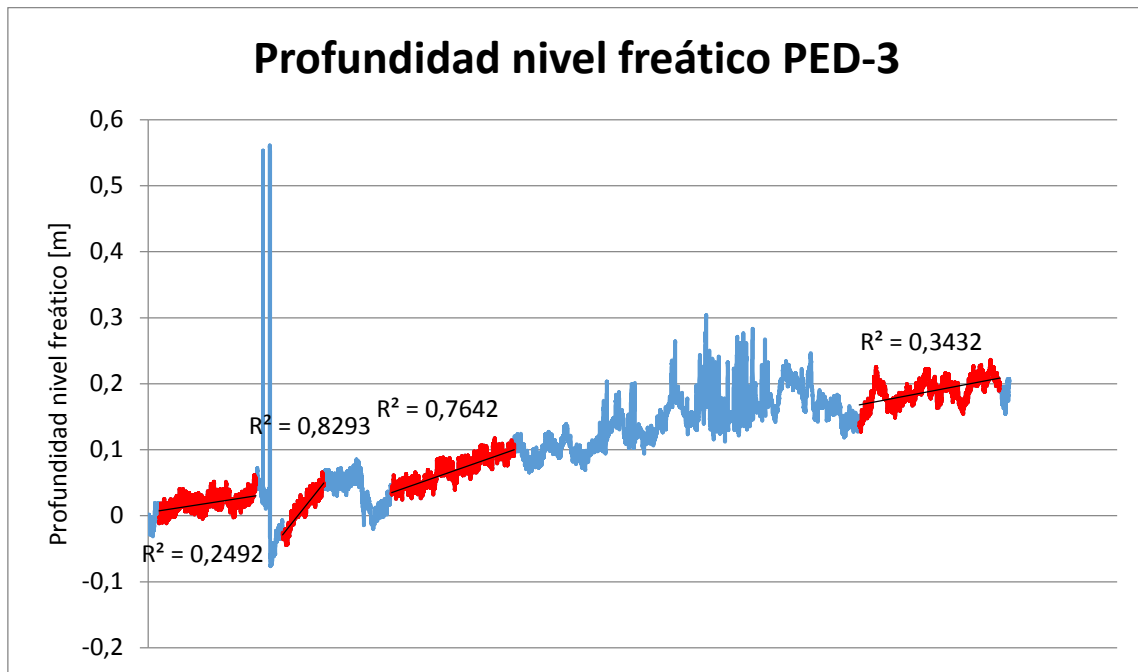


Figura 8-7: Variación temporal del nivel freático y tramos identificados, PED-3.

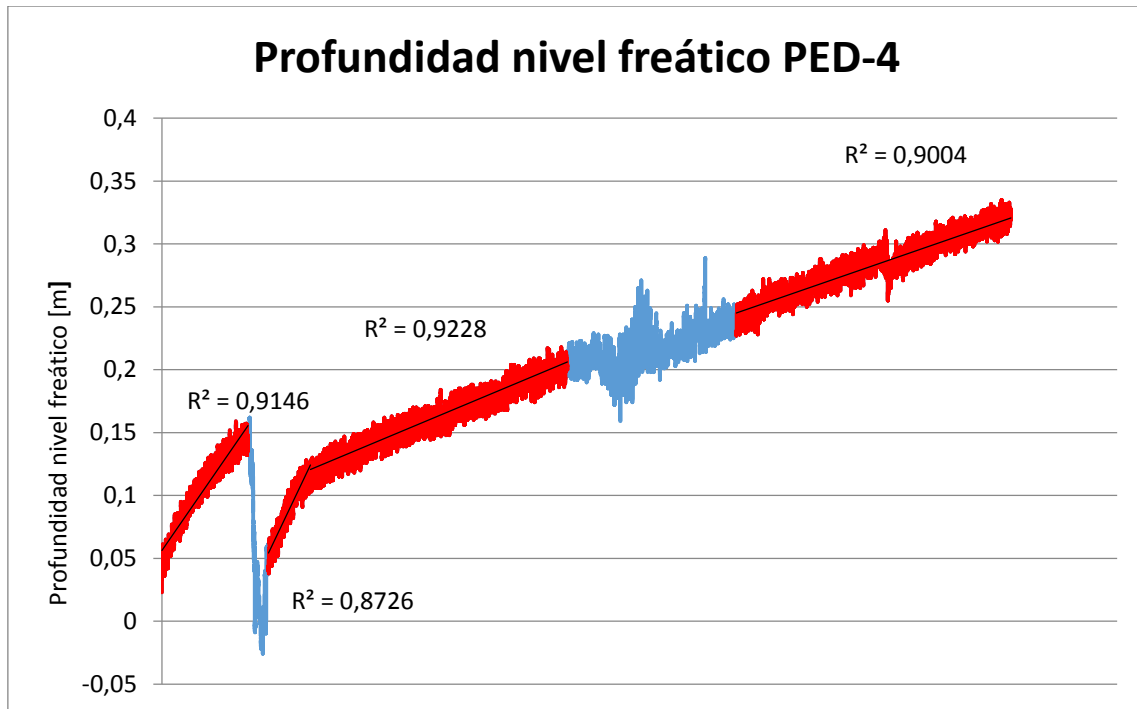


Figura 8-8: Variación temporal del nivel freático y tramos identificados, PED-4.

A partir de las regresiones realizadas, se obtiene la tasa de evaporación asociada a la profundidad correspondiente del nivel freático, con lo cual es posible construir curvas de tasa de evaporación versus profundidad de la napa freática. El resultado de este procedimiento se muestra en las siguientes figuras:

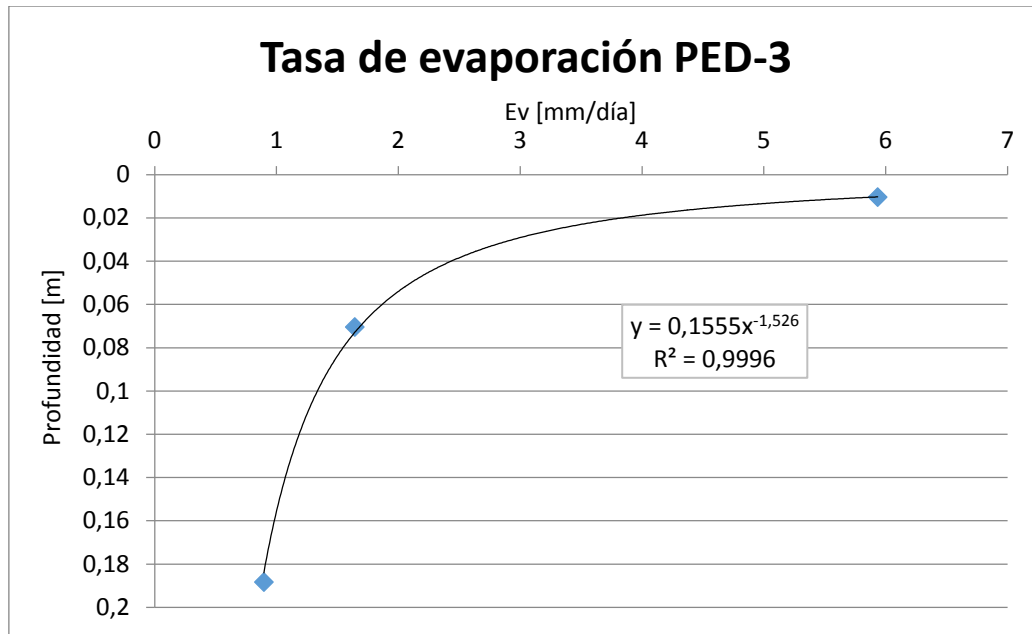


Figura 8-9: Tasa de evaporación versus profundidad, PED-3.

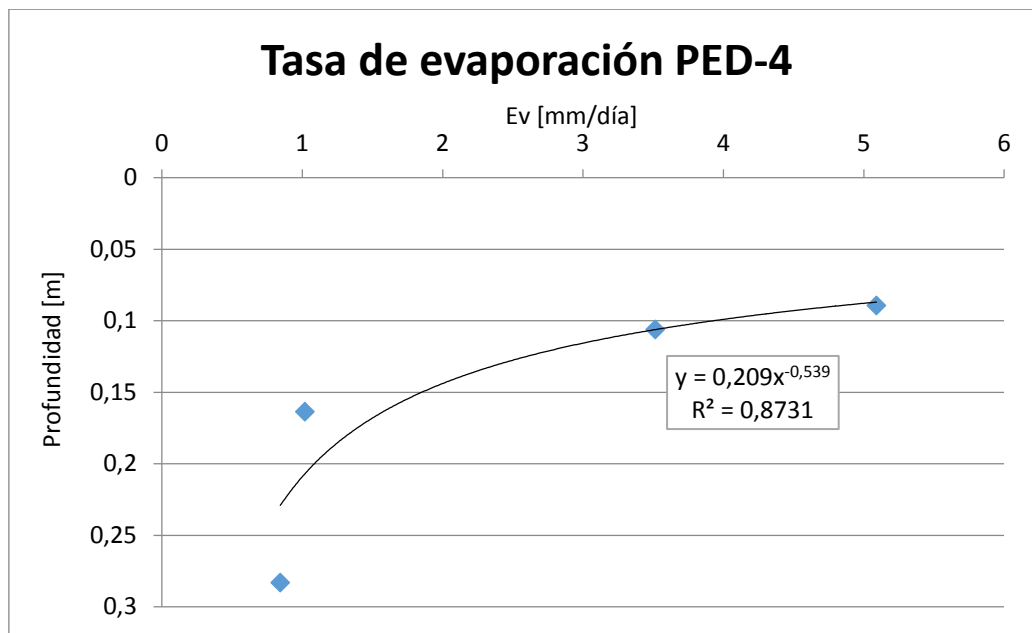


Figura 8-10: Tasa de evaporación versus profundidad, PED-4.

Se debe mencionar que sólo se muestran las curvas de los lisímetros PED-3 y PED-4, ya que en los otros lisímetros no fue posible obtener datos consistentes con lo esperado según la bibliografía. Esto se debe a que durante el periodo de toma de datos, existen recargas al sistema (precipitación sobre la columna de suelo), las cuales constituyen entradas al volumen de control que no han sido consideradas en la deducción de las ecuaciones. Es por esto que las señales originales presentan anomalías que dificultan el procesamiento de la información y generan resultados inconsistentes.

ii. Salar de Maricunga.

En la cuenca del Salar de Maricunga (C28) se cuenta con información de 4 lisímetros instalados en la Fase 2 del proyecto. A partir de las señales temporales de profundidad del nivel freático en la columna de suelo del lisímetro, es posible identificar tramos que permitan estimar tasas de evaporación y asociarlas a la profundidad correspondiente. Las siguientes figuras muestran los tramos identificados, junto con las regresiones lineales respectivas cuya pendiente corresponde a la tasa estimada. Se muestran además los errores cuadráticos de cada una de las regresiones:

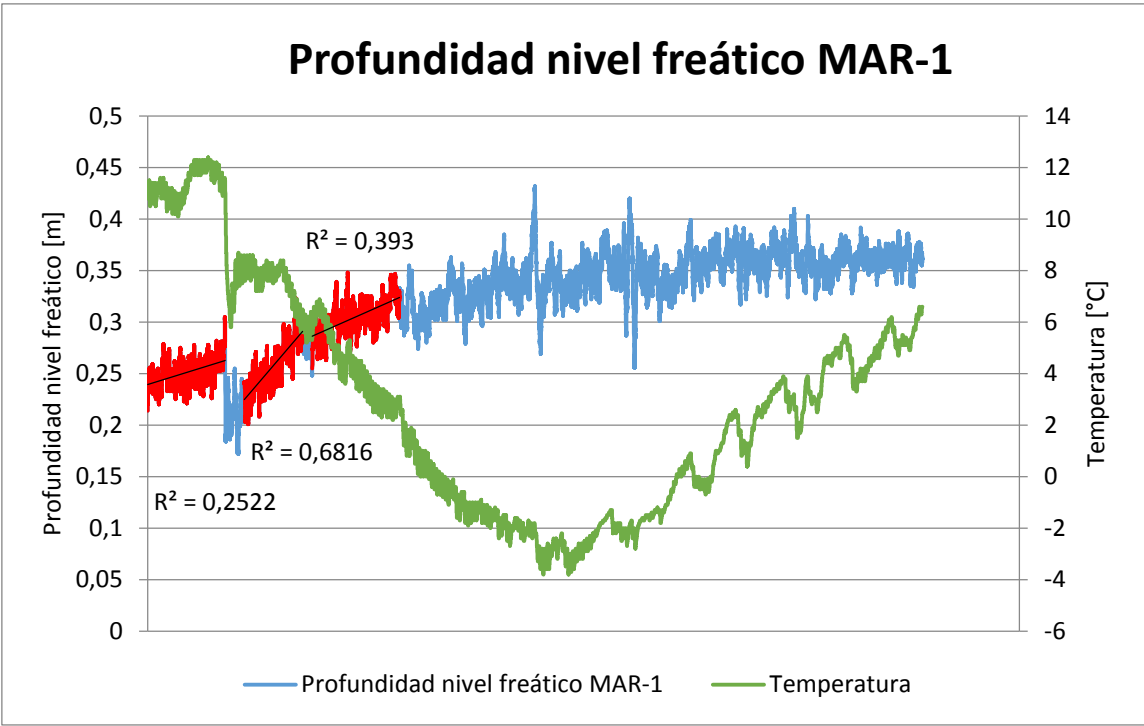


Figura 8-11: Variación temporal del nivel freático y temperatura, MAR-1.

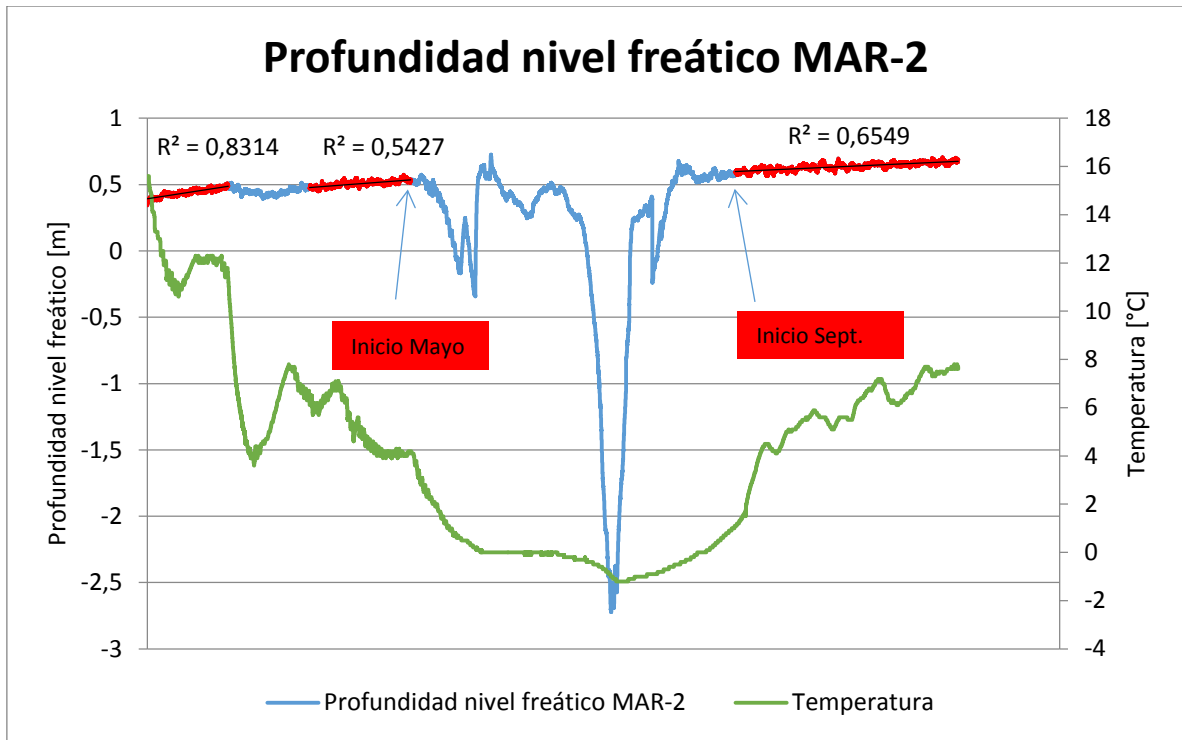


Figura 8-12: Variación temporal del nivel freático y temperatura, MAR-2.

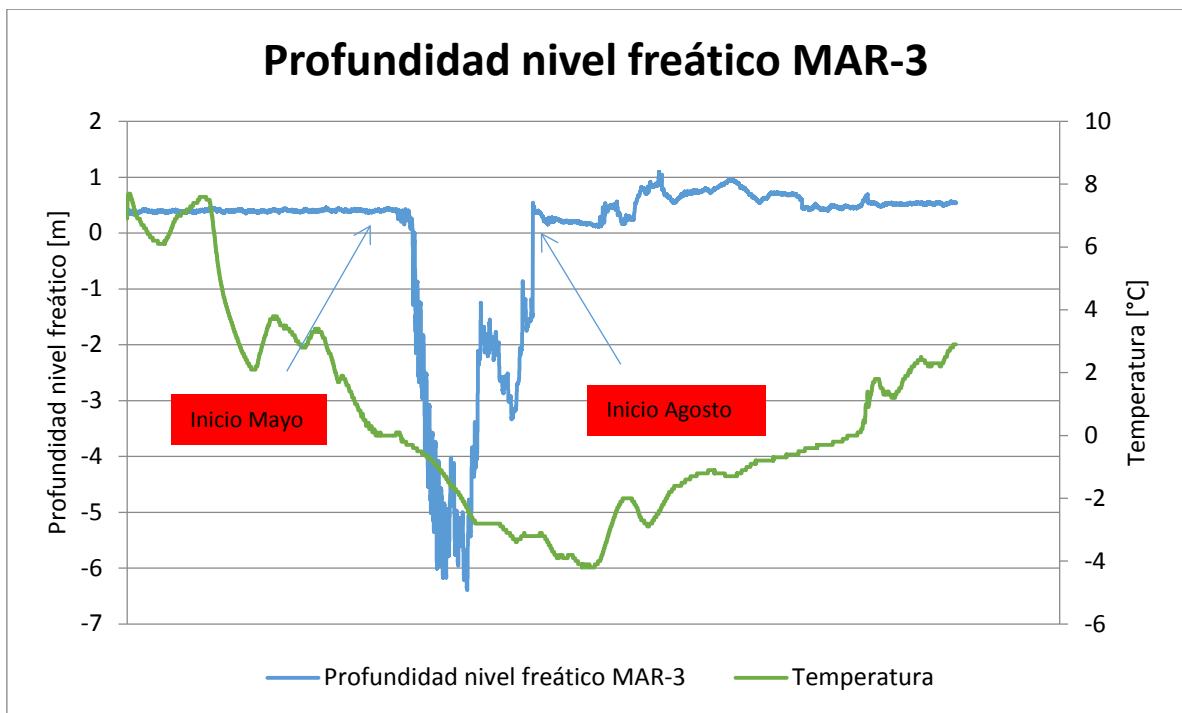


Figura 8-13: Variación temporal del nivel freático y temperatura, MAR-3.

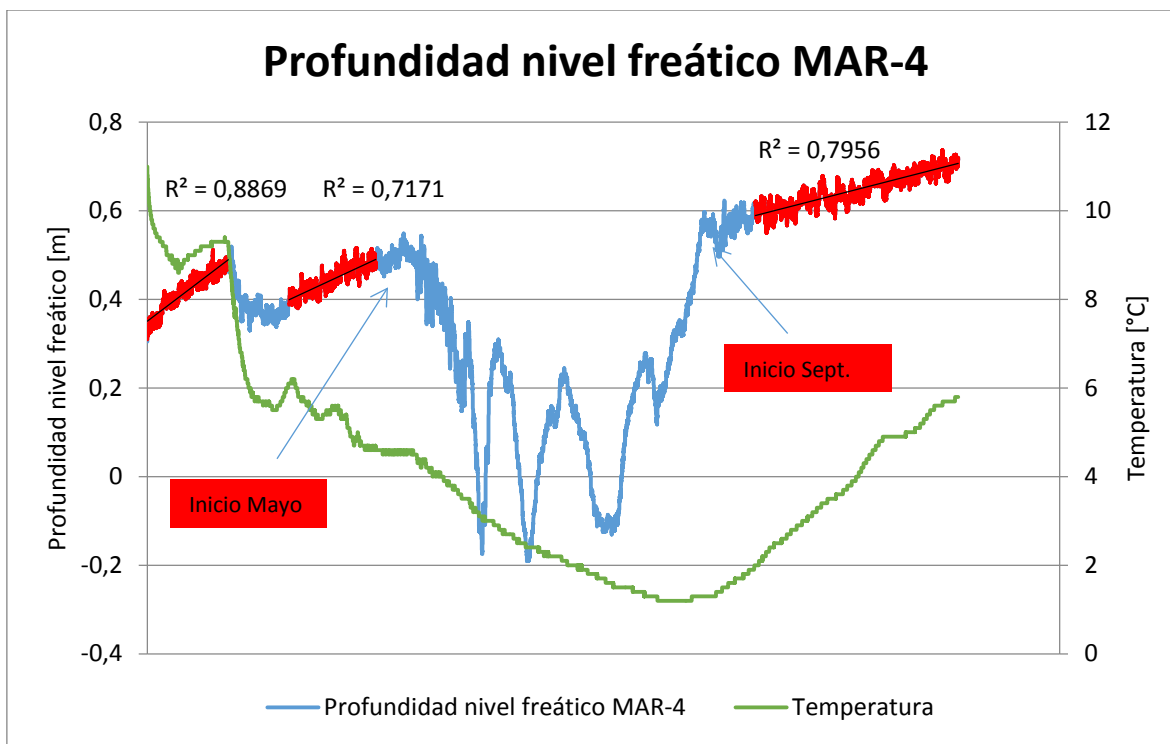


Figura 8-14: Variación temporal del nivel freático y temperatura, MAR-4.

En los gráficos anteriores es posible apreciar fuertes anomalías de las señales, en particular en los meses de invierno. Se cree que estas anomalías podrían deberse a recargas no consideradas en el sistema, así como también a las bajas temperaturas en los meses de invierno, las que provocan en algunos casos que el agua al interior del depósito se congele, generando que las mediciones del sensor estén fuertemente alteradas y no sean representativas de lo que se desea estudiar. Adicionalmente, es importante mencionar que no se cuenta con información barométrica en esta cuenca, por lo que las señales se debieron calibrar con los datos de presión atmosférica de la cuenca del Salar de Pedernales, introduciendo así más incertidumbre y dificultades en las estimaciones, ya que en algunos casos se obtenían profundidades negativas del nivel freático, lo cual no tiene sentido físico.

Debido a todos estos factores, se cree que las señales obtenidas no son de la calidad suficiente para ser utilizadas en la estimación de la evaporación, por lo que se ha optado por no incluirlas en el análisis. Además, es importante destacar que cuando se tengan más datos (mayor tiempo de registro), estos podrían complementar el análisis realizado hasta ahora mediante el mismo procedimiento con el objetivo de abordar las anomalías

observadas en los gráficos anteriores y de ese modo utilizar los datos de esta cuenca para la estimación de la evaporación directa.

Las siguientes figuras muestran las curvas de evaporación obtenidas con los datos de los lisímetros MAR-2 y MAR-4:

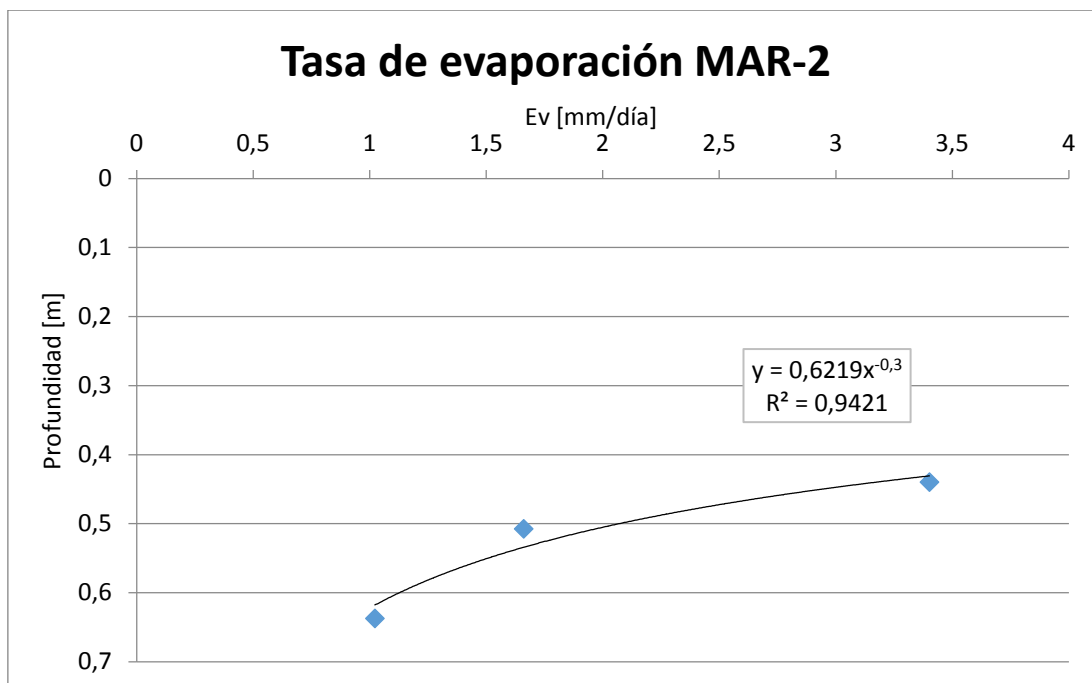


Figura 8-15: Tasa de evaporación versus profundidad, MAR-2.

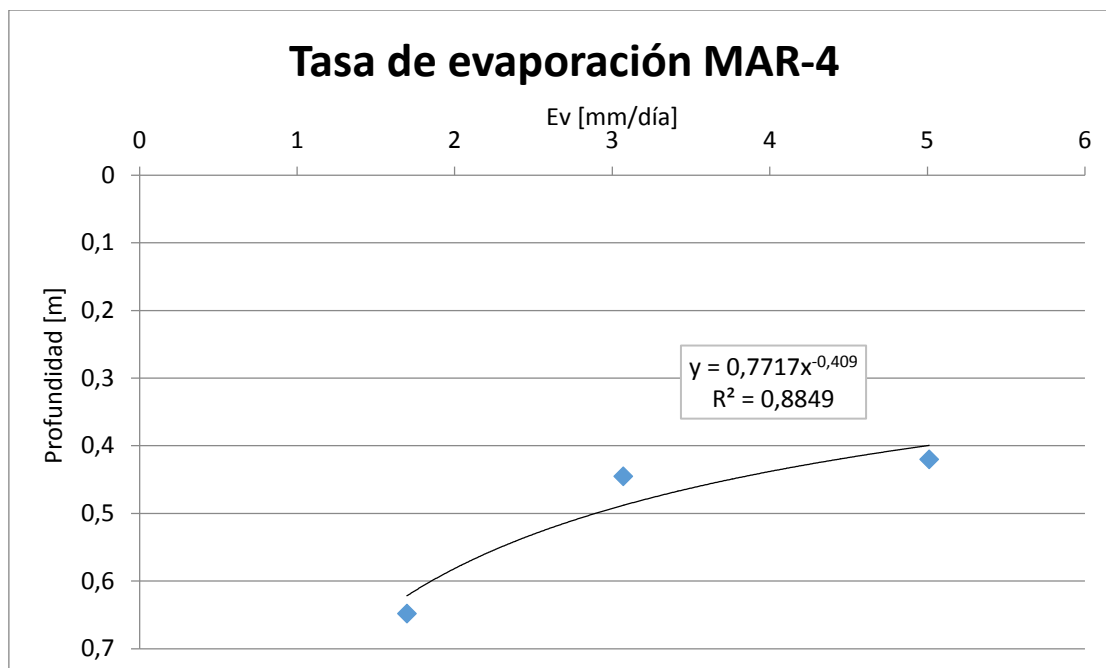


Figura 8-16: Tasa de evaporación versus profundidad, MAR-4.

iii. Laguna del Negro Francisco.

En la cuenca Laguna del Negro Francisco (C1) se cuenta con información de 3 lisímetros instalados en la Fase 2 del proyecto. En Figura 8-17, Figura 8-18 y Figura 8-19 se muestran las señales del sensor de presión expresadas como profundidad del nivel freático, junto con la señal de temperatura. Por lo tanto, de manera análoga a lo explicado en las señales de la cuenca del Salar de Maricunga, se observan fuertes anomalías en las señales del sensor, las cuales se correlacionan con las bajas temperaturas en los meses de invierno que provocan el congelamiento del agua dentro del depósito. A causa de esto, no ha sido posible identificar tramos en las señales que permitan estimar tasas de evaporación, por lo que los datos de estos lisímetros no serán considerados en el análisis de la evaporación desde la napa. De forma análoga, cuando se tengan un mayor tiempo de registro, los datos estos podrían complementar el análisis realizado hasta ahora con el objetivo de abordar las anomalías observadas en los gráficos anteriores y de ese modo utilizar los datos de esta cuenca para la estimación de la evaporación directa.

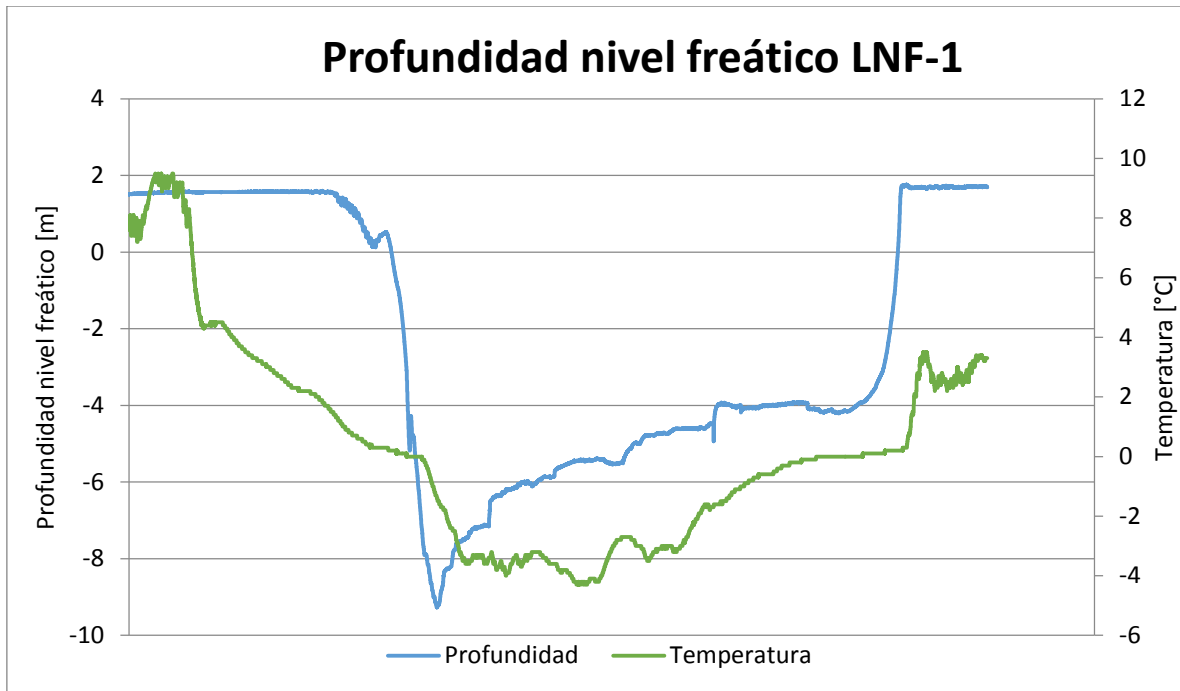


Figura 8-17: Variación temporal del nivel freático y la temperatura, LNF-1.

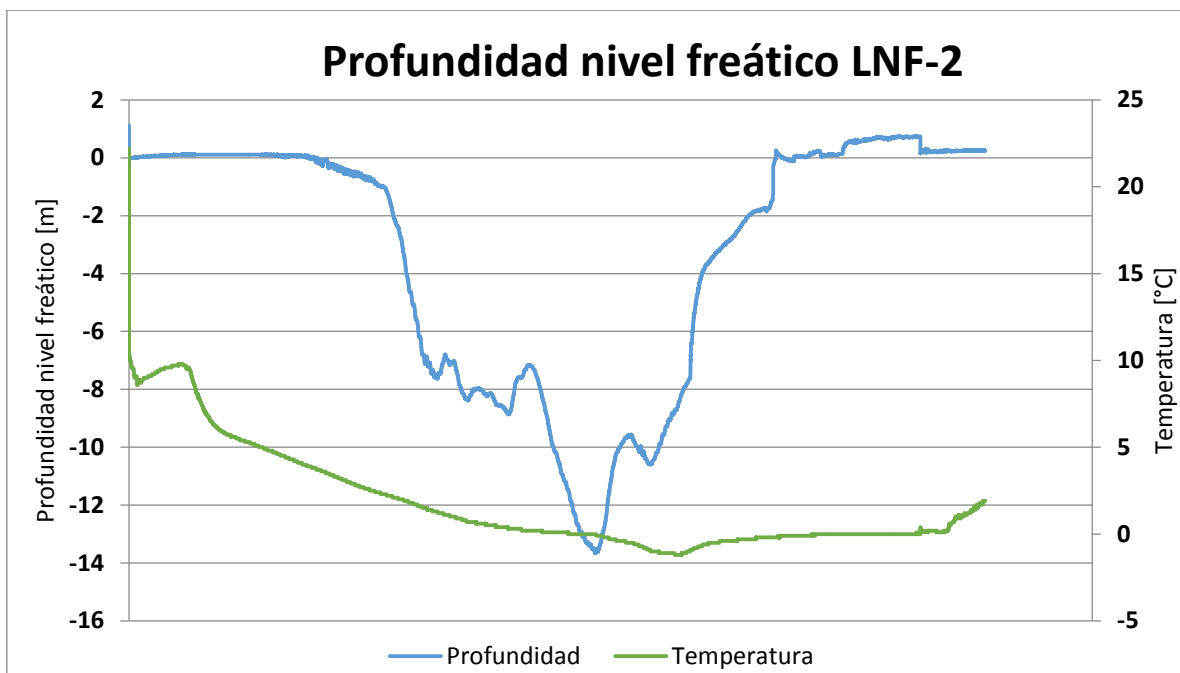


Figura 8-18: Variación temporal del nivel freático y la temperatura, LNF-2.

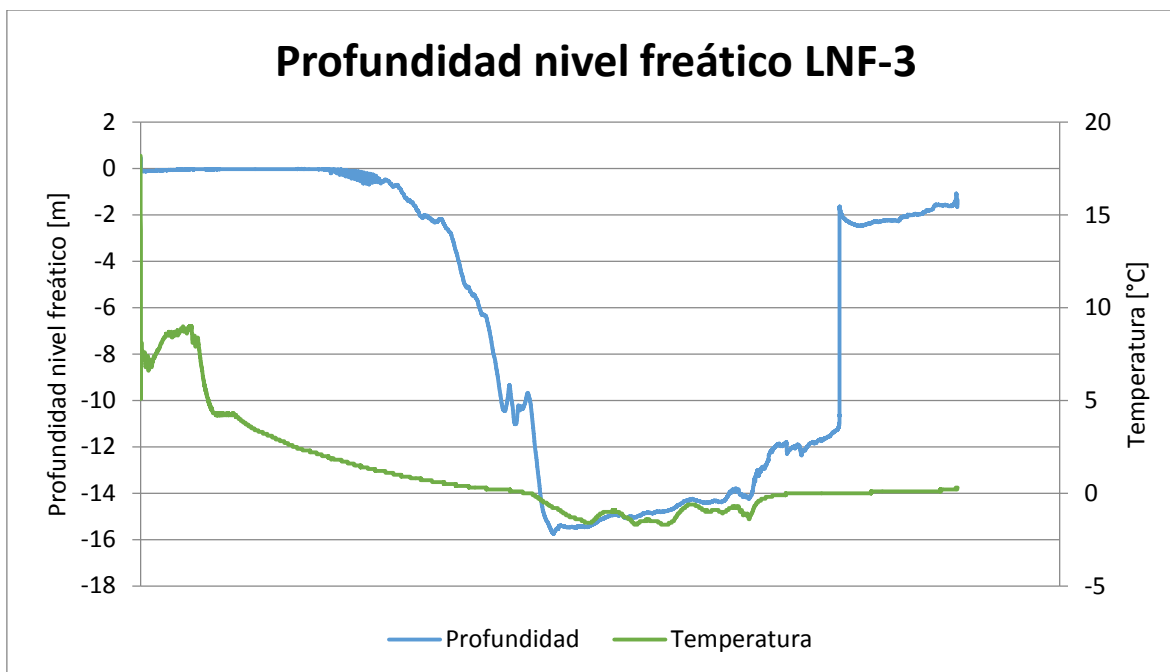


Figura 8-19: Variación temporal del nivel freático y la temperatura, LNF-3.

8.1.4.3 Validación de la metodología con las mediciones en terreno

Para implementar la metodología descrita por Johnson (2009), fue necesario en primer lugar realizar una validación de ésta, de modo tal de demostrar que sus estimaciones son aplicables al contexto de las cuencas Alto Andinas. Para esto, se han utilizado los datos de terreno de los cuatro lisímetros ubicados en la cuenca del Salar de Pedernales (que fueron instalados por la DGA en el año 2015), con el objetivo de comparar estos resultados con los obtenidos por Johnson (2009) en puntos cercanos dentro de la misma cuenca (ver Figura 8-20). Al procesar los datos de los lisímetros, se obtuvo que tanto PED-3 como PED-4 presentaron resultados consistentes con la metodología de Johnson (2009), ya que el resto de los lisímetros mostraron resultados inconsistentes con el fenómeno que se deseaba estudiar (evaporación vs profundidad de la napa). La información de los lisímetros válidos permitió construir las curvas de tasa de evaporación vs profundidad del nivel freático, las cuales se ajustaron de excelente manera a los datos medidos por Johnson (2009) en las zonas denominadas Z9 y Z10, tal como se muestra en la Figura 8-21 y Figura 8-22. En base a lo anterior, se ha concluido que es válido aplicar el análisis realizado por Johnson (2009) en la zona de interés.



Figura 8-20: Lisímetros PED-3 y PED-4 para validación con Zona 9 y 10 de Johnson (2009). Salar de Pedernales.

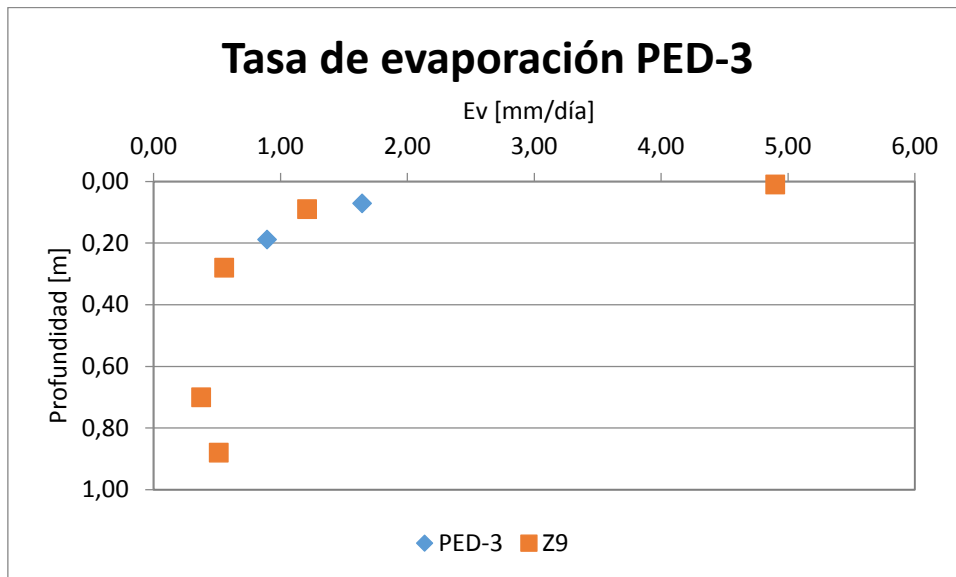


Figura 8-21: Comparación PED-3 con Zona 9 de Johnson (2009) para validación de metodología.

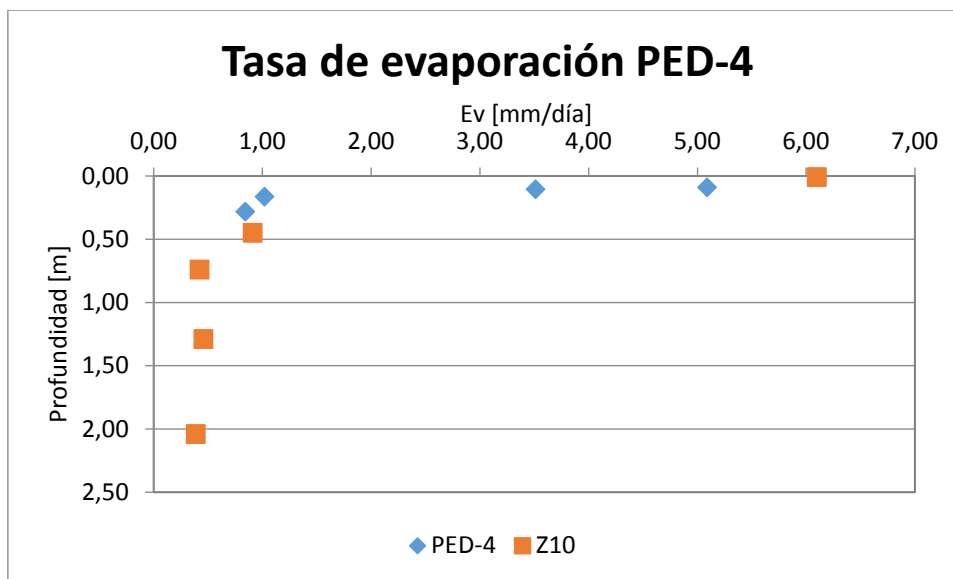


Figura 8-22: Comparación PED-4 con Zona 10 de Johnson (2009) para validación de metodología.

8.1.4.4 Estimación de la evaporación directa

Luego de la validación, se han considerado tres escenarios evaporantes distintos (Johnson, 2009), los cuales consideran una profundidad de extinción de 2,5 [m] bajo el nivel de terreno. Para cada cuenca, se ha seleccionado uno de estos escenarios en función de su ubicación, tipo de suelo y de su altitud, ya que esta variable se relaciona estrechamente con la temperatura, la cual influye -de gran manera- en cuánta agua es capaz de evaporarse. Además, la elección del escenario se ha realizado de manera consistente con cuencas adyacentes, ya que poseen características hidrometeorológicas similares.

Para estimar la evaporación directa, se definieron las superficies evaporantes en cada una de las cuencas, y a partir de imágenes satelitales y pozos cercanos, se definieron las zonas donde el nivel freático se encontraba entre 0 y 2,5 [m]. Esta información permitió construir curvas de isoprofundidad, a partir de lo cual se estimó el área de cada una de las isoprofundidades, lo que junto al escenario elegido, permitió determinar la tasa de evaporación en un rango característico para cada una de las cuencas analizadas.

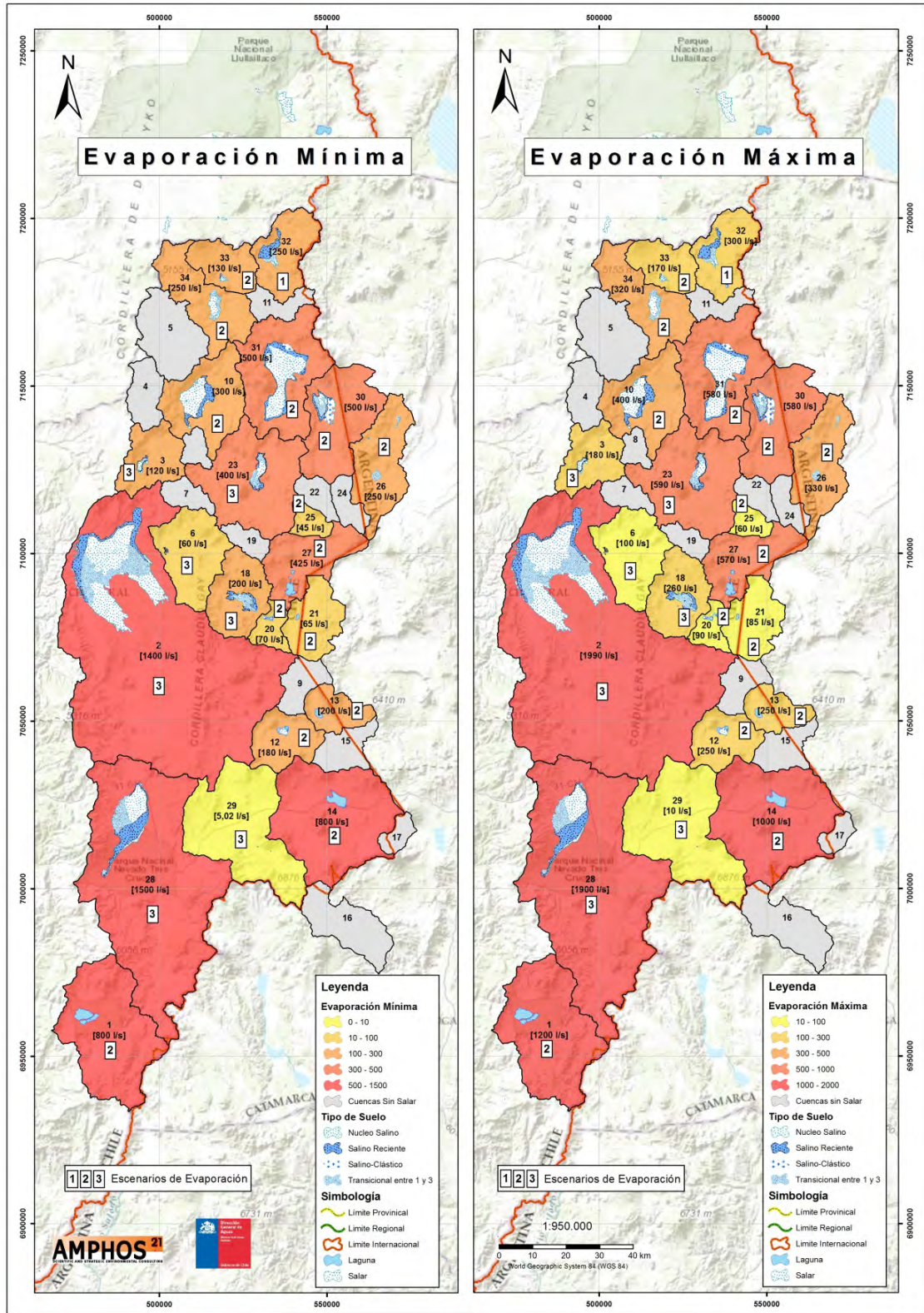


Figura 8-23: Estimación de la evaporación mínima y máxima preliminar en las cuencas Alto-Andinas.

8.1.5 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 hay variaciones temporales del volumen de agua almacenado en las cuencas, por lo tanto no se consideran las variaciones en el almacenamiento en cada una de ellas. Es importante destacar, además, que los balances realizados son preliminares debido a la falta de información y a la incertidumbre existente en la estimación de cada una de las variables hidrogeológicas involucradas en el balance.

El resultado de los balances, considerando todas las entradas y salidas descritas anteriormente, se presenta a modo de resumen en la Tabla 8-5 y en forma más compacta en la Figura 8-24:



Figura 8-24: Entradas y salidas consideradas en los balances hídricos, para cada cuenca.

Tabla 8-5: Resumen balances hídricos por cuenca.

| 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) |

| 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 |
|-----------|----------------------|----------------|------------|-------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------|----------------------|----------------|---------------|---------------|---|
| 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) |
| 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) |

8.1.6 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, y 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.

Según el Atlas del Agua de Chile 2016, se entiende por "derecho consuntivo" a aquellos derechos de agua que facultan al titular del mismo a consumir totalmente las aguas otorgadas. Por el contrario, los derechos no consuntivos, permiten emplear el agua sin consumirla y obligan a restituirla en la forma que lo determine el acto de adquisición o de constitución del derecho (DGA, 2016). La oferta equivale al volumen sustentable de los recursos hídricos de la cuenca; siendo el volumen sustentable la cantidad de agua anual asociada a la recarga del acuífero, es decir, al flujo de agua que lo alimenta naturalmente que proviene de precipitaciones, embalsamientos y escurrimientos superficiales y subterráneos. El volumen sustentable es aquel susceptible de constituir como derecho de aprovechamiento de aguas con carácter definitivo (DGA, 2016).

Se ha identificado que aquellas cuencas que cuentan con derechos de agua y solicitudes en trámites pertenecen en su gran mayoría a empresas mineras y, por tanto, constituyen derechos tipos consuntivos. Sin embargo, y dado que de todos los derechos otorgados por la DGA se desconoce si efectivamente están siendo bombeados y cuánto es el caudal de extracción. Por lo cual se ha considerado un factor de uso entre 0,7 y 0,9%, estas estimaciones se corresponden con los escenarios de usos considerados en la DGA sobre la zona de estudio en términos globales, ya que no se estaría ejerciendo el 100% de los derechos con el máximo caudal permitido.

En la Tabla 8-6 se presenta un resumen del balance de oferta y demanda en las cuencas Alto-Andinas. En dicha tabla se puede observar que casi todas cuencas tienen un superávit (disponibilidad), a excepción 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).

Tabla 8-6: 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 | Wheelwrioth | 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.

9. Hidrogeología y Modelos Conceptuales

En los siguientes párrafos se resumen los aspectos de mayor importancia referentes a la hidrogeología y modelos conceptuales.

- A partir de las Unidades Geológicas descritas en cada una de las cuencas, se asignó una Unidad Hidrogeológica preliminar.
- Se trazaron **acuíferos saturados inferidos** en toda la zona de estudio (Figura 9-1, Tabla 9-1). El trazado de estos acuíferos es resultado de un acucioso análisis de la piezometría, en aquellas cuencas que presentaban pozos o piezómetros, imágenes satelitales, análisis geofísico y observaciones de terreno. Cabe mencionar y enfatizar el nombre "**acuíferos saturados inferidos**" en cuanto a que estos **no corresponden** a todas las unidades hidrogeológicas susceptibles de formar acuíferos de la cuenca, sino más bien a aquellas zonas donde se tiene suficiente certeza que están saturadas de agua (interpretado de manera preliminar en base a la existencia de pozos con nivel de agua y a otros criterios hidrogeológicos) y, por tanto, hay napa subterránea.
- Se dibujaron curvas de igual nivel piezométrico o **isopiezas** dentro de los acuíferos saturados inferidos construyendo mapas de piezometría (Figura 9-2). Debido a que se tiene la suficiente certeza de la existencia de una napa subterránea es posible dibujar líneas de flujo de agua. Los mapas de piezometría de detalle se presentan en los informes individuales de cada cuenca.
- A partir de la interpretación de los datos obtenidos en la campaña de terreno y con la información existente referente al contexto geológico, hidrológico, geofísico e hidrogeoquímico se elaboró un **modelo conceptual hidrogeológico** para cada una de las 34 cuencas. (Ver Anexo 6.5), donde los aspectos más relevantes para su elaboración fueron:
 - ✓ Valoración e interpretación de la información geofísica
 - ✓ Caracterización de acuíferos principales
 - ✓ Áreas de recarga y descarga
 - ✓ Piezometría y dirección de flujo
 - ✓ Tratamiento de datos de hidroquímica e isótopos

Tabla 9-1: Superficie acuíferos saturados por cuenca

| Nº CUENCA | NOMBRE CUENCA | SUPERFICIE ACUÍFERO SATURADO (Km²) |
|------------------|------------------------------|--|
| 1 | Laguna del Negro Francisco | 146,4 |
| 2 | Salar de Pedernales | 1071,8 |
| 3 | Salar de Infieles | 13,2 |
| 4 | Cerro el Encanche | 6,5 |
| 5 | Cerro Blanco | 28,5 |
| 6 | La Laguna | 71,1 |
| 7 | Qda. Los Maranceles | 5,9 |
| 8 | Cerro Conito de los Infieles | 0 |
| 9 | Sierra Nevada | 5,8 |
| 10 | Salar de Aguilar | 89,6 |
| 11 | Qda. La Rossa | 7,1 |
| 12 | Wheelwright | 62,2 |
| 13 | Laguna Escondida | 29,7 |
| 14 | Laguna Verde | 128,7 |
| 15 | Qda. Las Amarillas | 22,1 |
| 16 | Cerro Agua Caliente | 0 |
| 17 | Cerro Nevado de Incahuasi | 0 |
| 18 | Salar de Piedra Parada | 57,9 |
| 19 | Cerro Agua de Morales | 5,3 |
| 20 | Lagunas del Jilguero | 13,2 |
| 21 | Laguna del Bayo | 48,5 |
| 22 | Qda. El Llano | 13,8 |
| 23 | Salar Grande | 151,2 |
| 24 | Qda. la Trinchera | 5,3 |
| 25 | Laguna de las Parinas | 11,0 |
| 26 | Laguna de Colorados | 67,5 |
| 27 | Lagunas Bravas | 36,2 |
| 28 | Salar de Maricunga | 579,8 |
| 29 | Piedra Pómez | 175,9 |
| 30 | Salar de las Parinas | 72,6 |
| 31 | Salar de la Isla | 200,2 |
| 32 | Salar de Gorbea | 46,3 |
| 33 | Salar de la Azufrera | 23,0 |
| 34 | Salar de Agua Amarga | 38,8 |

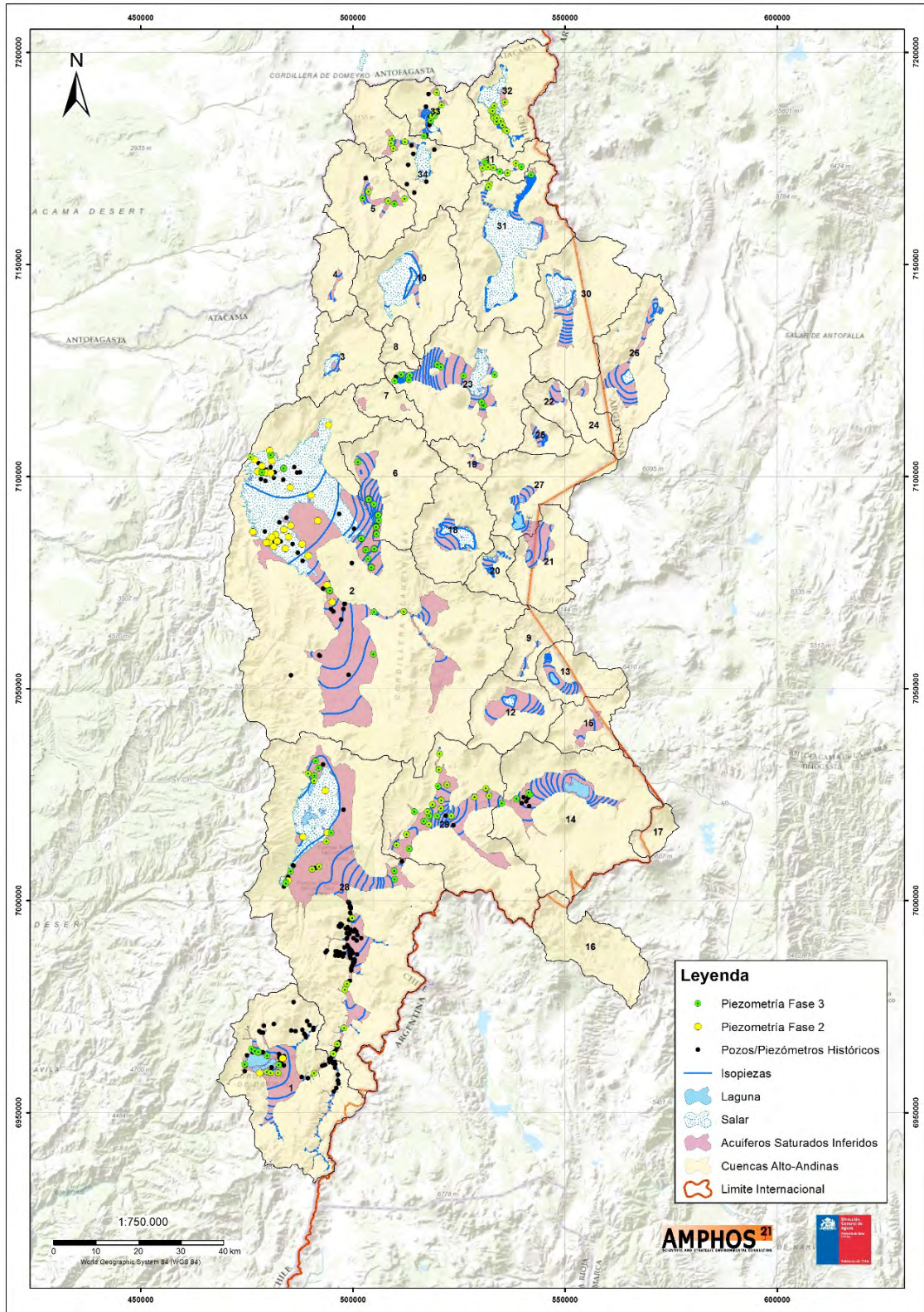


Figura 9-2: Mapa resumen con la distribución de los pozos/piezómetros, puntos monitoreados durante las Fases 2 y 3 e isopiezas generadas a partir de la piezometría.

- Por otra parte, 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 caudal sobrante de cuencas adyacentes. En la Figura 9-4 y Tabla 9-2 se expone un resumen de las conexiones.
- Se han generado nuevos **perfiles hidrogeológicos** esquemáticos en aquellas cuencas de mayor interés, los cuales fueron calibrados con información de pozos y geofísica. Se exponen los más importantes a continuación:

Límite entre Laguna del Negro Francisco (C1) y Salar de Maricunga (C28)

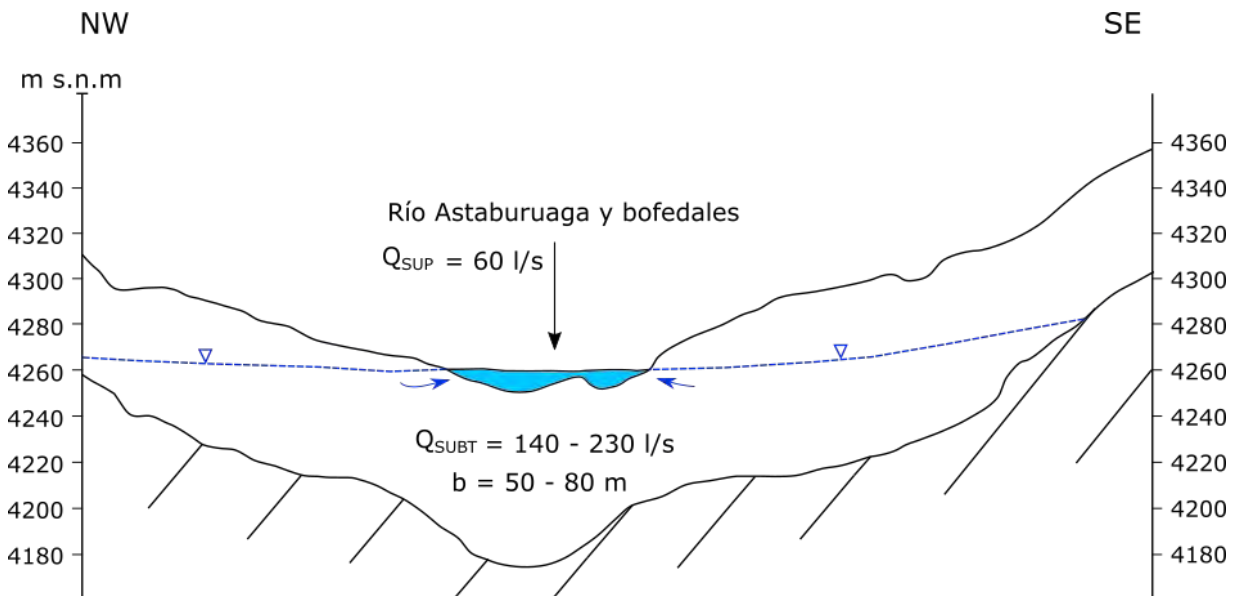


Figura 9-3: Perfil esquemático del sector Pampa Pantanillo, límite entre las cuencas Laguna del Negro Francisco (C1) y Salar de Maricunga (C28). Elaboración propia.

El río Astaburuaga tiene un caudal en su paso por la estación fluviométrica "Río Astaburuaga en Cono" de 60 L/s, el cual se infiltra por completo cuando el río llega a la llanura de la cuenca debido al aumento del espesor del material sedimentario y por consiguiente la profundización del nivel piezométrico respecto a la superficie del suelo.

Tabla 9-2: Resumen conexiones laterales subterráneas inter-cuencas.

| N° Cuenca | Nombre Cuenca | Tipo | Entrada Lateral [l/s] | Salida Lateral [l/s] | Comentarios |
|-----------|------------------------------|---------|-----------------------|----------------------|--|
| 1 | Laguna del Negro Francisco | | 0,0 | 0,0 | |
| 2 | Salar de Pedernales | Entrada | 340,0 | 0,0 | Entradas laterales de 260 [l/s] (C6) y 80 [l/s] (C7). DAA en uso |
| 3 | Salar de Infieles | Entrada | 10,0 | 0,0 | Entrada lateral de 10 [l/s] (C4) |
| 4 | Cerro el Encanche | Salida | 0,0 | 65,0 | Salidas laterales de 10 [l/s] (C3) y 55 [l/s] (C10) |
| 5 | Cerro Blanco | Salida | 0,0 | 170,0 | Salida lateral de 50 [l/s] (C34) y 120 [l/s] pérdida al subsuelo |
| 6 | La Laguna | Salida | 0,0 | 258,0 | Salida lateral de 258 [l/s] (C2) |
| 7 | Qda. Los Maranceles | Salida | 0,0 | 83,0 | Salida lateral de 83 [l/s] (C2) |
| 8 | Cerro Conito de los Infieles | Salida | 0,0 | 41,0 | Salida lateral de 41 [l/s] (C10) |
| 9 | Sierra Nevada | Salida | 0,0 | 120,0 | Salida lateral de 100 [l/s] (C13) y 20 [l/s] pérdida al subsuelo |
| 10 | Salar de Aguilar | Entrada | 60,0 | 0,0 | Entradas laterales de 20 [l/s] (C4) y 40 [l/s] (C8) |
| 11 | Qda. La Rossa | Salida | 0,0 | 100,0 | Salida lateral de 100 [l/s] (C31) |
| 12 | Wheelwright | | 0,0 | 0,0 | |
| 13 | Laguna Escondida | Entrada | 100,0 | 0,0 | Entrada lateral de 100 [l/s] (C9) |
| 14 | Laguna Verde | Entrada | 160,0 | 0,0 | Entradas laterales de 20 [l/s] (C29) y 140 [l/s] (C15) |
| 15 | Qda. Las Amarillas | Salida | 0,0 | 140,0 | Salida lateral de 140 [l/s] (C14) |
| 16 | Cerro Agua Caliente | Salida | 0,0 | 358,0 | Cuenca exorreica, sale todo por escorrentía/infiltración |
| 17 | Cerro Nevado de Incahuasi | Salida | 0,0 | 74,0 | Cuenca exorreica, sale todo por escorrentía/infiltración |
| 18 | Salar de Piedra Parada | | 0,0 | 0,0 | |
| 19 | Cerro Agua de Morales | Salida | 0,0 | 65,0 | Salida lateral de 65 [l/s] (C23) |
| 20 | Lagunas del Jilguero | | 0,0 | 0,0 | |
| 21 | Laguna del Bayo | Salida | 0,0 | 160,0 | Salida lateral de 160 [l/s] (C27) |
| 22 | Qda. El Llano | Salida | 0,0 | 64,0 | Salida lateral de 64 [l/s] (C30) |
| 23 | Salar Grande | Entrada | 65,0 | 0,0 | Entrada lateral de 65 [l/s] (C19) |
| 24 | Qda. la Trinchera | Salida | 0,0 | 77,0 | Salida lateral de 77 [l/s] (C30) |
| 25 | Laguna de las Parinas | | 0,0 | 0,0 | |
| 26 | Laguna de Colorados | | 0,0 | 0,0 | |
| 27 | Lagunas Bravas | Entrada | 160,0 | 0,0 | Entrada lateral de 160 [l/s] (C21) |
| 28 | Salar de Maricunga | Entrada | 700,0 | 0,0 | Entrada lateral de 700 [l/s] (C29). DAA en uso |
| 29 | Piedra Pómez | Salida | 0,0 | 720,0 | Salidas laterales de 20 [l/s] (C14) y 700 [l/s] (C28) |
| 30 | Salar de las Parinas | Entrada | 141,0 | 0,0 | Entradas laterales de 64 [l/s] (C22) y 77 [l/s] (C24) |
| 31 | Salar de la Isla | Entrada | 100,0 | 0,0 | Entrada de 100 [l/s] (C11) |
| 32 | Salar de Gorbea | | 0,0 | 0,0 | |
| 33 | Salar de la Azufrera | | 0,0 | 0,0 | |
| 34 | Salar de Agua Amarga | Entrada | 50,0 | 0,0 | Entrada de 50 [l/s] (C5) |

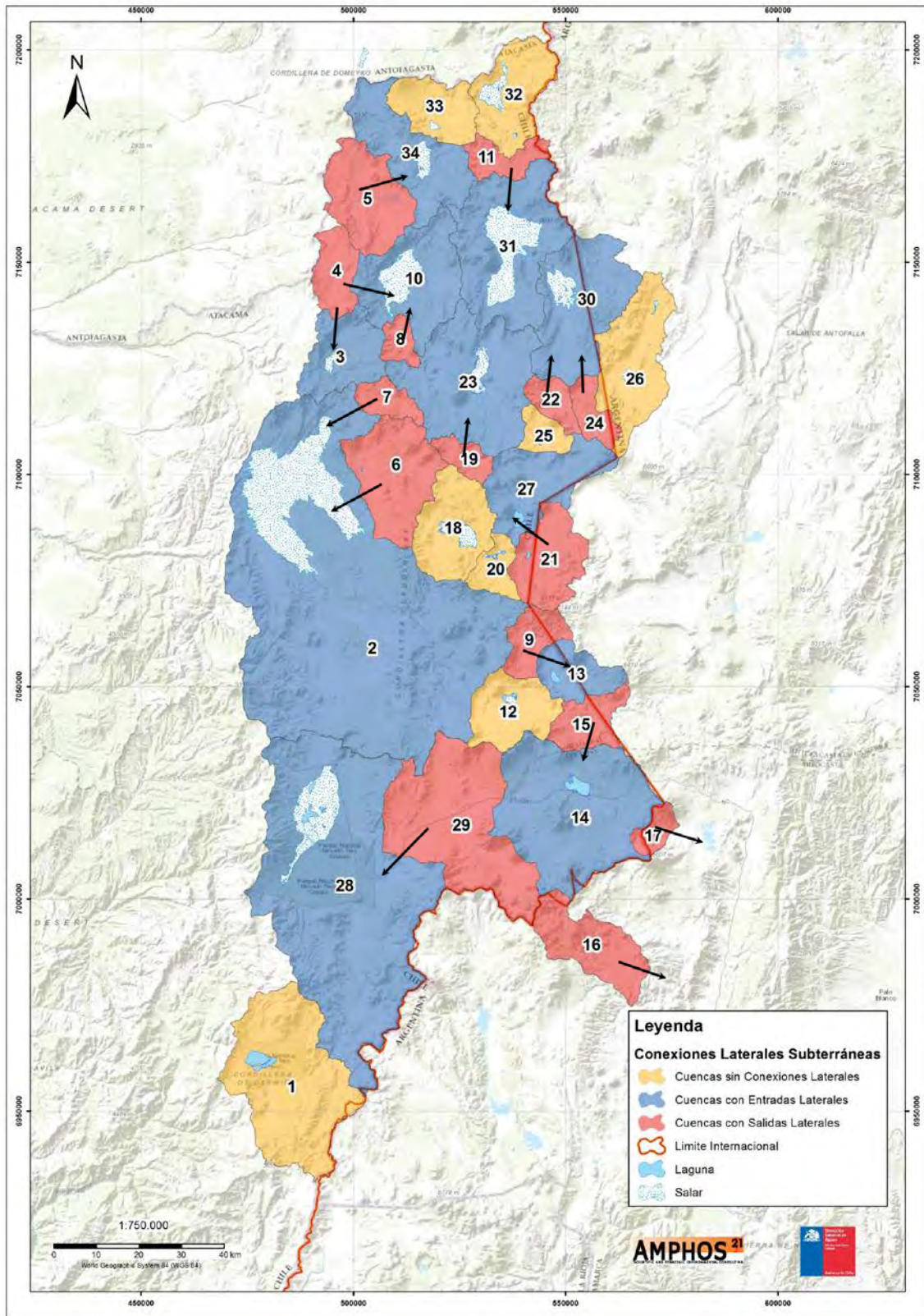


Figura 9-4: Mapa resumen de conexiones laterales subterráneas inter-cuencas

A partir de la información geofísica levantada en este sector se observó un ligero desplazamiento de la divisoria de aguas hacia la cuenca de Maricunga (C28). Los perfiles geofísicos P7 y P3, emplazado en Pampa Pantanillo, permiten explorar las condiciones hidrogeológicas en el límite de las cuencas Laguna del Negro Francisco y Salar de Maricunga. El perfil gravimétrico permite confirmar la continuidad longitudinal de la unidad acuífera principal, que se desarrolla en el relleno sedimentario existente. El nivel basal se presenta como un horizonte sinuoso (se calibró con los piezómetros cercanos EA-2 y NW-1B), en el cual se producen singularidades que modifican la potencia del acuífero y condicionan la dirección del flujo subterráneo en la vecindad de la divisoria de aguas. El espesor mínimo registrado, de 48 m, se ubica inmediatamente al NE del río Astaburuaga, mientras que los valores máximos se encuentran hacia el SW y NE de este punto, alcanzando valores del orden de 150 m.

El perfil TEM, además, presenta un núcleo de muy baja resistividad eléctrica distante, aproximadamente, 900 m hacia el NE de la divisoria de aguas de superficie, es decir en la cuenca Salar de Maricunga. Esta zona de muy baja resistividad se asocia a coladas de lava de época Mioceno, coincidente con las formaciones que se observan a ambos lados del cauce, lo cual conformaría una barrera hidrogeológica entre ambas cuencas que controla el flujo preferente del río Astaburuaga hacia el SW, así como de los flujos subterráneos del acuífero hacia la cuenca del Laguna del Negro Francisco que se estima de entre 140 y 230 l/s (estimado por Darcy, con un $b=50-90$ y $K=10-25$ m/día) (Figura 9-3).

Conexión Salar de Pedernales (C2) y La Laguna (C6)

Destaca un aporte subterráneo desde la cuenca de La Laguna hacia el Salar de Pedernales en su margen oriental donde se observa descargas de los manantiales denominados Llano de los Gases Blancos (SERNAGEOMIN 2000). Se ha calculado el flujo subterráneo mediante Darcy con caudales que varían entre 180 y 260 l/s (Figura 9-5)

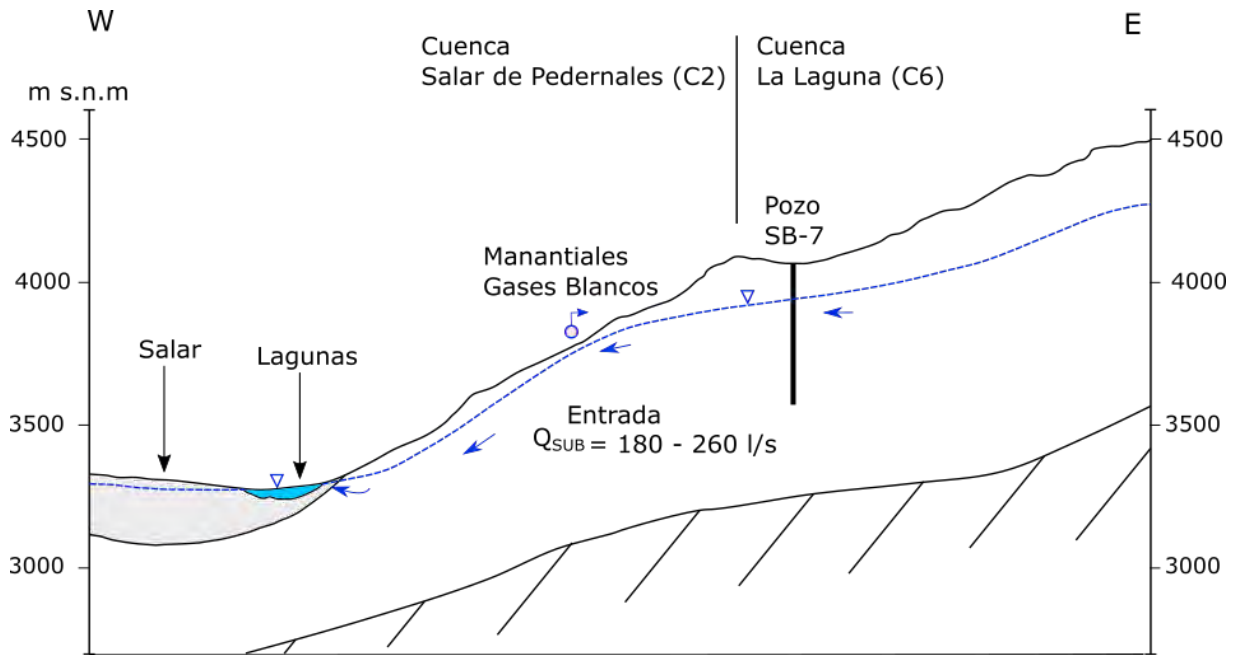


Figura 9-5: Perfil esquemático de conexión entre cuenca del Salar de Pedernales (C2) y La Laguna (C6). Elaboración propia.

Sección Hidrogeológica en Salar Grande

En la Figura 9-6 se muestra un perfil esquemático del sector sur del Salar Grande donde se ha calculado por Darcy el flujo subterráneo proveniente de ambos flancos del salar. Los cálculos sugieren un aporte cercano a los 360 l/s desde el W y un caudal de 220 l/s desde el E.

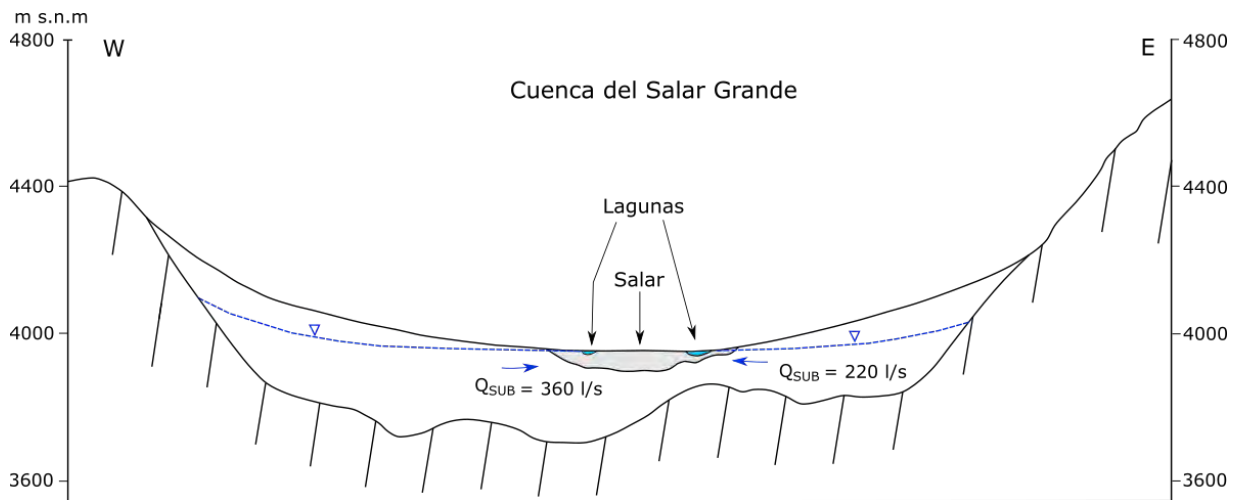


Figura 9-6: Perfil esquemático W-E que abarca toda la cuenca del Salar Grande (C23). Elaboración propia

10. Diseño conceptual, factibilidad técnica y económica de trasvase (Etapa IV, Fase 3)

En este apartado se presenta el análisis del diseño, factibilidad técnica y económica de un proyecto de trasvase desde las cuencas Alto Andinas hasta la Cuenca del Río Copiapó.

De acuerdo los resultados del balance hídrico y modelo conceptual de cada una de las cuencas Alto Andinas analizadas en este estudio, se han elegido las cuencas Laguna del Negro Francisco (C1), Salar de Pedernales (C2), Salar de Maricunga (C28) y Piedra Pómez (C29) para evaluar el proyecto de trasvase de agua hacia la Cuenca del Río Copiapó.

En este contexto, se describen las especificaciones técnicas como caudal, ubicación de bocatoma, ruta, ubicación de las descargas, y las necesidades de tratamiento del agua para su uso. Además, se consideran los costos de financiamiento, construcción, operación y mantenimiento, y determinación de costo por [l/s] del agua en el largo plazo.

10.1 Antecedentes de trasvase en las cuencas alto andinas

En el estudio realizado por DGA-Arcadis (2015) "Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama, Fase 2" se desarrolló un proyecto conceptual preliminar de trasvase desde la quebrada Potrero Grande (sur de la cuenca Salar de Pedernales) hacia la cuenca del río Copiapó. Para la selección del sitio para trasvase se buscó un sector donde hubiera evidencia de agua disponible, tuviera una alta capacidad de almacenamiento, permeabilidad y transmisibilidad, una recarga estable y que además no alterara en forma significativa el ecosistema en los alrededores (a pesar de no tener suficientes antecedentes para determinar con exactitud un posible caudal de bombeo). En dicho lugar, se estimó un volumen embalsado del acuífero de alrededor de 11.000 Hm³, que hay considerar un período de operación de 50 años se obtuvo un caudal de 350 l/s, que sumando caudales de recarga (600 l/s), restando los derechos a terceros (850 l/s) (DGA-Aquaterra, 2013), obtuvieron finalmente un caudal aprovechable de 100 l/s. Además, en los sectores de Salar de Pedernales Norte y Salar de Pedernales Sur, se han realizado pruebas de bombeo por un caudal de 50 l/s (Universidad de Chile, 2013) y según resoluciones DGA (N°44 de 2013 y N°01 de 2014), se han otorgado derechos provisionales de aguas subterráneas en alrededor 300 l/s (DGA-Arcadis, 2015).

Basado en lo anterior, se definieron tres alternativas hídricas de trasvase con un *trade-off* entre una menor longitud de trazado versus un mayor bombeo dada la diferencia de cota. En la Figura 10-1 se presenta la disposición de las tres alternativas de trasvase consideradas en el estudio de DGA-Arcadis (2015), las cuales se resumen a continuación:

- **Alternativa de trasvase n° 1**

La primera alternativa de trasvase considera captar el agua en el sector al sur del cerro La Ola 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 trasvase n° 2**

La segunda alternativa de trasvase contempla captar el agua en el sector de la quebrada Potrero Grande, impulsarla por el borde del camino C-173 hacia el sur por 25 kilómetros, empalmar con el camino internacional 31 Ch, antes de llegar al complejo fronterizo San Francisco, y continuar hacia el poniente hasta cruzar la cordillera de Domeyko.

- **Alternativa de trasvase n° 3**

La alternativa 3 de trasvase considera la captación de agua en la quebrada Potrero Grande, para luego conducirla hacia el sur por el costado del camino C-173, empalmar continuar por el camino internacional 31 Ch hasta el cruce con el camino C-601 por donde se dirige hacia el sur poniente bordeando el salar de Maricunga y donde finalmente se direcciona hacia el poniente por el sur de la Laguna Santa Rosa por donde se pasa la cordillera Domeyko.

En la Tabla 10-1 se presentan las características principales de estas tres alternativas de trasvase, junto con la estimación de las dimensiones de las tuberías de impulsión y potencia de bombeo para tres tipos de caudales (50, 100 y 300 l/s).

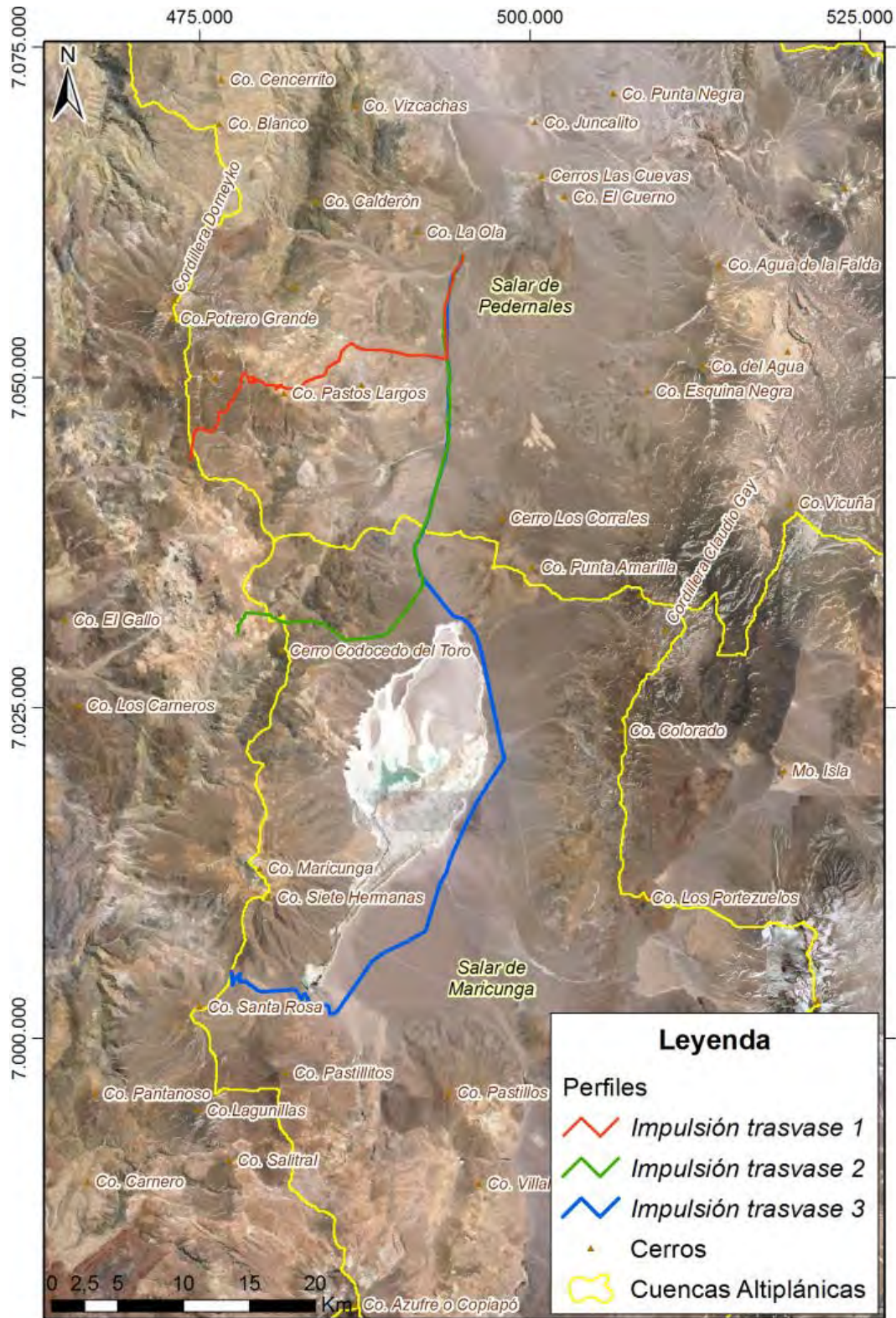


Figura 10-1. Disposición de las alternativas para trasvase
Fuente: DGA-Arcadis, 2015

Tabla 10-1. Características técnicas de las tres alternativas de trasvase del estudio de DGA-Arcadis 2015

| Parámetros | Unidad | Alternativa N° 1 (Valor) | Alternativa N° 2 (Valor) | Alternativa N° 3 (Valor) |
|---|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Cota inicial de trasvase | m | 3.660 | 3.660 | 3.660 |
| Cota final de trasvase | m | 4.670 | 4.390 | 4.120 |
| Diferencia de altura (geométrica) | m | 1.000 | 730 | 457 |
| Largo de tubería de trasvase | m | 25.700 | 39.000 | 76.400 |
| <i>Caudal de bombeo Q₁ (50 l/s)</i> | | | | |
| Diámetro de tubería de trasvase | pulg. | 8 | 8 | 8 |
| Velocidad de flujo | m/s | 1,6 | 1,6 | 1,6 |
| Pérdidas de energía | m | 243 | 368 | 722 |
| Potencia de bombeo | kW | 787 | 691 | 743 |
| <i>Caudal de bombeo Q₂ (100 l/s)</i> | | | | |
| Diámetro de tubería de trasvase | pulg. | 12 | 12 | 12 |
| Velocidad de flujo | m/s | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| Pérdidas de energía | m | 116 | 176 | 345 |
| Potencia de bombeo | kW | 1.414 | 1.139 | 1.009 |
| <i>Caudal de bombeo Q₃ (200 l/s)</i> | | | | |
| Diámetro de tubería de trasvase | pulg. | 16 | 16 | 16 |
| Velocidad de flujo | m/s | 1,7 | 1,7 | 1,7 |
| Pérdidas de energía | m | 132 | 200 | 392 |
| Potencia de bombeo | kW | 2.868 | 2.339 | 2.137 |
| <i>Caudal de bombeo Q₄ (300 l/s)</i> | | | | |
| Diámetro de tubería de trasvase | pulg. | 18 | 18 | 18 |
| Velocidad de flujo | m/s | 1,9 | 1,9 | 1,9 |
| Pérdidas de energía | m | 139 | 233 | 456 |
| Potencia de bombeo | kW | 4.420 | 3.659 | 3.481 |

Fuente: Elaboración a partir de ARCADIS, 2015.

De acuerdo a los datos anteriores y considerando las partidas más relevantes en términos de costos para el análisis económico (suministro de acero, revestimiento de acero, suministro de HDPE, bomba de impulsión y costo de operación y mantenimiento), en el estudio de DGA-Arcadis (2015) se estimaron los costos totales de inversión y de operación y mantenimiento para las tres alternativas de trasvase y para los tres caudales de bombeo en cada alternativa del estudio, los cuales se presentan en la Tabla 10-2.

Tabla 10-2. Costos del sistema de trasvase del estudio de DGA-Arcadis, 2015

| Ítem | Unidad | Alternativa N° 1 (Valor) | Alternativa N° 2 (Valor) | Alternativa N° 3 (Valor) |
|---|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <i>Caudal de bombeo Q₁ (50 l/s)</i> | | | | |
| Sistema de bombas 600 HP (2) | USD | 680.400 | 680.400 | 680.400 |
| Tubería de impulsión acero 8" | USD | 8.228.793 | 12.468.209 | 24.442.580 |
| Tubería de aducción HDPE ϕ 200 | USD | 8.354.534 | 8.354.534 | 8.354.534 |
| Total Inversión | USD | 17.263.727 | 21.503.144 | 25.122.980 |
| Operación y mantenimiento | USD/año | 786.633 | 786.633 | 786.633 |
| <i>Caudal de bombeo Q₂ (100 l/s)</i> | | | | |
| Sistema de bombas 600 HP (3) | USD | 1.360.800 | 1.020.600 | 1.020.600 |
| Tubería de impulsión acero 12" | USD | 15.902.055 | 24.094.683 | 47.235.029 |
| Tubería de aducción HDPE ϕ 250 | USD | 12.986.542 | 12.986.542 | 12.986.542 |
| Total Inversión | USD | 30.249.398 | 38.101.825 | 48.255.629 |
| Operación y mantenimiento | USD/año | 1.573.266 | 1.161.220 | 1.161.220 |
| <i>Caudal de bombeo Q₃ (200 l/s)</i> | | | | |
| Sistema de bombas 800 HP (6) | USD | 2.721.600 | 2.268.000 | 2.268.000 |
| Tubería de impulsión acero 16" | USD | 15.902.055 | 36.194.632 | 70.955.676 |
| Tubería de aducción HDPE ϕ 355 | USD | 27.378.432 | 27.378.432 | 27.378.432 |
| Total Inversión | USD | 46.002.087 | 65.841.064 | 100.602.108 |
| Operación y mantenimiento | USD/año | 3.071.615 | 2.572.165 | 2.572.165 |
| <i>Caudal de bombeo Q₄ (300 l/s)</i> | | | | |
| Sistema de bombas 800 HP (6) | USD | 3.628.800 | 3.628.800 | 3.628.800 |
| Tubería de impulsión acero 16" | USD | 29.547.269 | 44.769.814 | 87.766.396 |
| Tubería de aducción HDPE ϕ 355 | USD | 34.651.930 | 34.651.930 | 34.651.930 |
| Total Inversión | USD | 67.827.999 | 83.050.544 | 126.047.126 |
| Operación y mantenimiento | USD/año | 4.070.514 | 4.070.514 | 4.070.514 |

Fuente: Elaboración a partir de DGA-Arcadis, 2015.

En cuanto a la rentabilidad económica del proyecto en el largo plazo, en dicho estudio se determinaron los indicadores económicos (Valor Actual Neto y Tasa Interna de Retorno) de cada alternativa de trasvase considerando los costos de inversión, operación y mantenimiento, en contraposición a los beneficios del sistema por la venta del agua. El precio de venta del agua en el tiempo se proyectó para tres escenarios, el primero consideraron un precio fijo de \$1.000/m³; el segundo escenario un aumento anual del precio de venta del agua del 3% respecto al año anterior y el último escenario contemplaron un aumento anual del precio de venta del agua del 5%. De estos tres escenarios el primero es el único proyecto rentable considerando la alternativa 1 de trasvase, para un caudal de porteo de 200 l/s y

300 l/s y para una tasa de descuento del 6%. Sin embargo, el proyecto se haría rentable con una tasa de descuento del 10%, únicamente para los escenarios 2 y 3 donde el precio de venta del agua aumenta en un 3 y 5% respectivamente, y para ambas considerando la alternativa de trasvase 1 y para un caudal de 200 l/s. En la Tabla 10-3 se presentan los resultados del escenario n°1 más rentable, el cual se comparará con los resultados obtenidos en este estudio.

Tabla 10-3. Rentabilidad de las tres alternativas de trasvase para escenario n°1

| Alternativa de trasvase | Caudal de bombeo (l/s) | VAN Social (USD) | VAN Privado (USD) | TIR (%) |
|-------------------------|------------------------|------------------|-------------------|---------|
| 1 | 50 | -\$ 4.965.621 | -\$ 7.342.361 | 2% |
| | 100 | -\$ 6.009.564 | -\$ 10.972.359 | 3% |
| | 200 | \$ 1.991.895 | -\$ 8.857.138 | 7% |
| | 300 | \$ 9.239.015 | -\$ 8.626.786 | 8% |
| 2 | 50 | -\$ 8.851.879 | -\$ 11.021.194 | -1% |
| | 100 | -\$ 9.237.163 | -\$ 14.993.591 | 2% |
| | 200 | -\$ 11.381.462 | -\$ 22.687.497 | 4% |
| | 300 | -\$ 4.715.437 | -\$ 21.836.432 | 5% |
| 3 | 50 | -\$ 12.170.170 | -\$ 14.162.374 | -2% |
| | 100 | -\$ 18.545.118 | -\$ 23.804.743 | 0% |
| | 200 | -\$ 43.246.784 | -\$ 52.852.039 | -1% |
| | 300 | -\$ 44.130.246 | -\$ 59.147.516 | 1% |

Fuente: DGA-Arcadis, 2015

10.2 Criterios de diseño

En la elaboración del diseño de trasvase se han adoptados criterios y supuestos basados en estudios previos, ya que no se tienen suficientes antecedentes de terreno (obras de ingeniería, caudales de bombeo, costos de instalación, niveles de explotación de los acuíferos y respuesta al bombeo, cantidad de agua disponible para trasvasar, etc.) para elaborar un diseño de trasvase de mayor precisión. En los siguientes apartados se presentan los principales criterios y supuestos considerados en el diseño conceptual del trasvase.

- **Selección del sitio para el trasvase de agua**

La definición del sitio más idóneo en las cuencas alto andinas analizadas, que permita trasvasar agua hacia la cuenca del río Copiapó es una tarea compleja. Esto se debe principalmente a la falta de antecedentes suficientes y estudios específicos de trasvase en la zona de estudio. Por lo tanto, se tomarán en cuenta: el estudio de trasvase realizado por DGA-Arcadis (2015), los derechos otorgados, los antecedentes analizados, los resultados del modelo conceptual hidrogeológico y el balance hídrico de las cuencas Salar cuencas Laguna del Negro Francisco (C1), Salar de Pedernales (C2), Salar de Maricunga (C28) y Piedra Pómez (C29) de este estudio. Dichas cuencas están ubicadas en la parte alta de la cuenca del río Copiapó y poseen caudales con una calidad aceptable que son factibles de trasvasar.

Ahora bien, en estas cuencas se encuentra el Parque Nacional Nevado Tres Cruces y sitio RAMSAR (C1) y su corredor biológico Ciénaga Redonda Pantanillo (C1 y C28) que presentan ecosistemas muy sensibles. Además, se han identificados otros sitios que están protegidos dentro del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), los Sitios prioritarios de Estrategia Regionales de Biodiversidad (SERB) y los sitios que están bajo el convenio RAMSAR que busca la conservación y buen uso de los humedales y sus recursos. La delimitación de estos sitios en el sector de estudio se presentan en la Figura 10-2.

Por lo tanto, los sectores que se analizarán tendrán una mínima interferencia de los sitios antes indicados, procurando evitar posibles descensos de niveles de agua subterránea en los ecosistemas. Es por ello, que se descartaron preliminarmente las cuencas Salar de Maricunga, Laguna del Negro Francisco. La cuenca Salar de Pedernales también se descartó, principalmente por su alta demanda de recurso y su sobre otorgamientos en derechos de aprovechamiento de agua.

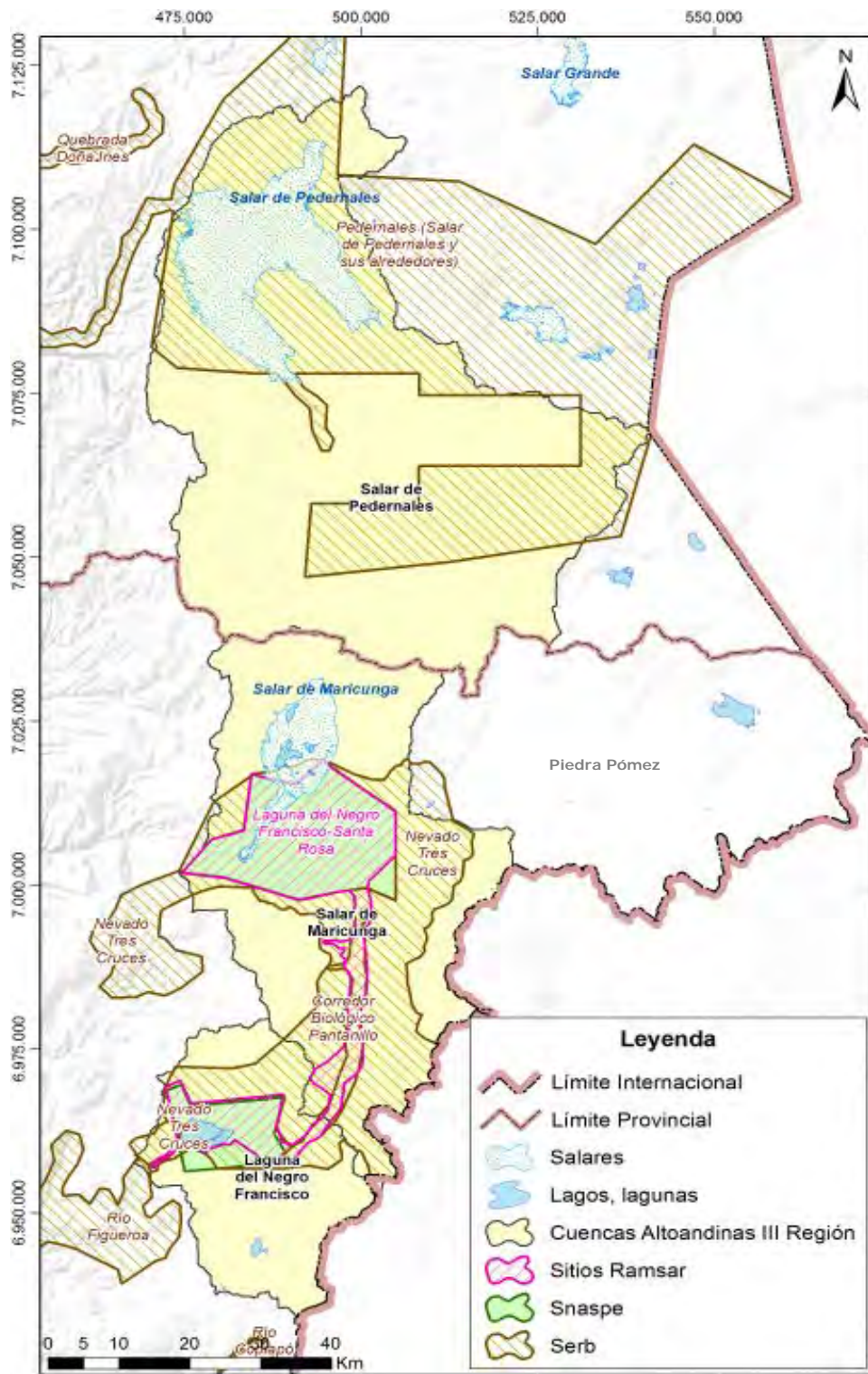


Figura 10-2. Áreas silvestres protegidas, sitios Ramsar y sitios prioritarios para la conservación de la Biodiversidad en el sector de estudio

Fuente: DGA-Arcadis, 2015

Por lo tanto, se priorizó la cuenca Piedra Pómez, por su buena disponibilidad de recursos hídricos que se explicará más adelante. En esta cuenca se buscó un sector que no alterara en forma significativa los ecosistemas asociados, y que además contara con caudales disponibles para trasvasar, buena calidad de agua y con una recarga que permita la sustentabilidad del recurso.

- **Análisis de las alternativas para el trasvase**

Basado en todo lo anterior, se identificaron dos alternativas de trasvase, cuya disposición se presenta en Figura 10-3.

- **Alternativa N° 1.** Corresponde a la mejor alternativa de trasvase desarrollada por DGA-Arcadis (2015) en el estudio de "Diagnóstico de disponibilidad hídrica en cuencas Alto-Andinas de la Región de Atacama, Fase 2", cuyas características principales ya han sido presentada en el apartado 10.1 de este documento.
- **Alternativa N° 2.** Corresponde a la mejor alternativa desarrollada por DGA-Amphos 21 (2016) en el marco del presente estudio. 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. Las características de esta alternativa se detalla a continuación. Por lo tanto, esta alternativa considera captar el agua de la cuenca "Piedra Pómez (C29)" en el punto "Pozo 1" y conducirla hacia el sur poniente por la carretera Ch-31 hasta la coordenadas (504937 E y 7004562 N), luego continuar por sobre camino secundario hasta la carretera C-601 y continuar por dicha carretera hasta el poniente tal como se muestra en la Figura 10-4. La Figura 10-5 refleja el perfil atravesado por esta alternativa.



*Nota: 1: Alternativa trasvase (DGA-Arcadis, 2015); 2: Alternativa trasvase (DGA-Amphos 21, 2016)

Figura 10-3. Disposición de las alternativas para trasvase
Fuente: Elaboración propia con base Google Earth.

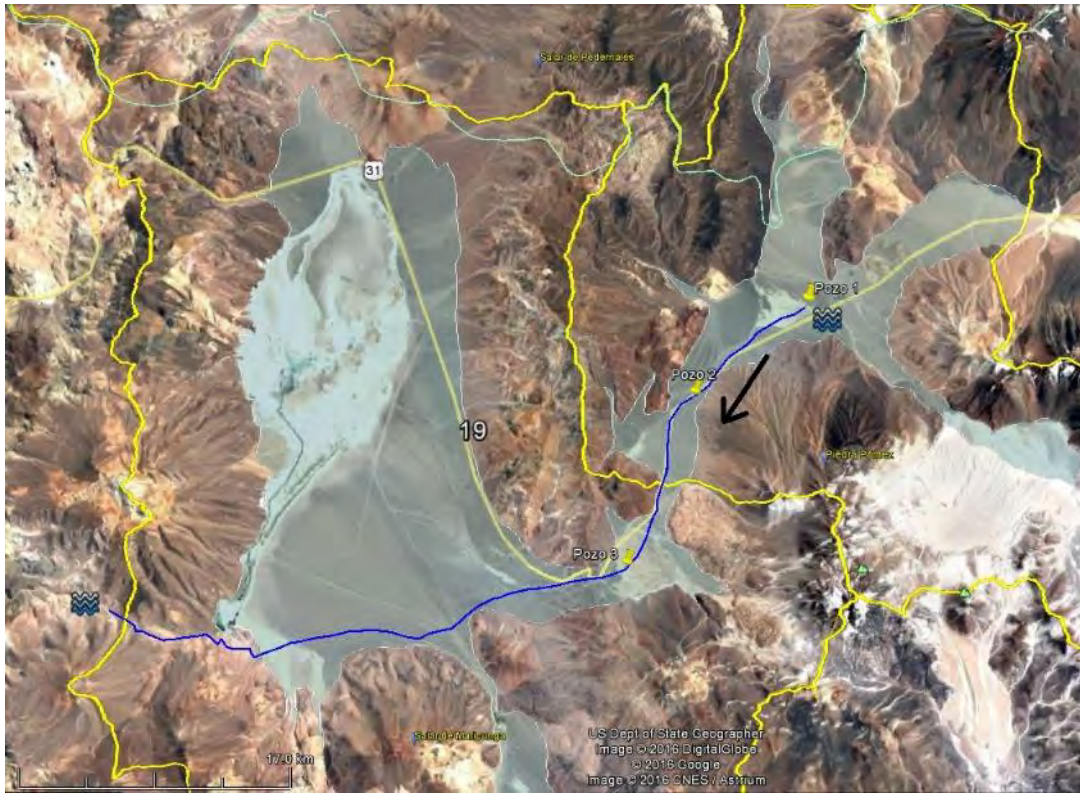


Figura 10-4. Disposición de la alternativa DGA-Amphos 21 (2016) para trasvase
Fuente: Elaboración propia con base Google Earth.

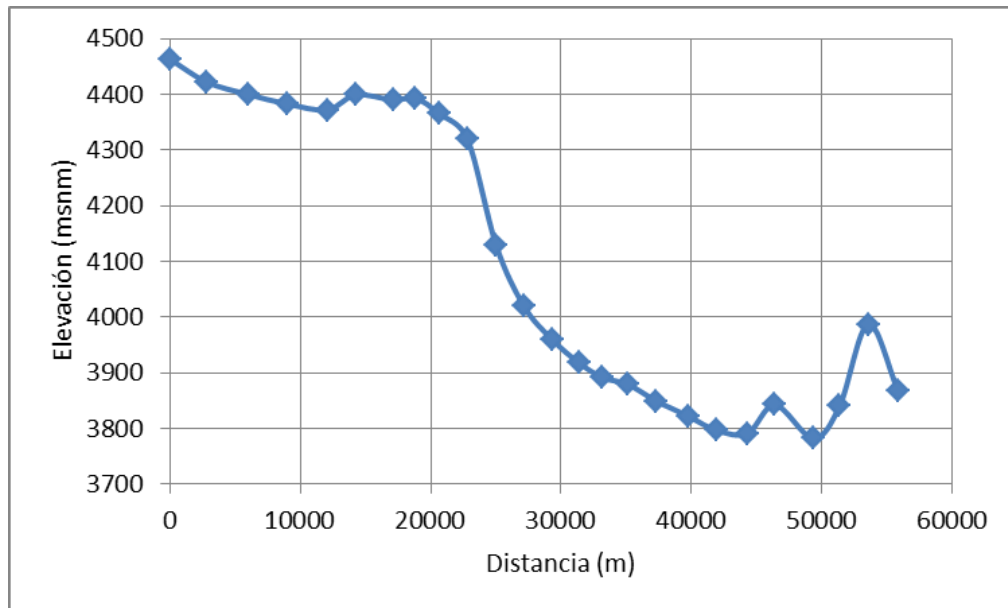


Figura 10-5. Perfil de la alternativa DGA-Amphos 21 (2016) para trasvase
Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

- **Caudal disponible para el trasvase**

En base a los resultados del modelo conceptual hidrogeológico, se ha considerado factible diseñar un trasvase por un caudal de 200 [l/s] desde la cuenca "Piedra Pómez (C29)", los cuales pueden ser aprovechados mediante tres pozos de bombeo (Figura 10-4) para no provocar grandes conos de depresión: donde el "Pozo 1" (zona de captación principal) tendría un caudal de 80 [l/s], el "Pozo 2" un caudal de 70 [l/s] y el "Pozo 3" un caudal de 50 [l/s]. En la cuenca Piedra Pómez se ha estimado un volumen de agua de entrada (recarga + escorrentía) en alrededor de 734 [l/s], presentando muy pocas solicitudes de aprovechamiento de aguas subterráneas (4 en total) que suman alrededor de 250 [l/s], lo cual demuestra la sustentabilidad de la cuenca. Sin embargo, dada la incertidumbre en la cantidad de agua disponible que pudiese ser trasvasado a la cuenca del río Copiapó, se evaluarán cuatro escenarios de caudales de bombeo: 50, 100, 200 y 300 [l/s].

- **Cálculo de la potencia de bombeo**

Para el diseño del bombeo necesario para realizar el trasvase se realizó una cuantificación de las pérdidas friccionales a lo largo del trazado de una tubería de conducción de agua. Debido a las altas presiones internas que se pueden producir en el bombeo de agua, se utilizarán tuberías de acero para las impulsiones según lo sugerido en el estudio de DGA-Arcadis (2015) para trasvase de este tipo.

Dado lo anterior, se calcularon las pérdidas friccionales a lo largo de todo el trazado de impulsión, a través de la fórmula de Darcy-Weisbach, cuya expresión es la siguiente:

$$\Lambda_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

Λ_f : Pérdidas friccionales [m]

f : Coeficiente de fricción [adimensional]

L: Largo de la tubería de impulsión [m]

D: Diámetro de la tubería de impulsión [m]

v: Velocidad de escurrimiento [m/s]

g: Aceleración de gravedad = 9,8 [m/s²]

Por otro lado, el coeficiente de fricción (f) se estimó en función de la relación explícita de Colebrook-White que se presenta a continuación (DGA-Arcadis, 2015):

$$f = \left[1,14 - 2 \cdot \log \left(\frac{K_s}{D} + \frac{21,5}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^{-2}$$

Donde:

f : Coeficiente de fricción [adimensional]

K_s : Rugosidad absoluta de la tubería de acero = 0,2 [mm]

Re : Número de Reynolds = $v \cdot d / \nu$ [adimensional]

ν : Viscosidad del agua = $1,2 \times 10^{-6}$ [m²/s]

Por lo tanto, una vez que se han determinado las pérdidas friccionales del sistema, se calculó la **potencia de impulsión (Pot)** en cada estación de bombeo de las alternativas mediante la siguiente expresión:

$$Pot = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_m}{\eta}$$

Donde:

Pot: Potencia de impulsión [KW]

γ : Peso específico del agua = 10,77 kN/m³

Q : Caudal de impulsión [l/s]

H_m : Altura manométrica = altura geométrica + pérdidas de energía en el sistema [m]

η : Eficiencia de la bomba = 85 [%]

Las pérdidas que se consideraron en la expresión anterior corresponden a las pérdidas friccionales en la tubería, más las pérdidas singulares (entrada, salida, cambios de dirección y pendiente, elementos mecánicos, etc.). Dado que estas últimas pérdidas representan un valor despreciable frente a las pérdidas friccionales, se adoptará el valor determinado en el estudio de DGA-Arcadis (2015), es decir, un 10% de las pérdidas friccionales.

- **Características alternativa N° 2 (DGA-Amphos 21, 2016)**

Las principales características de esta alternativa de trasvase en comparación con otros estudios, junto con la estimación de las dimensiones de las tuberías de impulsión y potencia de bombeo se presentan en la Tabla 10-4.

Tabla 10-4. Características técnicas de la alternativa selección en comparación con otros estudios

| Parámetros | Unidad | Valores alternativa (AMPHOS 21, 2016) | Valores alternativa (ARCADIS, 2015) |
|---|---------------|--|--|
| Cota inicial de trasvase | m | 4.460 | 3.660 |
| Cota final de trasvase | m | 3.870 | 4.670 |
| Diferencia de altura (geométrica) | m | 590 | 1.000 |
| Largo de tubería de trasvase | m | 55.850 | 25.700 |
| <i>Caudal de bombeo Q₁ (50 l/s)</i> | | | |
| Diámetro de tubería de trasvase | pulg. | 8 | 8 |
| Velocidad de flujo | m/s | 1,6 | 1,6 |
| Coef. de fricción | - | 0,0208 | 0,0148 |
| Pérdidas de energía | m | 742 | 243 |
| Potencia de bombeo | kW | 844 | 787 |
| <i>Caudal de bombeo Q₂ (100 l/s)</i> | | | |
| Diámetro de tubería de trasvase | pulg. | 12 | 12 |
| Velocidad de flujo | m/s | 1,4 | 1,4 |
| Coef. de fricción | - | 0,0193 | 0,0138 |
| Pérdidas de energía | m | 352 | 116 |
| Potencia de bombeo | kW | 1.193 | 1.414 |
| <i>Caudal de bombeo Q₃ (200 l/s)</i> | | | |
| Diámetro de tubería de trasvase | pulg. | 16 | 16 |
| Velocidad de flujo | m/s | 1,75 | 1,7 |
| Coef. de fricción | - | 0,0184 | 0,0142 |
| Pérdidas de energía | m | 394 | 132 |
| Potencia de bombeo | kW | 2.493 | 2.868 |
| <i>Caudal de bombeo Q₄ (300 l/s)</i> | | | |
| Diámetro de tubería de trasvase | pulg. | 18 | 18 |
| Velocidad de flujo | m/s | 1,9 | 1,9 |
| Coef. de fricción | - | 0,0181 | 0,0135 |
| Pérdidas de energía | m | 405 | 139 |
| Potencia de bombeo | kW | 3.784 | 4.420 |

Fuente: Elaboración propia

10.3 Análisis económico

Para el análisis económico de las alternativas de trasvase se han considerado los costos de inversión el suministro, construcción y montaje del sistema de bombeo y de la tubería de impulsión, así como los costos anuales, los costos de operación y mantención del sistema de bombeo. En la Tabla 10-5 se presentan los precios unitarios considerados en el presente análisis económico tomado del estudio de DGA-Arcadis (2015).

Tabla 10-5. Precios unitarios considerados en el análisis económico

| Ítem | Valor | Unidad |
|---------------------------------|-------|--------------------|
| Suministro de acero | 2 | USD/kg |
| Revestimiento de acero | 45 | USD/m ² |
| Suministro de HDPE | 4 | USD/kg |
| Bomba de impulsión | 350 | USD/HP |
| Costo de operación y mantención | 120 | USD/MWh |

Fuente: ARCADIS, 2015

- **Costos de inversión y operación del sistema de trasvase**

A partir de los precios unitarios anteriores, se estimaron los costos totales de inversión y de operación y mantención para las alternativas de trasvase y para los tres caudales de bombeo en cada alternativa.

Tabla 10-6: Costos del sistema de trasvase DGA-Amphos 21 (2016) en comparación con otros estudios

| Ítem | Unidad | Valores alternativa (AMPHOS 21, 2016) | Valores alternativa (ARCADIS, 2015) |
|--|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| <i>Caudal de bombeo Q₁ (50 l/s)</i> | | | |
| Sistema de bombas 600 HP (2) | USD | 680.400 | 680.400 |
| Tubería de impulsión acero 8" | USD | 17.817.183 | 8.228.793 |
| Tubería de aducción HDPE ϕ200 | USD | 8.354.534 | 8.354.534 |
| Total Inversión | USD | 26.852.118 | 17.263.727 |
| Operación y mantención | USD/año | 786.633 | 786.633 |
| <i>Caudal de bombeo Q₂ (100 l/s)</i> | | | |
| Sistema de bombas 600 HP (3) | USD | 1.020.600 | 1.360.800 |
| Tubería de impulsión acero 12" | USD | 34.496.618 | 15.902.055 |
| Tubería de aducción HDPE ϕ250 | USD | 12.986.542 | 12.986.542 |
| Total Inversión | USD | 48.503.760 | 30.249.397 |
| Operación y mantención | USD/año | 1.198.679 | 1.573.266 |
| <i>Caudal de bombeo Q₃ (200 l/s)</i> | | | |
| Sistema de bombas 800 HP (5) | USD | 2.268.000 | 2.721.600 |
| Tubería de impulsión acero 16" | USD | 27.290.691 | 15.902.055 |
| Tubería de aducción HDPE ϕ355 | USD | 27.378.432 | 27.378.432 |
| Total Inversión | USD | 56.937.123 | 46.002.087 |
| Operación y mantención | USD/año | 2.572.165 | 3.071.615 |
| <i>Caudal de bombeo Q₄ (300 l/s)</i> | | | |
| Sistema de bombas 800 HP (7) | USD | 3.175.200 | 3.628.800 |
| Tubería de impulsión acero 16" | USD | 64.122.181 | 29.547.269 |
| Tubería de aducción HDPE ϕ355 | USD | 34.651.930 | 34.651.930 |
| Total Inversión | USD | 101.949.310 | 67.827.999 |
| Operación y mantención | USD/año | 3.571.064 | 4.070.514 |

Fuente: Elaboración propia

10.3.1 Rentabilidad del proyecto en el largo plazo

La rentabilidad económica del proyecto, se ha determinado en base a distintitos indicadores económicos de cada alternativa de trasvase (Valor Actual Neta o VAN, Tasa Interna de Retorno o TIR, Tasa de descuento social y tasa de descuento probado) considerando los costos de inversión, operación y mantención. Dichos costos se compararán con los beneficios del sistema por venta del agua y se considerará un horizonte de 20 años.

Se utilizó un factor de producción de las bombas del 75%, con el cual se determinó el volumen de agua factible de vender anualmente. Las inversiones se repartieron en los dos primeros años del análisis, obteniendo beneficios a partir del tercer año. Así mismo, los costos de operación y mantención se descuentan a partir del tercer año.

El precio de venta del agua en el tiempo se proyectó para tres escenarios, el primero considerando un precio fijo de mil pesos por metros cúbicos (\$1000/m³) el cual corresponde a la tarifa del metro cúbico de agua en Copiapó según el estudio tarifario del año 2015 de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) (DGA-Arcadis, 2015). El segundo escenario considera un aumento anual del precio de venta del agua del 3% respecto al año anterior y el último escenario contempla un aumento anual del precio de venta del agua del 5%.

- Escenario 1

A continuación se presenta el resumen de los resultados de la evaluación económica considerando el escenario 1 de precio de agua, para las cuatro condiciones de caudal de bombeo, 50, 100, 200 y 300 [l/s].

Tabla 10-7. Rentabilidad de la alternativa de trasvase para el escenario 1

| Alternativa de trasvase | Caudal de bombeo (l/s) | VAN Social (USD) | VAN Privado (USD) | TIR (%) |
|-------------------------|------------------------|------------------|-------------------|---------|
| 1 | 50 | -\$ 14.014.496 | -\$ 15.200.807 | -3% |
| | 100 | -\$ 14.853.570 | -\$ 18.788.983 | 1% |
| | 200 | \$ 15.887.031 | \$ 5.557.393 | 8% |
| | 300 | \$ 12.620.107 | -\$ 3.163.821 | 7% |

Fuente: Elaboración propia.

- Escenario 2:

La rentabilidad a largo plazo para las cuatro condiciones de bombeo, considerando el escenario 2 del precio del agua, se presentan en la Tabla 10-8. Hay que señalar que en este escenario en particular, si bien la tasa de descuento social se mantiene en un 5%, la tasa de descuento privado es del 6%, en lugar del 7% que se considera en los escenarios 1 y 3.

Tabla 10-8. Rentabilidad de la alternativa de trasvase para el escenario 2

| Alternativa de trasvase | Caudal de bombeo (l/s) | VAN Social (USD) | VAN Privado (USD) | TIR (%) |
|-------------------------|------------------------|------------------|-------------------|---------|
| 1 | 50 | -\$ 13.435.779 | -\$ 14.137.122 | -3% |
| | 100 | -\$ 13.696.136 | -\$ 15.926.575 | 1% |
| | 200 | \$ 18.201.900 | \$ 12.459.650 | 9% |
| | 300 | 16.092.410 | \$ 7.314.199 | 7% |

Fuente: Elaboración propia

- Escenario 3:

Para un aumento anual del precio de venta del agua del 5%, se presenta a continuación el resumen de la rentabilidad calculada para los cuatro caudales de trasvase (Tabla 10-9).

Tabla 10-9. Rentabilidad de la alternativa de trasvase para el escenario 3

| Alternativa de trasvase | Caudal de bombeo (l/s) | VAN Social (USD) | VAN Privado (USD) | TIR (%) |
|-------------------------|------------------------|------------------|-------------------|---------|
| 1 | 50 | -\$ 13.049.967 | -\$ 14.401.552 | -3% |
| | 100 | -\$ 12.924.513 | -\$ 17.190.472 | 1% |
| | 200 | \$ 19.745.145 | \$ 8.754.414 | 9% |
| | 300 | \$ 18.407.279 | \$ 1.631.710 | 7% |

Fuente: Elaboración propia

De los resultados de los análisis de rentabilidad se puede concluir que, para un precio de venta fijo de \$1.000/m³, es decir para el Escenario 1, los caudales rentables son 200 y 300 [l/s].

Del mismo modo, el escenario 2 es rentable para las alternativas de bombeo a 200 y 300 [l/s]; si bien en este caso la tasa de descuento privada es del 6% y ambos caudales de bombeo ofrecen mejores garantías.

En el caso en que el precio de venta del agua aumentase un 5% de su valor base, se tendría el mejor escenario posible en tanto a la rentabilidad esperada. En este caso, los caudales de 50 y 100 [l/s] siguen sin mostrarse adecuados, pero los retornos frente a caudales de 200 y 300 [l/s] son óptimos (a una tasa de descuento social del 5% y una tasa de descuento privado del 7%).

Esta evaluación económica considera varios supuestos sujetos a cambios o variaciones en función de que se disponga de mayores antecedentes y se procese una mayor información de terreno. Asimismo, este análisis no considera los costos de aquellas obras que no correspondiesen (por ejemplo, construcción de los pozos, obras de ingeniería, costos de instalación, niveles de explotación de los acuíferos, etc.), lo que no quita que dichos montos pudieran llegar a tener repercusión en los resultados finales de la rentabilidad calculada. Por todo lo expuesto, se recomienda tomar la información aquí presente como referencial y a medida que se tenga acceso a nuevos datos o a un análisis más detallado, afinar la evaluación y las cantidades finales.

11. Conclusiones generales a nivel regional y local

11.1 Geología

- Se han recopilado todos los mapas geológicos de la zona de estudio incluyendo mapas tanto chilenos como argentinos. Durante la Fase 1, DGA-Aquaterra (2013) recopiló y elaboró mapas geológicos en 9 de las 34 cuencas, los cuales fueron utilizados en los informes individuales de las cuencas correspondientes.
- Se ha caracterizado la geología de cada una de las 34 cuencas de estudio a partir de los mapas geológicos oficiales del SERNAGEOMIN y SEGEMAR. Esta actividad se ha clasificado y ordenado en Depósitos no consolidados, Rocas Estratificadas, Rocas Intrusivas y Conjuntos Volcánicos, cuando corresponda.
- 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. En los informes individuales se han expuesto las más representativas.
- Se han recopilado 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.
- Finalmente, se ha concentrado toda esta información en un proyecto SIG de modo de poder facilitar su visualización.

Adicionalmente, durante la ejecución de los trabajos de esta Fase 3 se ha confeccionado una cartografía preliminar de tipos de suelo del salar para aquellas cuencas que poseen este tipo de formación. Corresponden a cartografías básicas, elaboradas en base a análisis de imágenes satelitales cuyo objetivo es exponer una idea referencial de la tipología de suelos de los salares.

11.2 Geofísica

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 documentos. A partir de esta actividad se destaca lo siguiente:

- Se ha proyectado la totalidad de la geofísica histórica en el 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 toda la información recabada, se ha utilizado la información más relevante de las prospecciones geofísicas para validar y esclarecer conexiones laterales inter cuencas, 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.

11.3 Hidroquímica

- Se recopiló una gran cantidad de información a partir de diversos documentos como EIA's 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 filtrar aquellos estudios cuya analítica fuera de fácil 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 recopilados, se rescataron 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 sulfato, cloruro, 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.**
- 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. 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 $\delta^{18}O$ y δ^2H 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.

11.4 Hidrología, balance y oferta hídrica

- Se han instalado nuevos y modernos sensores hidrometeorológicos en las cuencas Alto-Andinas: 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 decir 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 y **una red de estaciones piezométricas** compuesta por 19 piezómetros para el monitoreo continuo de nivel freático. Los datos que aportarán estas redes 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.
- Además, gracias a los lisímetros instalados fue posible generar curvas de evaporación versus la profundidad del nivel freático, las cuales fueron coherentes con los resultados obtenidos por antecedes en la zona. Con dichas **curvas se estimó una tasa de evaporación directa (desde lámina libre y nivel freático) representativa** para cada una de las cuencas analizadas.
- 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. Sin embargo, no se ha podido dilucidar cuánto de estas precipitaciones son nivales y cuánto pluviales, tema que se espera resolver con los nuevos equipos instalados (lisímetros y estaciones meteorológicas).

- 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) y del grado de permeabilidad y 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 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.

11.5 Hidrogeología y Modelos Conceptuales

- A partir de las Unidades Geológicas descritas en cada una de las cuencas, se asignó una Unidad Hidrogeológica preliminar.
- Se trazaron **acuíferos saturados inferidos** en toda la zona de estudio. El trazado de estos acuíferos es resultado de un acucioso análisis de la piezometría, en aquellas cuencas que presentaban pozos o piezómetros, imágenes satelitales, análisis geofísico y observaciones de terreno.
- Se dibujaron curvas de igual nivel piezométrico o **isopiezas** dentro de los acuíferos saturados inferidos construyendo mapas de piezometría.
- La interpretación de los datos obtenidos en la campaña de terreno y la información existente referente al contexto geológico, hidrológico, geofísico e hidrogeoquímico, ha permitido elaborar **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.

- 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.