Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama

INFORME PROYECTO CONSOLIDADO
Octubre 2021

Preparado para:

CORFO

Preparado por:

Centro UC Cambio Global

Con la asesoría de:

SEI Stockholm Environment Institute

UTS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY SYDNEY

eco group

Título del Proyecto: ***Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama***

Equipo de trabajo

Jefe de Proyecto	Sebastián Vicuña (DIHA-UC)
Especialista en Gestión de Recursos Hídricos	David Purkey (SEI)
Especialista en Gestión de Recursos Hídricos	Juan Carlos Castilla Rho (UTS)
Especialista en Modelación de Recursos hídricos	Pedro Sanzana (consultor independiente)
Especialista en Modelación de Recursos hídricos	Francisco Meza (DEMA-UC)
Especialista en economía	Oscar Melo (DEA-UC)
Especialista en ecología	Pablo A. Marquet (D Ecol -UC)
Especialista en ciencias sociales y actividades de participación	Juan Pablo Cerda (TECO Group)

Equipo de apoyo

Coordinador Proyecto	Eduardo Bustos (CCG-UC)
Ingeniero de Proyectos	Marcos Canales (DIHA-UC)
Ingeniero de Proyectos	Sebastián Aedo (CCG-UC)
Profesional de apoyo en ecología	Natalia Villavicencio (UC)
Ingeniero de Proyectos	Carlos Calvo (CCG-UC)
Experto en SIG	David Morales (CCG-UC)
Profesional de apoyo en procesos participativos	Constanza Pardo (TECO Group)
Profesional de apoyo en economía	Andrés Pica (CCG-UC)

Tabla de contenidos

Tabla de contenidos ii

Índice de figuras ix

Índice de tablas xx

Glosario xxv

Resumen ejecutivo xxviii

Introducción xxxviii

1 Cuenca del Salar de Atacama xxxviii
2 Convenio de Colaboración CORFO - DGA y proyecto Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama xxxviii
3 Objetivos del proyecto xxxix
3.1 Objetivo general xxxix
3.2 Objetivos específicos xl
4 Etapas del proyecto Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama xli

Etapa I: Levantamiento de información de base I-1

I.1 Resumen ejecutivo I-2
I.2 Introducción I-9
I.3 Revisión de antecedentes I-10
I.3.1 Introducción I-10
I.3.2 Recopilación, revisión y análisis de antecedentes I-10
I.3.3 Base de datos de antecedentes I-13
I.4 Descripción de la cuenca I-15
I.4.1 Introducción I-15
I.4.2 Situación geográfica I-15
I.4.3 Descripción del medio físico de la cuenca I-17
I.4.3.1 Caracterización climática I-17
I.4.3.2 Caracterización hidrológica I-17
I.4.3.2.1 Caracterización hidrográfica I-17
I.4.3.2.2 Caracterización morfológica I-21
I.4.3.3 Caracterización geológica I-21
I.4.3.3.1 Marco geomorfológico I-21
I.4.3.3.2 Marco geológico I-24
I.4.3.3.3 Geología estructural I-25
I.4.3.3.4 Descripción geológica del Salar de Atacama I-27
I.4.3.4 Caracterización hidrogeológica I-27
I.4.3.4.1 Unidades hidrogeológicas y sus parámetros hidráulicos I-27
I.4.3.4.2 Interfaz salina I-34
I.4.3.4.3 Piezometría I-36
I.4.3.4.4 Funcionamiento de los sistemas lagunares I-39
I.4.3.5 Caracterización de infraestructura hidráulica I-46

I.4.4 Descripción del medio biótico de la cuenca I-47
I.4.4.1 Caracterización de bioma I-47
I.4.4.2 Caracterización de ecosistemas I-47
I.4.4.2.1 Formaciones vegetales zonales I-47
I.4.4.2.2 Formaciones vegetales azonales I-51
I.4.4.2.3 Fauna I-53
I.4.4.2.4 Biota acuática I-53
I.4.5 Descripción del medio humano de la cuenca I-54
I.4.5.1 Dimensión Demográfica I-55
I.4.5.2 Pueblos Originarios I-57
I.4.5.2.1 Comunidades Indígenas I-58
I.4.5.2.2 Asociaciones indígenas I-61
I.4.5.2.3 Cosmovisión Atacameña y prácticas ancestrales I-62
I.4.5.3 Actividad Económica I-62
I.4.5.3.1 Agricultura I-65
I.4.5.3.2 Turismo I-70
I.4.5.3.3 Minería I-73
I.4.6 Descripción de la gestión del recurso hídrico I-75
I.4.6.1 Actores relevantes en la gestión de los recursos hídricos I-76
I.4.6.2 Instrumentos y herramientas de gestión I-85
I.4.6.2.1 Instrumentos de Planificación Territorial I-85
I.4.6.2.2 Instrumentos de Planificación de Recursos hídricos I-87
I.4.6.2.3 Instrumentos y herramientas para la gestión del aprovechamiento de los recursos hídricos I-94
I.4.6.2.4 Instrumentos y herramientas para la gestión de áreas naturales I-112
I.4.6.2.5 Instrumentos y herramientas para la gestión de territorios indígenas .. I-119
I.4.6.2.6 Otros instrumentos para la gestión del uso del territorio y sus recursos I-122
I.4.6.3 Monitoreo de apoyo a la gestión I-128
I.4.6.3.1 Monitoreo del medio físico I-128
I.4.6.3.2 Monitoreo del medio biótico I-149
I.4.6.3.3 Monitoreo del medio humano I-153
I.5 Descripción de trabajos previos en modelación I-156
I.5.1 Introducción I-156
I.5.2 Modelación hidrológica I-156
I.5.2.1 Modelación hidrológica conceptual I-156
I.5.2.2 Modelación hidrológica numérica I-162
I.5.3 Modelación hidrogeológica I-165
I.5.3.1 Modelación hidrogeológica conceptual I-166
I.5.3.2 Modelación hidrogeológica numérica I-170
I.5.4 Descripción de trabajos previos en modelación ecológica I-173
I.5.5 Descripción de trabajos previos en modelación integrada I-194
I.5.6 Modelación hidrológica e hidrogeológica integrada I-195
I.5.7 Modelación ecológica integrada I-198
I.5.8 Levantamiento de brechas en modelación I-199
I.6 Conclusiones I-202
Etapa II: Diagnóstico **II-1**

II.1 Resumen ejecutivo II-2
II.2 Introducción II-5
II.3 Antecedentes considerados en el diagnóstico II-6
II.3.1 Introducción II-6
II.3.2 Entradas y salidas de aguas a nivel superficial II-11
II.3.2.1 Precipitación II-11
II.3.2.1.1 Análisis de información proveniente de estaciones pluviométricas II-11
II.3.2.1.2 Distribución espacial de las precipitaciones a través de registros pluviométricos II-16
II.3.2.1.3 Distribución espacial de las precipitaciones a través de productos meteorológicos grillados II-18
II.3.2.2 Escorrentía superficial II-22
II.3.2.2.1 Estaciones fluviométricas y aforos II-24
II.3.2.2.2 Caudales naturalizados en San Pedro en Cuchabrachi II-32
II.3.2.2.3 Interacción entre ríos y acuíferos II-34
II.3.2.3 Evaporación II-40
II.3.2.3.1 Evapotranspiración II-41
II.3.2.3.2 Evaporación directa de las precipitaciones II-53
II.3.2.4 Recarga de acuíferos II-53
II.3.3 Balance hídrico a nivel superficial II-57
II.3.4 Entradas y salidas de agua y salmuera a nivel subterráneo II-57
II.3.4.1 Entradas al sistema subterráneo II-58
II.3.4.2 Salidas y evaporación del nivel freático II-58
II.3.4.3 Extracciones de agua dulce y salmuera II-65
II.3.5 Balance hídrico a nivel subterráneo II-65
II.4 Demanda de agua sectorizado II-69
II.4.1 Introducción II-69
II.4.2 Consumo de agua para satisfacer necesidades básicas de la población de agua potable y saneamiento II-69
II.4.3 Consumo de agua para fines productivos II-71
II.4.3.1 Consumo de agua en la agricultura II-71
II.4.3.2 Consumo hídrico en minería II-80
II.4.3.2.1 Extracciones de salmuera asociado a la minería no metálica II-80
II.4.3.2.2 Extracciones de agua fresca asociadas a la minería metálica y no metálica II-83
II.4.3.3 Consumo de agua asociada a la actividad turística II-87
II.4.4 Necesidades de agua en ecosistemas acuáticos II-89
II.4.4.1 Santuario de la Naturaleza Laguna Tebenquiche II-91
II.4.4.2 Reserva Nacional Los Flamencos II-91
II.4.4.2.1 Sistema Hidrológico de Soncor II-91
II.4.4.2.2 Aguas de Quelana II-94
II.4.4.3 Sistema Lagunar de Peine y Sistema de La Punta-La Brava II-97
II.4.4.3.1 Sistema Peine II-97
II.4.4.3.2 La Punta–La Brava y Vegas de Tilopozo II-100
II.4.4.4 Relación entre el componente biótico y los cuerpos de agua descritos II-105
II.5 Caracterización de proyecciones futuras II-106

II.5.1 Introducción II-106
II.5.2 Proyecciones de cambio climático II-106
II.5.2.1 Introducción II-106
II.5.2.2 Proyecciones climáticas futuras en la cuenca del Salar de Atacama II-107
II.5.2.3 Tendencias históricas en precipitación y temperatura II-111
II.5.3 Proyecciones de cambio poblacional II-114
II.5.4 Proyecciones de actividad económica II-116
II.5.4.1 Proyecciones futuras de la demanda de agua por actividad agrícola II-116
II.5.4.2 Proyecciones futuras de la demanda de agua y salmuera por actividad minera II-121
II.5.4.2.1 Demanda mundial de litio II-121
II.5.4.2.2 Perspectivas para la producción nacional de litio II-123
II.5.4.2.3 Producción nacional de litio y sus perspectivas II-124
II.5.4.3 Proyecciones futuras de la demanda de agua por actividad turística II-127
II.6 Diagnóstico a partir de la información analizada II-129
II.6.1 Introducción II-129
II.6.2 Balance hidrológico II-129
II.6.3 Demanda de agua por sectores y sistemas que requieren recursos hídricos II-130
II.6.3.1 Consumo de agua para satisfacer necesidades básicas de la población II-131
II.6.3.2 Consumo de agua para actividades productivas II-132
II.6.3.2.1 Consumo de agua para agricultura II-132
II.6.3.2.2 Consumo de agua para actividades mineras II-133
II.6.3.3 Utilización de salmueras para la extracción de litio II-136
II.6.3.4 Necesidades de ecosistemas acuáticos II-136
II.6.4 Gestión de recursos hídricos y de las salmueras II-137
II.7 Conclusiones II-144
Etapa III: Formulación y ejecución III-1
III.1 Resumen ejecutivo III-2
III.2 Introducción III-5
III.3 Antecedentes considerados y estrategia de modelación III-5
III.4 Modelo hidrológico superficial III-13
III.4.1 Introducción III-13
III.4.2 Metodología III-13
III.4.2.1 Algoritmo utilizado para la modelación hidrológica y delimitación de las unidades de modelación III-14
III.4.2.2 Caracterización uso y extracciones de agua superficiales III-30
III.4.2.2.1 Caracterización del consumo de agua potable III-30
III.4.2.2.2 Caracterización del consumo de agua para riego III-30
III.4.2.3 Caracterización del clima histórico y futuro III-38
III.4.2.3.1 Clima histórico III-39
III.4.2.3.2 Clima futuro III-59
III.4.2.4 Definición de parámetros y validación de resultados III-71
III.4.2.4.1 Parámetros asociados a caracterización de vegetación natural y

cultivos III-72
III.4.2.4.2 Parámetros asociados a caracterización de riego III-76
III.4.2.4.3 Parámetros asociados a los procesos de generación de escorrentía y flujo de agua en el suelo III-78
III.4.2.4.4 Parámetros asociados a la interacción hidrología superficial y subterránea III-79
III.4.2.4.5 Validación de resultados III-82
III.4.3 Resultados III-83
III.4.3.1 Modelos desarrollados III-83
III.4.3.2 Condiciones hidrológicas y de uso de los recursos hídricos a nivel superficial III-85
III.4.3.2.1 Balance hidrológico III-85
III.4.3.2.2 Representación de flujos de recarga desde el sistema de cuencas laterales III-88
III.4.3.2.3 Representación de la satisfacción de demandas de recursos hídricos superficiales III-90
III.4.4 Conclusiones, limitaciones y recomendaciones III-95
III.5 Modelo hidrogeológico y acople con el modelo hidrológico superficial III-97
III.5.1 Introducción III-97
III.5.1.1 Breve descripción del modelo numérico hidrogeológico de base III-97
III.5.1.2 Acople de modelos WEAP y MODFLOW para la modelación integrada de recursos hídricos III-99
III.5.2 Metodología III-101
III.5.2.1 Acople de los modelos hidrogeológico e hidrológico superficial III-102
III.5.2.1.1 Cambio de motor modelo numérico hidrogeológico III-102
III.5.2.1.2 Construcción del modelo hidrogeológico Salar-Monturaqui en WEAP ... III-102
III.5.2.1.2.1 Recargas del modelo lateral III-105
III.5.2.1.2.2 Extracciones e inyecciones III-107
III.5.2.1.2.3 Infiltración producto del balance superficial del modelo Salar-Monturaqui III-108
III.5.2.1.2.4 Evapotranspiración por parte de la vegetación III-110
III.5.2.1.3 Distribución de los caudales provenientes del modelo lateral en el modelo Salar-Monturaqui III-111
III.5.2.1.4 Ajuste de parámetros hidráulicos III-111
III.5.3 Resultados III-112
III.5.3.1 Balances III-113
III.5.3.2 Estadígrafos y Niveles III-123
III.5.4 Conclusiones, limitaciones y recomendaciones III-128
III.6 Modelación de flujo con densidad variable III-131
III.6.1 Introducción III-131
III.6.1.1 Descripción de la modelación de flujo con densidad variable del modelo base III-131
III.6.1.2 Paquete Seawater Intrusion (SWI2) de MODFLOW III-133
III.6.2 Metodología III-134
III.6.2.1 Modelación mediante perfiles bidimensionales con SEAWAT III-135

III.6.2.1.1 Recarga directa III-136
III.6.2.1.2 Niveles prescritos III-138
III.6.2.2 Modelación a escala de cuenca con MODFLOW-SWI2 ..... III-139
III.6.2.2.1 Régimen de simulación y discretización temporal III-140
III.6.2.2.2 Descripción de parámetros de SWI2 ..... III-140
III.6.2.2.3 Condiciones de contorno e iniciales III-141
III.6.2.2.4 Parámetros hidráulicos y de transporte III-143
III.6.2.2.5 Sensibilización de parámetros III-144
III.6.3 Resultados III-144
III.6.3.1 Resultados de la modelación con SEAWAT III-144
III.6.3.1.1 Comparación de niveles medidos y simulados III-145
III.6.3.1.2 Comparación de perfiles verticales de conductividad eléctrica medidos y simulados III-148
III.6.3.1.3 Distribución de concentraciones III-152
III.6.3.2 Resultados de la modelación con MODFLOW-SWI2 ..... III-155
III.6.3.2.1 Convergencia III-155
III.6.3.2.2 Resultados de la sensibilización de los parámetros de SWI2 ..... III-156
III.6.3.2.3 Espacialización de la salmuera a escala del Salar de Atacama III-158
III.6.3.2.4 Comparación con perfiles SEAWAT III-163
III.6.4 Conclusiones, limitaciones y recomendaciones III-164
III.6.4.1 Conclusiones de la modelación con SEAWAT III-164
III.6.4.2 Conclusiones de la modelación con MODFLOW-SWI2 ..... III-165
III.6.4.3 Estrategia para la modelación de flujo con densidad variable en el modelo integrado III-167
III.7 Modelo en base a agentes III-168
III.7.1 Introducción III-168
III.7.2 Metodología III-169
III.7.2.1 Marco metodológico para el desarrollo del ABM III-169
III.7.2.2 Talleres de Conceptualización III-175
III.7.2.3 Talleres de Validación III-185
III.7.2.4 Construcción de ABM prototipo III-188
III.7.2.4.1 Implementación sistema físico III-188
III.7.2.4.1.1 Evapotranspiración III-190
III.7.2.4.1.2 Recarga Superficial III-191
III.7.2.4.1.3 Drenes III-191
III.7.3 Resultados III-195
III.7.3.1 Arquitectura de Agentes III-195
III.7.3.2 Módulo Plan de Alerta Temprana (PAT) III-197
III.7.3.3 Módulo Fiscalización III-205
III.7.3.4 Escenarios Alternativos de Gobernanza III-205
III.7.3.4.1 Escenario Alternativo 1: Efectos Ambientales No Previstos III-206
III.7.3.4.2 Escenario Alternativo 2: RCA Adaptativa III-206
III.7.3.4.3 Escenario Alternativo 3: PAT Integrado de cuenca III-207
III.7.3.4.4 Ejemplo Aplicación Escenario Alternativo 1 sobre el ABM III-207
III.7.4 Conclusiones, limitaciones y recomendaciones III-213
III.7.4.1 Acople ABM a Modelo físico detallado III-213

III.7.4.2 Conceptualización de Actores y Decisiones III-214
III.7.4.2.1 Agente Unidad Fiscalizable III-214
III.7.4.2.2 Agente Actor Local III-215
III.7.4.2.3 Agente Institucionalidad Ambiental III-215
III.7.4.2.4 Agentes Dirección General de Aguas III-216
III.8 Uso del modelo integrado para la gestión de recursos hídricos y de salmuera y recomendaciones para futuros desarrollos III-217
III.8.1 Modelos de base para la gestión de los recursos hídricos y la salmuera en la cuenca del Salar de Atacama III-217
III.8.2 Recomendaciones de nueva información y estudios para mejorar los modelos de base para la gestión de los recursos hídricos y la salmuera en la cuenca del Salar de Atacama III-219
III.8.2.1 Recomendaciones de mejora de información III-219
III.8.2.1.1 Recomendaciones en mejoras en información respecto de componentes del ciclo hidrológico natural III-220
III.8.2.1.2 Recomendaciones en mejoras en información respecto de toma de decisiones y usos actuales y futuros de recursos hídricos y salmuera III-220
III.8.2.2 Recomendaciones en desarrollo de modelos III-221
III.9 Conclusiones III-223
Referencias **IV-1**

Índice de figuras

Figura I-1: División político-administrativa de la región de Antofagasta. I-16
Figura I-2: Hidrografía de la cuenca del Salar de Atacama, mencionando ríos y quebradas principales. I-19
Figura I-3: Límites de la cuenca y subcuencas definidos por la delimitación oficial del DARH. I-20
Figura I-4: Geomorfología de la cuenca del Salar de Atacama. I-23
Figura I-5: Sistema de geología estructural de la cuenca del Salar de Atacama elaborado a partir de hojas geológicas. I-26
Figura I-6: Perfil hidrogeológico conceptual del Salar de Atacama en dirección WE. Se muestran las unidades hidrogeológicas. I-28
Figura I-7: Perfil hidrogeológico conceptual del Salar de Atacama en dirección WE. Se muestran los acuíferos. I-29
Figura I-8: Perfil hidrogeológico conceptual del Salar de Atacama en dirección NS. Se muestran los acuíferos. I-29
Figura I-9: Distribución de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama, desde UH-1 a UH-6. ..... I-33
Figura I-10: Esquema conceptual del funcionamiento hidrológico de la zona donde se genera la interfaz salina del Salar de Atacama. I-35
Figura I-11: Posición de la interfaz salina del borde este del Salar de Atacama. I-36
Figura I-12: Piezometría en régimen estacionario entre 1986-1994 ..... I-38
Figura I-13 Piezometría en régimen transitorio de 2013 ..... I-39
Figura I-14: Distribución espacial en planta de los sistemas lagunares del Salar de Atacama. I-41
Figura I-15: Vista en planta del sistema lagunar de Soncor. I-42
Figura I-16: Esquema conceptual del funcionamiento hidrológico del sistema lagunar de Soncor. I-43
Figura I-17: Vista en planta del sistema de Aguas de Quelana. I-43
Figura I-18: Esquema conceptual del funcionamiento hidrológico del sistema lagunar Aguas de Quelana. I-44
Figura I-19: Vista en planta del sistema Peine. I-45
Figura I-20: Esquema conceptual del funcionamiento hidrológicos del sistema lagunar de Peine. Balance entre precipitación, evaporación y flujo subterráneo. I-45
Figura I-21: Vista en planta del sistema de lagunas La Punta y La Brava. I-46
Figura I-22: Esquema conceptual del funcionamiento hidrológico del sistema de lagunas sistema La Punta y La Brava. I-46
Figura I-23: Distribución de las formaciones vegetales zonales de la cuenca del Salar de Atacama. I-50
Figura I-24: Distribución geoespacial de vegas y bofedales de la cuenca del Salar de Atacama. I-52
Figura I-25. Distribución de la población perteneciente a un pueblo originario por etnia, Región de Antofagasta. I-58
Figura I-26: Distribución de comunidades indígenas en la cuenca del Salar de Atacama. .. I-60
Figura I-27: Producto Interno Bruto Regional anual Antofagasta I-63

Figura I-28: Producto Interno Bruto anual por actividad económica en la Región de Antofagasta. Volumen a precios del año anterior encadenado en miles de millones de pesos. I-64
Figura I-29: Terrenos cultivados en la cuenca del Salar de Atacama. I-69
Figura I-30: Llegadas de pasajeros (chilenos y extranjeros) a la comuna de San Pedro de Atacama. I-72
Figura I-31: Número de visitantes a Reserva Nacional Los Flamencos I-73
Figura I-32: Reservas de litio mundiales en toneladas al año 2018. ..... I-74
Figura I-33: Evolución de la producción mundial de litio. I-75
Figura I-34: Evolución de la producción nacional de litio. I-75
Figura I-35: Ubicación de Comité APR en la cuenca del Salar de Atacama. I-84
Figura I-36: Sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en la cuenca del Salar de Atacama según DGA. I-95
Figura I-37: Zonas de protección en la cuenca del Salar de Atacama que restringen el aprovechamiento de recursos hídricos. I-100
Figura I-38: *Distribución espacial de los glaciares reconocidos por la DGA en la cuenca del Salar de Atacama.* I-102
Figura I-39: Zonas con declaraciones de agotamiento en las subcuencas del Río San Pedro y Río Vilama de la cuenca del Salar de Atacama I-105
Figura I-40 Áreas de restricción y zonas de prohibición en la cuenca del Salar de Atacama I-108
Figura I-41 *Sitios Ramsar de la Cuenca del Salar de Atacama.* I-115
Figura I-42 *Distribución espacial de Reservas Nacionales de Los Flamencos en la cuenca del Salar de Atacama.* I-117
Figura I-43 Ubicación geoespacial del Área de Desarrollo Indígena Atacama La Grande. . I-121
Figura I-44: Zona de Interés Turístico declarada en la cuenca del Salar de Atacama. I-124
Figura I-45: Localización espacial de los distintos tipos de estaciones DGA distribuidas en la cuenca. I-130
Figura I-46 Información de estaciones meteorológicas y fluviométricas ubicadas en la cuenca. Aquellas con el prefijo "T" corresponden a temperatura, aquellas con prefijo "Pp" a precipitación, y aquellas sin prefijo denotan a las que miden caudal. Fuente: DGA BNASIGIRH (2019) I-131
Figura I-47: Puntos de la red de monitoreo de nivel piezométrico de propiedad minera. I-137
Figura I-48: Ubicación de los pozos considerados en la evolución temporal del nivel de agua. I-139
Figura I-49 Puntos de control de nivel piezométrico junto con medición de nivel de lagunas en el sistema de lagunas La Punta y La brava. I-140
Figura I-50 Puntos de control de nivel piezométrico junto con medición de nivel de lagunas Chaxas y Barros Negros del sistema Soncor, Aguas de Quelana, La Punta y La Brava. . I-141
Figura I-51: Puntos de la red de monitoreo de evaporación y precipitación de propiedad minera I-142
Figura I-52: Puntos de monitoreo de la calidad de agua superficial en la cuenca del Salar de Atacama. I-144

Figura I-53: Completitud en los datos de monitoreo de variables hidroquímicas referentes a calidad de agua. I-146
Figura I-54: Completitud de los datos de monitoreo de isótopos y cloruros. I-149
Figura I-55: Esquema de modelo numérico hidrológico en MATLAB 2016. ..... I-165
Figura I-56 Cadenas tróficas para el ambiente de Puna. I-174
Figura I-57 Retroalimentaciones positivas y negativas que pueden causar dos variables de estado dominantes entre sí, en el marco del modelo conceptual ecológico I-179
Figura I-58 Diagrama de Stommel que resume las escalas de tiempo y espacio de los procesos del Salar de Atacama y su relación con algunos de los procesos presentes en el salar. I-185
Figura I-59 Diagrama de interacciones tróficas en cuerpos de agua sin peces del Norte de Chile. I-186
Figura I-60 Salida gráfica del Modelo Ecológico Conceptual de la Cuenca del Salar de Atacama (MECSA). I-187
Figura I-61: Ubicación del área de estudio para realizar la modelación en el sector de Tilopozo. I-191
Figura I-62: Esquema del flujo del proceso para obtener los resultados espaciales I-192
Figura I-63: Esquema del flujo del proceso para obtener los resultados del modelo biofísico y representarlos espacialmente. I-193
Figura II-1 : Esquema conceptual del Balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama. II-7
Figura II-2 : Esquema conceptual de la conexión entre los balances a nivel superficial y subterráneo II-8
Figura II-3: Relación entre conductividad eléctrica y solidos disueltos en muestras de agua a nivel superficial y subterráneo en distintas zonas de la cuenca del Salar de Atacama. II-9
Figura II-4: Subcuencas de la cuenca del Salar de Atacama. II-10
Figura II-5: Disponibilidad de la información pluviométrica en estaciones DGA y particulares. II-13
Figura II-6: Pluviometría media anual registrada en estaciones al interior de la cuenca (ordenadas de izquierda a derecha en la gráfica de norte a sur y de este a oeste) en un periodo mínimo de 32 años entre 1974 y 2018. ..... II-14
Figura II-7: Función de gradiente espacial y altitudinal de precipitaciones en base a observaciones en estaciones pluviométricas II-17
Figura II-8: Distribución de las precipitaciones en la cuenca del Salar de Atacama de acuerdo al producto CR2Met entre 1986 y 2018. ..... II-19
Figura II-9: Precipitación media anual del producto CR2Met versión 2 respecto del Índice de Ubicación y Altura (IUA). II-20
Figura II-10: Estaciones fluviométricas y puntos de aforos esporádicos II-26
Figura II-11: Disponibilidad de la información fluviométrica II-27
Figura II-12: Curva de variación estacional San Pedro en Cuchabrachi para un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia. II-28
Figura II-13: Curva de variación estacional Canal Vilama en Vilama para un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia. II-28
Figura II-14: Curva de variación estacional Canal Tulán en Tilomonte para un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia. II-29

Figura II-15: Curva de variación estacional Canal Tilomonte Antes Represa para un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia. II-29
Figura II-16: Curva de variación estacional Canal Cuno en Socaire para un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia. II-30
Figura II-17: Curva de variación estacional Canal Aguas Blancas para un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia. II-30
Figura II-18: Caudales medios anuales en San Pedro en Cuchabrachi generados sintéticamente(verde) versus observados (rojo) II-33
Figura II-19: Caudales medios mensuales generados sintéticamente (verde) versus observados (rojo) II-33
Figura II-20: Hidrografía de la cuenca del Salar de Atacama, indicando sus principales afluentes y poblados. II-35
Figura II-21: Zonas de infiltración y afloramiento del Río San Pedro, obtenidas a partir de campañas de aforo de septiembre de 1997. ..... II-36
Figura II-22: Zonas de infiltración y afloramiento obtenidas a partir de campañas de aforo de septiembre de 2013. ..... II-37
Figura II-23: Afloramientos en el Delta del Río San Pedro. II-38
Figura II-24: Monitoreo de conductividad eléctrica en la cuenca del Salar de Atacama II-39
Figura II-25: Imágenes satelitales entre 2002 y 2019 de la zona de infiltración del Río Tulán. II-40
Figura II-26: Disponibilidad de los registros de evaporación. II-42
Figura II-27: Tasas de evaporación media mensual en estaciones DGA. II-43
Figura II-28: Gradiente de evaporación media anual. II-44
Figura II-29: Gradientes altitudinales de evaporación mensua de enero a abril. II-45
Figura II-30: Gradientes altitudinales de evaporación mensual de mayo a agosto. II-45
Figura II-31: Gradientes altitudinales de evaporación mensual de agosto a diciembre... II-46
Figura II-32: Gradiente de evaporación media anual. II-46
Figura II-33: Cobertura vegetal detectada en las subcuencas aportantes de la vertiente oriental del Salar de Atacama. II-51
Figura II-34: Coeficientes de cultivo (Kc) ajustados a partir de modelo MABIA para condiciones de aridez. II-53
Figura II-35: Ubicación de medición de evaporación desde la napa en el Salar de Atacama II-59
Figura II-36: Comparación de curvas de evaporación de suelo hasta 2017. ..... II-62
Figura II-37: Comparación de curvas de evaporación de suelo hasta 2017. ..... II-63
Figura II-38: Evolución temporal de la cota piezométrica en el acuífero aluvial Salar de Atacama (inmediaciones del Pozo Mullay-1). Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) II-67
Figura II-39: Evolución temporal de la cota piezométrica en el acuífero aluvial Salar de Atacama (inmediaciones del Pozo Allana). Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018). II-68
Figura II-40: Evolución temporal de la cota piezométrica en el acuífero aluvial Salar de Atacama (inmediaciones del Pozo Camar-2). Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018). II-68
Figura II-41: Ubicación de Comités de APR en la cuenca del Salar de Atacama. II-70
Figura II-42: Terrenos cultivados en la cuenca del Salar de Atacama. II-73

Figura II-43 Áreas agrícolas y sistema de canales cercanos en torno a San Pedro de Atacama. II-74
Figura II-44: Evolución de la producción nacional de litio. II-81
Figura II-45: Extracción neta de salmuera (extracción menos reinyección) por SQM S.A. II-82
Figura II-46: Extracción neta de salmuera y caudal aprobado por RCA para Albermale. II-83
Figura II-47: Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, extracciones de agua fresca, y caudales aprobados ambientalmente (promedio anual) para MEL. II-84
Figura II-48: Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, extracciones de agua fresca, y caudales aprobados ambientalmente (promedio anual) para CMZ. II-85
Figura II-49: Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, extracciones de agua fresca, y caudales aprobados ambientalmente (promedio anual) para SQM Salar S.A. II-86
Figura II-50: Derechos de aprovechamiento de aguas, extracciones de agua fresca, y caudales aprobados ambientalmente (promedio anual) para Albemarle. II-87
Figura II-51: Número de visitantes a Reserva Nacional Los Flamencos. II-88
Figura II-52: Consumo histórico de agua asociado al turismo. II-89
Figura II-53: Sistemas lagunares del Salar de Atacama. II-90
Figura II-54: Vista en planta del sistema Soncor. II-92
Figura II-55: Esquema conceptual del funcionamiento sistema Soncor. Balance entre precipitación, evaporación, extracciones y flujo subterráneo. II-92
Figura II-56: Variaciones estacionales de los niveles de las lagunas del sistema Solcor y precipitación mensual en la estación CHAXA. II-93
Figura II-57: Vista en planta del sistema de Aguas de Quelana. II-95
Figura II-58: Esquema conceptual del funcionamiento sistema Aguas de Quelana. Balance entre precipitación, evaporación y flujo subterráneo. II-95
Figura II-59: Variaciones estacionales de los niveles de las lagunas del sistema Aguas de Quelana y precipitación mensual en la estación CHAXA. II-96
Figura II-60: Variación de la superficie de las lagunas del sistema Aguas de Quelana y precipitación mensual en la estación CAMAR. II-97
Figura II-61: Vista en planta del sistema Peine. II-98
Figura II-62: Esquema conceptual del funcionamiento sistema Peine. Balance entre precipitación, evaporación y flujo subterráneo. II-98
Figura II-63: Variaciones estacionales de los niveles superficiales de las lagunas del sistema Peine y precipitación mensual en la estación PEINE. II-99
Figura II-64: Variaciones estacionales de la superficie del Sistema Peine y precipitación mensual en la estación Peine. II-100
Figura II-65: Vista en planta del sistema de lagunas La Punta y La Brava. II-101
Figura II-66: Esquema conceptual del funcionamiento sistema La Punta y La Brava. Balance entre precipitación, evaporación y flujo subterráneo. II-101
Figura II-67: Puntos de control de nivel piezométrico en el sistema de lagunas La Punta y La Brava. II-102
Figura II-68: Variaciones estacionales de los niveles de las lagunas del sistema La Punta y La Brava y precipitación mensual en la estación Peine. II-103
Figura II-69: Variaciones estacionales de la superficie del Sistema La Punta y La Brava y precipitación mensual en la estación Peine. II-104
Figura II-70: Variación de temperaturas entre 1985-2015 con 2030-2060. ..... II-108

Figura II-71: Variación porcentual de precipitaciones medidas del periodo 1985-2015 y del periodo 2030-2060. ..... II-109
Figura II-72: Cambios (porcentaje de cambio) proyectados de precipitación para 6 GCMs en la cuenca del Salar de Atacama y su entorno hacia mediados de siglo (2035-2065) respecto del periodo histórico II-110
Figura II-73: Cambios en temperaturas medias anuales (expresados como diferencia simple entre futuro menos histórico), para la cuenca del Salar de Atacama en seis modelos de cambio climático en el escenario más severo (rcp 8.5). II-111
Figura II-74: Proyección período 2025-2035 del consumo humano por agua potable en la comuna de San Pedro de Atacama. II-115
Figura II-75: Proyección a largo plazo (2035-2065) del consumo humano por agua potable en la comuna de San Pedro de Atacama. II-116
Figura II-76: Composición de la demanda global de litio para años 2010 y 2019 ..... II-121
Figura II-77 Demanda conservadora de litio por aplicación II-122
Figura II-78: Proyección de la demanda de litio según uso. II-123
Figura II-80: Evolución de la producción mundial de litio II-124
Figura II-81: Proyección de la producción de litio en Chile. II-125
Figura II-82: Proyección de la actividad turística en la cuenca por escenario. II-128
Figura II-83: Proyección de consumo de agua potable por la actividad turística en la cuenca del Salar de Atacama. II-128
Figura II-84: Extracción de agua en la industria minera nacional del cobre según fuente de extracción. II-134
Figura II-85: Extracción de agua en la industria minera del cobre según fuente de extracción, región de Antofagasta. II-134
Figura II-86: Recirculación de agua en la operación minera completa (a nivel nacional).. II-135
Figura II-87: Intersección de distintos instrumentos que restringen el otorgamiento de nuevos derechos o el ejercicio de derechos existentes. II-141
Figura II-88: Intersección entre el polígono de la ADI Atacama La Grande y la ZOIT de la cuenca del Salar de Atacama. II-142
Figura III-1: Dominio espacial de los modelos desarrollados: Modelo Salar-Monturaqui, Modelo Lateral y Modelo de Densidad Variable. III-8
Figura III-2: Esquema de las conexiones entre las zonas superficiales y subterráneas del modelo Salar-Monturaqui (Modelo SM) y el modelo lateral. 9
Figura III-3: Esquema de las conexiones entre los distintos modelos que componen el modelo de base física. III-10
Figura III-4: Conceptualización de flujos relevantes y balances hidrológicos de los modelos desarrollados para la cuenca del Salar de Atacama. 11
Figura III-5: Representación de las unidades espaciales de modelación en WEAP. III-15
Figura III-6: Presencia relativa (porcentaje de tiempo) de cobertura nival en base a imágenes satelitales en relación a definición de catchments por bandas de altura en la zona alta de la subcuenca del Rio San Pedro en Cuchabrachi. III-17
Figura III-7: Esquema de conceptual de caracterización de catchments en subcuencas laterales y su relación con el sistema de aguas subterráneas de la zona del salar. ..III-19
Figura III-8: Representación esquemática del acceso de agua subterránea de vegetación en la zona marginal del Salar de Atacama. III-20

Figura III-9: Delimitación de subcuencas en la cuenca del Salar de Atacama de acuerdo a DGA-DARH. III-21
Figura III-10: Delimitación de subcuencas en la cuenca del Salar de Atacama de acuerdo a AMPHOS21. ....III-22
Figura III-11: Subcuencas definidas para la modelación hidrológica en la cuenca del Salar de Atacama. III-24
Figura III-12: Esquema de catchments del modelo lateral en WEAP (izquierda) y catchments en la cuenca del Salar de Atacama (derecha). III-26
Figura III-13: Esquema de catchments del modelo del Salar-Monturaqui en WEAP (izquierda) y catchments en la cuenca del Salar de Atacama (derecha). III-27
Figura III-14: Distribución espacial de las diferentes coberturas dentro de la cuenca del Salar de Atacama. III-29
Figura III-15: Caudal demandado por una unidad de modelación para dos esquemas de riego. III-33
Figura III-16: Diagrama unifilar con extracciones de canales y derechos de aprovechamiento asociado para la cuenca del Río San Pedro. III-36
Figura III-17: Caudal disponible en río, extracción canal y caudal disponible para suplir demanda de riego para el periodo 1980-1990 en el río y canal San Pedro. III-37
Figura III-18: Caudal disponible en canal, demanda bruta y neta de agua para riego y porcentaje de cobertura de la demanda de riego para el periodo 1980-1990 en sistema de riego San Pedro. III-38
Figura III-19: Re-espacialización del producto de isolíneas de precipitación mediante el IUA para los límites de la cuenca del Salar de Atacama en base a la delimitación DARH.III-42
Figura III-20: Curva estacional de precipitaciones en series completas (con vacíos rellenos) agregadas a escala mensual en cuatro de las estaciones índice de la cuenca del Salar de Atacama. III-46
Figura III-21: Asignación de estaciones de precipitación a los distintos catchments que componen la cuenca del Salar de Atacama. III-48
Figura III-22: Asignación de estaciones de temperatura a los distintos catchments que componen la cuenca del Salar de Atacama. Se destacan en los polígonos las 4 utilizadas para la corrección de sesgo en las temperaturas extremas del producto CR2Met. III-50
Figura III-23: Ejemplo de intersección del porcentaje de área que las celdas del CR2Met quedan inscritas sobre el área del catchment AL_13_1_2676. ....III-53
Figura III-24: Cambio en las curvas estaciones de temperatura mínima (imagen superior) y máxima (inferior) producto de la corrección de sesgo mensual. III-54
Figura III-25: Comparación entre las curvas estaciones observadas y modeladas por el producto CR2Met para la variable Humedad relativa (%), en tres estaciones ubicadas al interior de la cuenca del Salar de Atacama, y operadas por el INIA: a) San Pedro de Atacama, b) Socaire y c) Toconao. III-56
Figura III-26: Comparación entre las curvas estaciones observadas y modeladas por el producto CR2Met para la variable Velocidad del viento (m/s), en 3 estaciones ubicadas al interior de la cuenca del Salar de Atacama, y operadas por el INIA: a) San Pedro de Atacama, b) Socaire y c) Toconao. III-58
Figura III-27: Deltas de precipitación y temperatura en los 18 modelos CMIP5 disponibles

contrastados entre el periodo histórico de control (1980-2010) y el futuro (2035-2065).III-63
Figura III-28: Ajuste de modelos GCM para periodo control con las observaciones a nivel de cuenca para dos indicadores.....III-64
Figura III-29: Series de precipitación anual a nivel de estación e interpoladas a la coordenada de esta en 2 modelos de cambio climático. III-67
Figura III-30: Series de temperatura mínima a nivel de estación e interpoladas a la coordenada de esta en 2 modelos de cambio climático. III-69
Figura III-31: Series de temperatura máxima a nivel de estación e interpoladas a la coordenada de esta en 2 modelos de cambio climático. III-70
Figura III-32: Caudal promedio mensual modelado y observado en la estación DGA para la estación fluviométrica "Río San Pedro de Cuchabrachi". III-82
Figura III-33: Caudal promedio mensual modelado y observado en la estación DGA para la estación fluviométrica "Quebrada de Camar en vertiente 1". III-82
Figura III-34: Caudal promedio mensual modelado y observado en la estación DGA para la estación fluviométrica "Quebrada de Jérez". III-83
Figura III-35: Esquema del modelo hidrológico superficial WEAP para las cuencas laterales. III-84
Figura III-36: Esquema del modelo superficial Salar-Monturaqui III-85
Figura III-37: Componentes del Balance del Sistema Superficial del salar (valores en l/s) .III-87
Figura III-38: Componentes del Balance del Sistema Lateral Superficial (valores en l/s). ..III-87
Figura III-39: Serie de promedios anuales de la escorrentía superficial y percolación proveniente de todas las subcuencas laterales.....III-89
Figura III-40: Serie de promedios mensuales de la escorrentía superficial y percolación proveniente de todas las subcuencas laterales.....III-89
Figura III-41: Serie mensual de agua en un canal versus el derecho de aprovechamiento (m3/s).....III-91
Figura III-42: Serie anual de demanda de riego versus riego efectivo anual (m3/año).....III-92
Figura III-43: Serie mensual de evapotranspiración potencial (PET) versus evapotranspiración actual (ETa) ejemplo cultivo de forrajera. III-92
Figura III-44: Serie promedio diaria de evapotranspiración potencial (PET) versus evapotranspiración actual (ETa) ejemplo bosque en el Tambillo. III-93
Figura III-45: Serie diaria de evapotranspiración potencial y actual. Ejemplo bosque en el Tambillo periodo 2005-2018. .....III-94
Figura III-46: Serie promedio diaria de evapotranspiración potencial (PET) versus evapotranspiración actual (ETa) ejemplo matorral en el Sistema Lagunar Aguas de Quelana. III-94
Figura III-47: Delimitación de la zona activa del modelo numérico hidrogeológico. III-98
Figura III-48: Diferentes Enfoques de modelación: Los hidrólogos y los hidrogeólogos. ...III-100
Figura III-49: Pasos Metodológicos para el desarrollo del acople entre WEAP y MODFLOW utilizado en este estudio.....III-102
Figura III-50: Representación del acuífero modelado en MODFLOW en la vista esquemática de WEAP.....III-103
Figura III-51: Esquema de las conexiones entre las zonas superficiales y subterráneas del modelo Salar-Monturaqui (Modelo SM) y el modelo lateral.....III-104
Figura III-52: Zonificación de subcuencas definida en el modelo de base. III-105

Figura III-53: Esquema para la inyección de caudales hacia el acuífero en WEAP. III-106
Figura III-54: Vista esquemática del modelo WEAP con la estructura de nodos que representan las entradas provenientes del modelo lateral. III-107
Figura III-55: Vista esquemática de la estructura de nodos de WEAP para representar las extracciones e inyecciones en el acuífero del modelo Salar-Monturaqui. III-108
Figura III-56: Vista esquemática de la estructura de nodos de WEAP en la superficie del modelo MODFLOW y las zonas que abarcan cada uno de estos nodos de modelación hidrológica. III-109
Figura III-57: Distribución de la vegetación sobre las celdas de MODFLOW considerada para extraer agua desde la napa en función de la profundidad de raíces y de la napa. III-110
Figura III-58: Zonas donde se modificó la conductividad hidráulica y el valor con el cual se ponderó el valor inicial definido por CORFO-Amphos21 (2021).....III-112
Figura III-59: Vista esquemática de los nodos WEAP y celdas activas MODFLOW del modelo Salar-Monturaqui.....III-113
Figura III-60: Componentes del balance del sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui, en el período 1986 a 2018, desarrollado en este proyecto. III-114
Figura III-61: Resumen del balance hídrico del sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui en los períodos a) 1986 – 2018, b) 1986 – 1999 y c) 2000 – 2018 obtenido a partir del modelo Salar-Monturaqui. III-117
Figura III-62: Resumen del balance hídrico del Salar de Atacama en el período 1986 a 2018 en base a los resultados del modelo integrado. III-118
Figura III-63: SHACs definidos por DGA y extensión de las celdas activas del modelo Salar-Monturaqui (izquierda) y zonas consideradas para el análisis de balances del sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui (derecha). III-120
Figura III-64: Residuales de validación del modelo Salar-Monturaqui y diferencia entre niveles medidos y simulados.....III-124
Figura III-65: Comparación entre niveles medidos y calculados por el modelo Salar-Monturaqui desarrollado en este proyecto. III-126
Figura III-66: Comparación entre niveles medidos y calculados por el Salar-Monturaqui integrado desarrollado en este proyecto. III-127
Figura III-67: Mapas piezométricos, para la capa 3, calculados para los tiempos 01-01-1990, 01-01-2010 y 31-12-2019 con el modelo Salar-Monturaqui desarrollado en este proyecto.....III-128
Figura III-68: Ubicación y geometría de los perfiles definidos para los modelos de flujo con densidad variable.....III-132
Figura III-69: Conceptualización de la discretización espacial, de las entradas y salidas, condiciones de contorno y condiciones iniciales para los 3 perfiles para la modelación de flujo con densidad variable. III-133
Figura III-70: Series temporales de recarga directa para los perfiles SEAWAT. 137
Figura III-71: Actualización de las series temporales de nivel prescrito para el perfil Quelana. III-138
Figura III-72: Actualización de las series temporales de nivel prescrito para el perfil Peine…III-139
Figura III-73: Actualización de las series temporales de nivel prescrito para el perfil La Punta La Brava. III-139

Figura III-74: Distribución de la altura sobre el nivel del mar de las isosuperficies de conductividad eléctrica de 100 y 200 mS cm^{-1}. III-142
Figura III-75: Valor del parámetro ISOURCE en la capa 1 (En las otras capas es igual a 0)…III-143
Figura III-76: Puntos de observación de niveles definidos para los perfiles SEAWAT. III-145
Figura III-77: Comparación de niveles observados y modelados a partir del perfil Quelana. III-146
Figura III-78: Comparación de niveles observados y modelados a partir del perfil Peine. III-147
Figura III-79: Comparación de niveles observados y modelados a partir del perfil La Punta La Brava. III-147
Figura III-80: Comparación de distribución vertical de conductividad eléctrica medida (Rockwood Lithium) y simulada para el perfil Quelana. III-149
Figura III-81: Comparación de distribución vertical de conductividad eléctrica medida (Rockwood Lithium) y simulada para el perfil Peine. III-150
Figura III-82: Comparación de distribución vertical de conductividad eléctrica medida (Rockwood Lithium) y simulada para el perfil La Punta La Brava. III-151
Figura III-83: Distribución de la concentración de solutos a partir de la actualización del perfil Quelana con resultados del modelo integrado. III-152
Figura III-84: Distribución de la concentración de solutos a partir de la actualización del perfil Peine con resultados del modelo integrado. III-153
Figura III-85: Distribución de la concentración de solutos a partir de la actualización del perfil La Punta La Brava con resultados del modelo integrado. III-154
Figura III-86: Evolución de las discrepancias de flujo y volumétricas, para las zonas de agua fresca (zona 1), salmuera (zona 2) y balance hídrico total del modelo MODFLOW-2005. .....III-155
Figura III-87: Resultados de la sensibilización de los parámetros de SWI2 en términos de diferencias absolutas de la ubicación de la interfaz salina. III-157
Figura III-88: Ancho de la zona de mezcla al considerar dos superficies de distinta densidad en el modelo MODFLOW con el paquete SWI2. .....III-158
Figura III-89: Profundidad a la cual se puede encontrar la interfaz salina, desde la superficie, y espesor de la zona de salmuera. III-159
Figura III-90: Ubicación de los cortes mostrados en la Figura III-91 y Figura III-92. .....III-160
Figura III-91: Ubicación de la interfaz salina y niveles en cortes transversales en la dirección Norte-Sur, calculadas con MODFLOW-2005. .....III-161
Figura III-92: Ubicación de la interfaz salina y niveles en cortes transversales en la dirección Oeste-Este, calculadas con MODFLOW-2005. .....III-162
Figura III-93: Comparación de los resultados obtenidos con SWI2 y con SEAWAT al considerar una única superficie o una interfaz abrupta entre la salmuera y el agua fresca. III-163
Figura III-94: Línea temporal detallando la secuencia de actividades necesarias para implementar el prototipo del Modelo en Base a Agentes. III-174
Figura III-95: Escalas de análisis aplicadas a los modelos mentales generados durante los Talleres de Conceptualización. III-179
Figura III-96: Ejemplo conceptual para la creación de una red egocéntrica sobre un nodo tipo ODV o Actor, en base a un grafo original cualquiera. III-181

Figura III-97: Conceptualización de la unión de mapas cognitivos y del Análisis Exploratorio de Redes. III-183
Figura III-98: Árbol de decisiones para el Agente Institucionalidad Ambiental. III-187
Figura III-99: Sistema Físico simulado en la Interfaz de FlowLogo. III-189
Figura III-100: Variación estacional del factor ponderador de la evapotranspiración, considerando una simulación de aproximadamente 5 años en FlowLogo. III-190
Figura III-101: Flujo por Evapotranspiración de una celda activa cualquiera del modelo, considerando una simulación de aproximadamente 5 años en FlowLogo III-191
Figura III-102: Caudal promedio de inyección por aportes de escorrentía superficial sobre los bordes de la cuenca, considerando una simulación de aproximadamente 6 años en FlowLogo. III-191
Figura III-103: Nivel piezométrico en una celda definida como dren, y el umbral de activación asociado, considerando una simulación de aproximadamente 5 años en FlowLogo. III-192
Figura III-104: Caudal de extracción desde el dren producto del afloramiento, considerando una simulación de aproximadamente 5 años en FlowLogo. III-192
Figura III-105: Comportamiento oscilatorio resultante de la implementación del escenario Situación Base en FlowLogo. III-194
Figura III-106: Arquitectura de agentes implementada sobre el sistema físico en NetLogo. III-197
Figura III-107: Ejemplo de definición del estado de operación de una Estación de Monitoreo (i.e., Operación Normal, Fase 1, o Fase 2), en base a los puntos de observación registrados y su diferencia a los umbrales establecidos. III-199
Figura III-108: Ejemplo de definición del estado de operación de una Unidad Fiscalizable (i.e., Operación Normal, Fase 1, o Fase 2), en base a la información registrada en 2 Estaciones de Monitoreo y sus diferencias a sus umbrales establecidos. III-200
Figura III-109: Esquematización de un ejemplo sintético de simulación del Módulo PAT, incluyendo la activación y medidas de la Fase 1. .....III-202
Figura III-110: Esquematización de un ejemplo sintético de simulación del Módulo PAT, incluyendo la activación y medidas de la Fase 2. .....III-203
Figura III-111: Esquematización de un ejemplo sintético de simulación del Módulo PAT, incluyendo el Nivel de Cumplimiento (Operador 1 y Operador 2 con máximo y mínimo cumplimiento respectivamente). III-204
Figura III-112: Extensión de la arquitectura de agentes para el escenario alternativo de gobernanza Efectos Ambientales No Previstos. III-208
Figura III-113: Ejemplo implementación de la vulnerabilidad en sectores no protegidos. III-209
Figura III-114: Esquematización de un ejemplo sintético de simulación de múltiples Objetos de Protección siendo monitoreados por diversos Actores Locales. III-211
Figura III-115: Valores de vulnerabilidad calculados sobre cada agente Actor Local. ...III-212

Índice de tablas

Tabla I-1 Parámetros morfológicos de la cuenca del Salar de Atacama. I-21
Tabla I-2: Conductividades hidráulicas estimadas para las unidades hidrogeológicas del Salar de Atacama I-32
Tabla I-3: Conductividades hidráulicas estimadas para el sector de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo I-34
Tabla I-4: Cantidad de especies de fauna en torno a San Pedro de Atacama. I-53
Tabla I-5: Población Total censos 1982, 1992, 2002, 2017 en zonas administrativas de interés I-56
Tabla I-6: Población, superficie y densidad a nivel regional, provincial y comunal. I-56
Tabla I-7: Distribución de habitantes por edad en la comuna de San Pedro de Atacama. . I-56
Tabla I-8: Relación población urbana y rural en zonas administrativas de interés. I-57
Tabla I-9. Número de comunidades indígenas en la Región de Antofagasta. I-58
Tabla I-10. Catastro y demografía Comunidades Indígenas presentes en la cuenca del Salar de Atacama. I-59
Tabla I-11: Comunidades indígenas Atacameñas pertenecientes al Consejo de Pueblos Atacameños. I-61
Tabla I-12: Superficie regada por grupo de cultivo y comuna I-66
Tabla I-13: Superficie regada por rubro y comuna I-67
Tabla I-14: Superficie de riego en la cuenca del Salar de Atacama. I-68
Tabla I-15: Existencia de ganado en explotaciones agropecuarias en la comuna de San Pedro de Atacama I-70
Tabla I-16: Atractivos Turísticos de jerarquía nacional e internacional en la comuna de San Pedro de Atacama. I-71
Tabla I-17: Instituciones públicas con rol relevante en la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Salar de Atacama. I-76
Tabla I-18: Actores Privados con un rol relevante en la gestión de los recursos hídricos. ... I-77
Tabla I-19: Usuarias dueños de derechos de agua superficiales en la cuenca del Salar de Atacama. I-78
Tabla I-20: Usuarios dueños de derechos de aguas subterráneas en la cuenca del Salar de Atacama. I-80
Tabla I-21: Actores de la comunidad con competencia relevante en la gestión de los recursos hídricos. I-82
Tabla I-22: Objetivos Plan Estratégico Gestión de Recursos Hídricos Antofagasta. I-91
Tabla I-23. Derechos de agua concedidos en la cuenca del Salar de Atacama según uso de agua en términos de caudal y porcentaje respecto del total. I-103
Tabla I-24: Declaraciones de zonas de prohibición y áreas de restricción en la cuenca del Salar de Atacama y cuencas colindantes. I-107
Tabla I-25: Planes de Alerta Temprana asociados al otorgamiento de derechos de agua existentes en la cuenca del Salar de Atacama. I-110
Tabla I-26 Planes de Alerta Temprana asociados a los EIA aprobados en la cuenca del Salar de Atacama I-111
Tabla I-27: Comunidades Indígenas en ADI Atacama La Grande. I-120
Tabla I-28: Bonificación pagada por la Ley 18.450 de Fomento al Riego y Drenaje en la

Región de Antofagasta para los años 2010 y 2019. ..... I-128
Tabla I-29: Estaciones hidrometeorológicas y de calidad de aguas de la DGA en la cuenca del Salar de Atacama. I-129
Tabla I-30 Estadígrafos de variables de monitoreo hidroquímicas superficiales críticas ... I-147
Tabla I-31 Estadígrafos de variables de monitoreo hidroquímicas subterráneas críticas.. I-147
Tabla I-32: Plan de monitoreo de vegetación de SQM Salar S.A I-151
Tabla I-33 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente de Hidrología. I-180
Tabla I-34 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente de Flora y vegetación. I-181
Tabla I-35 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente de Fauna terrestre. I-181
Tabla I-36 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente de Ecosistemas acuáticos. I-182
Tabla I-37 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente Antrópica. I-183
Tabla I-38 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes del componente Abiótico. I-183
Tabla I-39 Lista de programas más utilizados en el ámbito de la estadística y modelación estadístico-matemática. I-188
Tabla II-1: Estaciones pluviométricas existentes en la cuenca del Salar de Atacama y sus alrededores en la Región de Antofagasta. Coordenadas en WGS 1984 ..... II-11
Tabla II-2: Estadígrafos de la precipitación media anual. II-15
Tabla II-3: Resultado del escalamiento para el modelo CR2Met II-21
Tabla II-4: Coeficientes de escorrentía utilizados por zona II-23
Tabla II-5: Escorrentía media anual II-23
Tabla II-6 Caudales medios mensuales en estaciones fluviométricas (en l/s) II-31
Tabla II-7: Caracterización de aforos de caudales puntuales medidos en la cuenca. II-31
Tabla II-8: Estaciones de evaporación de tanque consideradas en el análisis. II-41
Tabla II-9: Coeficientes de bandeja mensuales II-47
Tabla II-10: Cobertura vegetacional por tipo II-49
Tabla II-11: Categorías de cobertura de suelo presentes en la cuenca del Salar de Atacama II-50
Tabla II-12: Coeficientes de cultivo asociados a en vegas y bofedales II-50
Tabla II-13: Salidas por vía evapotranspiración de agua de los ecosistemas en el núcleo y en la zona este del Salar de Atacama II-52
Tabla II-14: Coeficientes de infiltración para cuencas altiplánicas II-55
Tabla II-15: Porcentaje de cobertura de área según factor de infiltración II-55
Tabla II-16: Infiltración por escorrentía distribuida por subcuencas II-56
Tabla II-17: Balance hidrico superficial actual* II-57
Tabla II-18: Estaciones de medición de evaporación de la napa en el Salar de Atacama. II-60
Tabla II-19: Evaporación promedio en el Salar de Atacama II-65
Tabla II-20: Derechos de agua subterránea otorgados para la cuenca del Salar de Atacama II-65
Tabla II-21: Balance hídrico subterráneo de la cuenca para un escenario de régimen

natural II-66
Tabla II-22: Balance hídrico subterráneo de la cuenca en régimen de explotación (periodo 2000-2018). II-67
Tabla II-23: Volúmenes mensuales suministrados por APRs en la Cuenca del Salar de Atacama II-71
Tabla II-24: Categorización de cultivos agrícolas presentes en la comuna de San Pedro de Atacama y necesidades hídricas (m³/mes) II-75
Tabla II-25: Uso de suelo en área circundante a San Pedro de Atacama. II-77
Tabla II-26: Demandas netas, tasa de riego y demanda bruta anual según tipo de cultivo en el área de Ayllus de San Pedro de Atacama. II-78
Tabla II-27: Demanda bruta final actual considerando lámina de agua adicional para lixiviación (m³/mes) y tasa de riego ponderada final en los Ayllus de San Pedro de Atacama (m³/mes) II-79
Tabla II-28: Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas para uso minero catastrados en la cuenca del Salar de Atacama. II-83
Tabla II-29: Tendencias decadales de precipitación (mm por década) en tres estaciones ubicadas en la cuenca del Salar de Atacama. II-112
Tabla II-30: Tendencias históricas decadales de las temperaturas extremas en el periodo 1985-2017 en la estación Peine. II-113
Tabla II-31: Población total censos 1982, 1992, 2002, 2017 en zonas administrativas de interés II-114
Tabla II-32: Proyección período 2025-2035 del crecimiento demográfico en San Pedro de Atacama. II-115
Tabla II-33: Demanda proyectada considerando cambios en la matriz de cultivos y tasa de riego ponderada final (m³/ha/mes). II-119
Tabla II-34: Cartera de proyectos de litio catastrados en región de Antofagasta por COCHILCO al año 2019. ..... II-125
Tabla II-35: Estimación de extracciones promedio de agua para consumo humano y sectores productivos en la cuenca del Salar de Atacama para el año 2019. ..... II-131
Tabla III-1: Distribución de coberturas de suelo consideradas en modelo hidrológico superficial de la cuenca del Salar de Atacama III-28
Tabla III-2: Número de habitantes por localidad al interior de comuna de San Pedro de Atacama III-30
Tabla III-3: Cultivos agrícolas principales presentes en la comuna de San Pedro de Atacama III-31
Tabla III-4: Categorización de los cultivos agrícolas presentes en la comuna de San Pedro de Atacama III-32
Tabla III-5: Capacidad de conducción de canales III-34
Tabla III-6: Capacidad de conducción (L/s) y Derechos de aguas superficiales (L/s) en canales presentes en el modelo III-34
Tabla III-7: Estaciones pluviométricas de base a utilizar en la metodología de obtención de series por catchments en la cuenca del Salar de Atacama. III-40
Tabla III-8**:** Coeficiente de Determinación entre series mensuales de precipitación para 12 estaciones índice en la cuenca del Salar de Atacama. III-44
Tabla III-9**:** Número de observaciones con el cual se realizan las correlaciones para obtener los valores del coeficiente de determinación. III-44

Tabla III-10: Coeficientes de corrección de sesgo mensual para temperatura mínima y máxima basados en la diferencia entre CR2Met y observaciones en estaciones índice. III-52
Tabla III-11: Cambios en precipitación y temperaturas para distintos GCM en la cuenca del Salar de Atacama. III-62
Tabla III-12: Cambios en precipitación y temperaturas para GCM seleccionados III-65
Tabla III-13: Coeficientes de cultivo de consumo de agua en vegas y bofedales III-72
Tabla III-14: Parámetros para especies representativas de las distintas formaciones vegetales nativas de la zona del salar. III-74
Tabla III-15: Parámetros y valores utilizados para diferentes coberturas vegetales en la cuenca del Salar de Atacama. III-75
Tabla III-16: Fracción cubierta por vegetación III-76
Tabla III-17: Sistemas de riego presentes en la comuna de San Pedro de Atacama. III-77
Tabla III-18: Riego utilizado y sus parámetros en la modelación III-77
Tabla III-19: Parámetros utilizados para el proceso de escorrentía y flujo en suelo en método Soil Moisture III-78
Tabla III-20: Parámetros de suelo utilizados en el método MABIA III-78
Tabla III-21: Factor de corrección de acuerdo a la altura del catchment III-79
Tabla III-22: Parámetros utilizados para representar la interacción entre la hidrología superficial y subterránea en cuencas laterales. III-81
Tabla III-23: Balance hídrico del Sistema Superficial del modelo Salar-Monturaqui para el periodo 1986-2018 .....III-88
Tabla III-24: Balance hídrico del modelo lateral para el periodo 1986-2018* III-88
Tabla III-25: Comparación de caudales de recargas laterales de cada subcuenca (en l/s). III-90
Tabla III-26: Ejemplo de cobertura en distintas métricas para evaluar las necesidades de regantes de la Asociación de Regantes del Río San Pedro (valores en %) III-92
Tabla III-27: Población y cobertura de demanda hídrica promedio. III-93
Tabla III-28: Resumen del balance hídrico del sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui en los períodos 1986 – 1999 y 2000 a 2018, obtenido a partir del modelo integrado y del modelo conceptual. III-115
Tabla III-29: Resumen del balance hídrico del sistema subterráneo para las Zonas N-SM, A-SM, B-SM, C-SM y F-SM obtenidos del modelo Salar-Monturaqui en los períodos 1986 – 1999 y 2000 a 2018. .....III-121
Tabla III-30: Resumen del balance hídrico del sistema subterráneo para las zonas que comprenden la Zona F (Zonas N1-SM, A1-SM, A2-SM, B1-SM, C1-SM y C2-SM) obtenidos del modelo Salar-Monturaqui en los períodos 1986 – 1999 y 2000 a 2018. .....III-122
Tabla III-31: Detalle de estadísticos de validación del modelo Salar-Monturaqui. III-124
Tabla III-32: Actualización de los valores de recarga directa para los perfiles SEAWAT en régimen cuasi-estacionario a partir de los resultados del modelo integrado. III-136
Tabla III-33: Parámetros del caso base de simulación de densidad variable con SWI2. .III-144
Tabla III-34: Cierre en términos de volúmenes de entrada y salida al terminar el período cuasi-estacionario en los distintos casos de sensibilización. III-156
Tabla III-35: Marco metodológico requerido para implementar el Modelo en Base a Agentes piloto para la cuenca del Salar de Atacama. III-172
Tabla III-36: Síntesis participantes de cada Taller de Conceptualización. III-177

Tabla III-37: Síntesis por dimensión y principal ODV asociado, de los principales actores y sus procesos de toma de decisión identificado. III-184
Tabla III-38: Contraste de los alcances y estrategias de los trabajos desarrollados por CORFO-Amphos21 (2021) y el desarrollado en este proyecto. III-218
Tabla III-39: Principales similitudes y diferencias de los trabajos desarrollados por CORFO-Amphos21 (2021) y el desarrollado en este proyecto. III-218

Glosario

ABM: Agent-Based Model o Modelo de Agentes

ADI: Área de Desarrollo Indígena

APR: Agua Potable Rural

BCN: Biblioteca del Congreso Nacional

BNA: Banco Nacional de Aguas

CORFO-A21: Modelo numérico hidrogeológico MODFLOW desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021)

CAPRA: Comité de Agua Potable Rural de San Pedro de Atacama

CCS: Coeficiente de corrección de sesgo

CE: Conductividad Eléctrica

CEAZA: Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas

CCHEN: Comisión Chilena de Energía Nuclear

CIREN: Centro de Información de Recursos Naturales

CMZ: Compañía Minera Zaldívar

CNR: Comisión Nacional de Riego

COCHILCO: Comisión Chilena del Cobre

CONADI: Corporación Nacional de Desarrollo Indígena

CONAF: Corporación Nacional Forestal

CONAMA: Comisión Nacional del Medio Ambiente

CORFO: Corporación de Fomento de la Producción

CPA: Consejo de Pueblos Atacameño

CSIC: Consejo Superior de Investigaciones Científicas

DEM: Modelo digital de elevación

D.S.: Decreto Supremo

DARH: Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas

DGA: Dirección General de Aguas

DIA: Declaración de Impacto Ambiental

DIRPLAN: Dirección de Planeamiento del Ministerio de Obras Públicas

DMC: Dirección Meteorológica de Chile

DOH: Dirección de Obras Hidráulicas

EIA: Estudio de Impacto Ambiental

ERI: Estrategia Regional de Innovación

FCM: Fuzzy-Cognitive Mapping

GCM: Modelos de Circulación General de la atmósfera

GORE: Gobierno Regional

HR: Humedad Relativa

IAHS: Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas

IDW: Inverso Ponderado de la Distancia

INDAP: Instituto de Desarrollo Agropecuario

INE: Instituto Nacional de Estadísticas

INIA: Instituto de Investigaciones Agropecuarias

ITP: Instrumentos de Planificación Territorial

IUA: Índice de Ubicación y Altura

LCE: Carbonato de Litio Equivalente

MEL: Minera Escondida Limitada

meq: Miliequivalente

MINAGRI: Ministerio de Agricultura

MMA: Ministerio de Medio Ambiente

MNT: Monturaqui-Negrillar-Tilopozo

MODIS: Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

MOP: Ministerio de Obras Públicas

ODV: Objetos de Valoración

ONEMI: Oficina Nacional de Emergencia del Interior

ONG: Organización No Gubernamental

PAC: Plan de Contingencia

PAT: Plan de Alerta Temprana

PEGRH: Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos

PM: Modelación Participativa (del Participatory Modelling por su sigla en inglés)

PIBR: Producto Interno Bruto Regional

PLADECO: Plan de Desarrollo Comunal

PROT: Plan Regional de Ordenamiento Territorial

PSA: Planes de Seguimiento Ambiental

PSAC: Planes de Seguimiento Ambiental Comunitario

RAMSAR: Convención relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas. Su nombre obedece a la ciudad de Irán en la que se firmó, en 1971.

RCA: Resolución de Calificación Ambiental

RG: Río Grande

RNAI: Registro Nacional de Agrupaciones Indígenas

RRHH: Recursos Hídricos

SdA: Salar de Atacama (en referencia a la cuenca)

SAG: Servicio Agrícola y Ganadero

SEA: Servicio de Evaluación Ambienta

SEI: Stockholm Environment Institute

SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

SERNAGEOMIN: Servicio Nacional de Geología y Minería

SIG: Sistemas de Información Geográfica

SERNATUR: Servicio Nacional de Turismo

STRM: Shuttle Radar Topography Mission

SMA: Superintendencia del Medio Ambiente

SNASPE: Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado

SPA: San Pedro de Atacama

SQM: Sociedad Química y Minera de Chile S.A.

SWI2: Seawater Intrusion Package

STD: Sólidos Totales Disueltos

USGS: United States Geological Survey (Agencia científica del gobierno de Estados Unidos)

UH: Unidades Hidrogeológicas

UTM: El Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (En inglés Universal Transverse Mercator, UTM)

VIC: Variable Infiltration Capacity

ZOIT: Zona de interés Turístico

Resumen ejecutivo

La cuenca del Salar de Atacama es una cuenca endorreica donde conviven en el uso y aprovechamiento del recurso hídrico diferentes actores, consumiendo agua a nivel superficial y subterránea. A nivel de consumo superficial destaca el consumo de agua para riego. El consumo de agua subsuperficial se utiliza para proveer de agua potable al consumo humano de la población residente en la cuenca y los visitantes que llegan a la cuenca por actividades turísticas, y para el consumo industrial de procesos mineros. Por otra parte, los acuíferos del sector núcleo del Salar de Atacama son explotados para la extracción de salmueras altas en minerales no metálicos como potasio y litio. El agua y la salmuera son fluidos de distinta composición y densidad que, a pesar de coexistir de forma estrecha en la cuenca mediante la existencia de la interfaz o cuña salina, deben ser diferenciados para una gestión adecuada de estos recursos.

Las necesidades de agua asociadas a los usuarios existentes, la potencial entrada de nuevos actores a la cuenca (por ejemplo, proyectos de inversión turística o minera), sumado a la disponibilidad variable del recurso hídrico, su vinculación con ecosistemas sensibles y su biodiversidad, generan un desafiante escenario de gestión hídrica. Para una adecuada gestión hídrica en este escenario resulta necesaria una estrecha colaboración de los servicios del estado, de los usuarios del recurso hídrico y otros actores con intereses tanto en la gestión del recurso como en su protección y disponibilidad futura. Para ello, surge la necesidad desarrollar un modelo integrado de gestión hídrica, que permita facilitar la colaboración de actores y la toma de decisiones en la administración del recurso hídrico en la Cuenca del Salar de Atacama.

En este contexto se ha formulado el convenio de colaboración CORFO - DGA que apunta al desarrollo de una herramienta de análisis integrado que reduzca la incertidumbre en la toma de decisiones en la administración del recurso hídrico de la Cuenca del Salar de Atacama. Dicha herramienta debe incorporar aspectos de diversa naturaleza, como biofísicos, económicos, sociales, tecnológicos, administrativos e institucionales, en el marco de una visión de desarrollo para el país y la política de recursos hídricos impulsada por la DGA.

En el marco de la colaboración con la Dirección General de Aguas (DGA) para velar por la sustentabilidad de la actividad minera y para apoyar a la planificación estratégica de la DGA, la Corporación de Fomento a la Producción (CORFO) ha desarrollado el proyecto: **Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama**, que se presenta en este informe**.** Este proyecto se lleva a cabo por el Centro de Cambio Global de la Pontificia Universidad Católica de Chile con el apoyo del Stockholm Environment Institute (SEI), la Universidad Tecnológica de Sydney (UTS) y TECO Group. El objetivo general de este proyecto es desarrollar un Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la cuenca del Salar de Atacama, como herramienta numérica (modelo integrado cuyos detalles se presentan más adelante), de soporte para la toma de decisiones en la administración del recurso hídrico en la Cuenca del Salar de Atacama.

Con este proyecto, se apoya en el diseño del Plan Estratégico de Gestión Hídrica (PEGH) de la cuenca del Salar de Atacama ,llevado a cabo por la DGA, mediante la complementación de los modelos de simulación de flujo hidrogeológico existentes, desarrollando una herramienta de simulación conjunta de hidrología superficial-subterránea, e integrada con capacidades de simulación de las extracciones de agua y salmuera que permitan complementar y apoyar la toma de decisiones respecto de la gestión de estos recursos en la cuenca. Este proyecto se estructura en base a tres etapas: Etapa I: Levantamiento de información de base; Etapa II: Diagnóstico; Etapa III: Formulación y ejecución.

Levantamiento de información de base

Tomando en cuenta la información pública recopilada hasta diciembre de 2019 se presenta en esta Etapa una descripción de detalle de la cuenca del Salar de Atacama incluyendo: su ubicación y características geográficas, delimitación(es) política-administrativas existentes, descripción del medio físico, biótico y humano. Con respecto del medio físico se incluye una caracterización climática, hidrológica e- hidrogeológica. Con respecto del medio biótico se incluye una caracterización de los biomas y ecosistemas principales separando formaciones vegetacionales zonales y azonales además de especies de fauna y biota acuática relevantes. Finalmente, respecto del medio humano se incluye una caracterización de aspectos demográficos, de la presencia de pueblos originarios y una descripción de las actividades económicas principales en relación con la gestión de los recursos hídricos (agricultura, turismo y minería). Esta recopilación de información permitió elaborar la línea base del estudio, la cual se resume a continuación.

La cuenca del Salar de Atacama es una cuenca endorreica, con una extensión de 17.020 km^2, ubicada dentro de los límites político-administrativos de la Región de Antofagasta, capital ciudad de Antofagasta, específicamente en la provincia de El Loa, comuna San Pedro de Atacama. La altitud mínima de la cuenca es de aproximadamente 2.300 m.s.n.m., mientras que, la máxima es superior a los 6.200 m.s.n.m. Su mayor longitud en sentido norte-sur es de 210 km y en sentido este-oeste de 110 km.

En relación con el medio físico se destaca que el origen de la cuenca es tectónico, y está delimitada por la Cordillera Domeyko por el oeste y la Cordillera de los Andes al este. Está compuesta por un conjunto de rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias, que constituyen el basamento y un relleno compuesto por sedimentos clásticos y evaporíticos en el núcleo del Salar. El núcleo se encuentra cortado por el Sistema de Falla Salar, el cual genera un alzamiento mayor a 400 m del bloque occidental. La geología del Salar de Atacama está conformada principalmente por morfoestructuras de orientación, principalmente, norte-sur. Éstas se disponen, de oeste a este, en: Cordillera Domeyko, Llano de la Paciencia, Cordillera de la Sal, Salar de Atacama, Cordillera Occidental, Cordillera de los Andes (donde se ubica el arco volcánico actual) y el Cordón de Lila al sur. Respecto a la hidrogeología de la cuenca, se definen 6 Unidades Hidrogeológicas que corresponden a UH-1 (depósitos aluviales del borde este, norte y sur del Salar de Atacama, de alta importancia hidrogeológica), UH-2 (evaporitas de halita y yeso en el núcleo del salar, gravas y arenas cerca de Monturaqui), UH-3 (rocas fracturadas de relevancia hidrogeológica), UH-4 (rocas

fisuradas y kársticas de menor importancia hidrogeológica), UH-5 (rocas volcánicas y depósitos no consolidados de menor importancia hidrogeológica) y UH-6 (rocas volcánicas, intrusivas, volcano-sedimentarias y sedimentarias, sin recursos de agua subterránea). Se concluye que los acuíferos presentan variabilidad de propiedades hidráulicas como conductividad y almacenamiento, principalmente en la UH-1, mientras que la UH-6 presenta una capacidad de almacenamiento y flujo de agua subterránea reducida. En relación con la hidrología, las precipitaciones en la cuenca del Salar de Atacama son escasas. Los caudales afluentes al núcleo del salar están conformados principalmente por flujos subterráneos. La distribución espacial de las precipitaciones dentro de la cuenca es heterogénea, ya que se incrementan a mayor altitud y según la dirección noreste. En el núcleo del salar la precipitación media es menor a 20 mm/año, mientras que, en las subcuencas aportantes se sobrepasan los 100 mm/año. Se concluye que el régimen de precipitación de la cuenca es seco y presenta la principal recarga del sistema hidrológico subterráneo. Los principales aportes hacia el núcleo del salar se producen desde los extremos, en especial desde el extremo sureste, pues es ahí donde se producen la mayor cantidad de precipitaciones.

Con relación al medio biótico de la cuenca del Salar de Atacama, se realiza una caracterización de su bioma, compuesto de la flora y fauna que comparten características comunes, y se describen los ecosistemas presentes en la cuenca. En su mayoría, la biota presente en el salar se caracteriza por vivir en condiciones extremas de humedad y salinidad. Los ecosistemas descritos se componen por formaciones vegetales zonales y azonales, fauna y biota acuática. Respecto a las formaciones vegetales de la cuenca, éstas se conforman principalmente por estepa y matorral desértico de baja cobertura, mientras que los cultivos ocupan una menor proporción respecto a las primeras. En cuanto a la fauna presente en la cuenca, se identifican tanto especies endémicas como nativas no endémicas, las cuales se desagregan en anfibios, reptiles, aves y mamíferos. En relación con la biota acuática, ésta corresponde en su mayoría a invertebrados y microorganismos que componen el fitoplancton, zooplancton, zoobentos y tapetes microbianos. Estas últimas formaciones se componen de microorganismos extremófilos, los cuales destacan por su importancia ecosistémica para captar CO_2. A estos grupos se agregan además comunidades vegetales acuáticas de macrófitas.

La posibilidad del desarrollo de esta vida vegetal y animal se encuentra estrechamente relacionada a la presencia de agua en el lugar, la cual a su vez está determinada por las lluvias estivales en la alta cordillera y el paso del flujo subterráneo hacia sectores de lagunas. En efecto, la presencia y distribución de vegetación en la cuenca está directamente determinada por la disponibilidad de agua asociada a lluvias o a cuerpos de aguas locales que a su vez se pueden nutrir de afloramiento de aguas subterráneas; y la presencia de fauna está, en gran medida, asociada a esta vegetación. Se concluye que la cuenca del Salar de Atacama alberga una importante diversidad de ecosistemas, los cuales dependen de los recursos hídricos de la cuenca.

Con respecto al medio humano, la cuenca del Salar de Atacama se ubica en la comuna de San Pedro de Atacama que ha experimentado un explosivo crecimiento demográfico del 121% en el último período censal, alcanzando un total de 10.996 habitantes al 2017.

Dicha población se distribuye de forma equilibrada entre el sector urbano (50,2%), que reside en el pueblo de San Pedro de Atacama y otros poblados cercanos, y la población rural (49,8%). Esta última se organiza en su mayoría en localidades autónomas denominadas Ayllus, que pertenecen al pueblo indígena Atacameño. En concreto, 21 comunidades indígenas se encuentran registradas en CONADI dentro del territorio comunal. De estas, 18 se organizan además bajo el alero del Consejo de Pueblos Atacameños, asociación indígena cuyo principal objetivo consiste en proteger y promover el etnodesarrollo, y preservar la cultura Atacameña, velando por el fortalecimiento del espíritu de comunidad y solidaridad entre sus miembros. La cosmovisión del pueblo atacameña residente en esta cuenca se expresa en una profunda y recíproca relación entre el hombre y la naturaleza. Siendo la principal deidad la "Pachamama" o madre tierra, diversos espíritus habitan también cada manifestación natural como ríos y cerros.

En cuanto a la actividad económica, la principal actividad de la Región de Antofagasta es la minería, la cual representa en promedio el 53% (período 2013-2017) de su economía, lo que se refuerza considerando que cerca del 45% del PIB minero del país se genera en esta región. Misma tendencia regional se manifiesta en la cuenca del Salar de Atacama, en la cual se ubican las operaciones de las empresas Albemarle y SQM para el procesamiento de salmuera que permite la obtención de productos como los compuestos de litio (carbonato de litio, hidróxido de litio y cloruro de litio), potasio (cloruro de potasio y sulfato de potasio), y boro (ácido bórico). La significativa presencia de comunidades indígenas centra su actividad económica en la actividad agrícola-ganadera y turística. La primera, juega un papel secundario en el desarrollo económico de la cuenca, debido principalmente a la salinidad de los suelos y la aridez característica de la zona, aunque es una actividad de subsistencia y una forma de vida para las comunidades atacameñas. Los principales cultivos corresponden a plantas forrajeras, mientras que la actividad ganadera consiste principalmente en ganadería bovina. Por el contrario, la actividad turística juega un rol fundamental en la economía local, lo cual se evidencia en el reconocimiento de la Zona de Interés Turístico declarada sobre el área de *San Pedro de Atacama – Cuenca Geotérmica el Tatio*, la cual reconoce que esta zona es uno de los principales Productos Turísticos que posee la Oferta de Turismo en Chile, y se sustenta además en la diversidad de atractivos turísticos locales (ej., el Salar de Atacama, la Reserva nacional Los Flamencos, lagunas, vegas y bofedales), y su gran valor arqueológico, arquitectónico, cultural, ecológico, natural, geográfico y paisajístico.

Se incluye también una descripción de los componentes claves para la gestión de los recursos hídricos tomando en cuenta el rol de actores claves y herramientas e instrumentos para la gestión. Con respecto a los actores involucrados en la gestión del recurso hídrico en la cuenca del Salar de Atacama, estos pueden clasificarse a nivel público, privado y pertenecientes a la sociedad civil. En cada estrato, se identifica un amplio rango de actores que forma parte del proceso regulatorio. A nivel público, por ejemplo, se identifican una serie de instituciones nacionales, regionales y organismos locales (ej. Municipalidad de San Pedro de Atacama). A un nivel privado, se caracterizan una serie de empresas usuarias del recurso hídrico a partir del catastro de derechos de aprovechamiento de aguas, que principalmente tienen foco en la minería. Además, no se encuentran organizaciones de usuarios de aguas organizadas dentro de los límites de la cuenca. Por último, a nivel de la

sociedad civil se identifican cinco localizaciones en donde se enclavan sistemas de Agua Potable Rural (Toconao, Socaire, San Pedro de Atacama, Río Grande y Peine), entre los que destacan por sus niveles de producción y suministro de agua potable, el "Comité de Agua Potable Rural de San Pedro de Atacama" (CAPRA) y el "Comité de Agua Potable de Toconao". Se suman en este último grupo de actores las comunidades indígenas Atacameñas y sus organizaciones (ej. el Consejo de Pueblos Atacameños), Universidades (ej. Universidad de Antofagasta), centros de investigación, fundaciones y ONGs, todos los cuales participan de las diversas instancias de gestión locales.

Con respecto a los instrumentos y herramientas de planificación y gestión, se consideran las distintas opciones que tiene el Estado para gestionar de manera directa e indirecta los recursos hídricos. Estas se clasifican según su foco de acción en: (1) planificación del territorio, (2) planificación de los recursos hídricos (incluida infraestructura asociada), (3) gestión del aprovechamiento de los recursos hídricos, (4) gestión de áreas naturales, (5) gestión de territorios indígenas y (6) gestión de otros recursos de asociados a actividades productivas (ej. minería no metálica, agricultura, energía).

En el **primer punto**, sobre planificación del territorio, los lineamientos de planificación para el territorio regional provienen de la Estrategia Regional de Desarrollo 2009-2020 para la región de Antofagasta, la cual propone un conjunto de Lineamientos Estratégicos, Objetivos Generales y Líneas de Acción sobre temáticas de relevancia como el Desarrollo Territorial, Económico, Social, Medio Ambiental, y en Salud. Bajo el alero de este instrumento se desarrolla el Plan de Desarrollo Comunal de San Pedro de Atacama (2015 – 2020), el cual orienta el accionar municipal, integrando las miradas sectoriales para el desarrollo de la comuna. Este instrumento, al ser una síntesis transversal de las actividades que ocurren en la cuenca, y en armonía con la mirada regional, tiene el potencial de situarse como un catalizador de los esfuerzos de un plan integrado de gestión hídrica, lo cual cobra mayor importancia al reconocer que el recurso hídrico es la piedra angular para el desarrollo de la comuna y sus habitantes. Con respecto al **segundo punto**, sobre planificación de los recursos hídricos, se destaca la realización de diagnósticos y planes de gestión integrada de recursos hídricos de la cuenca. Estos son antecedentes relevantes para el diseño de un Plan Estratégico de Recursos Hídricos para la cuenca. Respecto del **tercer punto,** de gestión del aprovechamiento de los recursos hídricos, se describen una serie de herramientas de gestión respecto del otorgamiento y ejercicio de derechos de agua y su aplicación en casos específicos para la cuenca del Salar de Atacama. En el **cuarto punto,** respecto de la gestión de áreas naturales se presenta información que describe los instrumentos y herramientas de gestión de áreas naturales (no incluidas en el punto anterior). En particular se detallan aspectos de aquellos instrumentos que garantizan la protección de los ecosistemas presentes en el Salar de Atacama tomando las diversas clasificaciones de áreas protegidas contempladas en la institucionalidad en Chile. En el **quinto punto**, relativo a la gestión de territorios indígenas destaca la declaración como Área de Desarrollo Indígena al área de Atacama la Grande, fundada sobre un territorio de 23.400 km^2, con una población total Atacameña de 2.500 personas, y agrupando un total de 17 comunidades indígenas. Este espacio territorial permite al Estado focalizar su acción en beneficio del desarrollo armónico de los indígenas y sus comunidades. En cuanto al **sexto y último punto**, de gestión de otros recursos de asociados a actividades productivas, todas

las actividades económicas que se desarrollan en esta región están reguladas o tienen incentivos en base a leyes y decretos. Por ejemplo, los recursos minerales, los recursos energéticos (Ley de Fomento a las Energías Renovables no Convencionales), la actividad agrícola (Ley de Fomento al Riego) y la actividad turística (Zona de interés Turístico San Pedro de Atacama – Cuenca Geotérmica el Tatio). Todas estas regulaciones impactan directa o indirectamente en los recursos hídricos disponibles, y por ello deben considerarse como parte integral de un plan de gestión, de modo de lograr un uso eficiente y adecuado de los recursos naturales del país.

La gestión de los recursos hídricos, requieren de un adecuado monitoreo del estado de las variables críticas que componen dicho sistema. Complementando la información entregada respecto de instrumentos y herramientas para la gestión de recursos hídricos, se describen también en este informe, de manera básica, las características de los sistemas de monitoreo existentes en la cuenca del Salar de Atacama siguiendo la estructura en la cual se presentó la descripción de la cuenca, es decir, considerando el medio físico, biótico y humano. Respecto del medio físico se puede destacar que la cuenca posee 12 estaciones con registros de fluviometría medidos por la Dirección General de Aguas (DGA), 12 estaciones con registros meteorológicos (temperaturas extremas, precipitación, viento y humedad relativa) medidos por la DGA, la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Tres estaciones han medido niveles piezométricos de pozos de observación de la DGA y 7 estaciones poseen mediciones de calidad del agua de distintos parámetros hidrogeoquímicos, dentro de los cuales destacan la conductividad eléctrica, concentración de cloruros e isótopos. Estas estaciones operadas por servicios públicos se complementan con estaciones de pluviometría y nivel de pozos de propiedad de empresas mineras (SQM Salar S.A. y Rockwood/Albemarle). Respecto del medio biótico también existen sistemas de monitoreo de áreas de protección oficial bajo tutela del Estado como es el caso de la Reserva Nacional Los Flamencos y el Sistema Hidrológico de Soncor. A este sistema de monitoreo se agrega el monitoreo de especies de flora y fauna realizado por las mismas dos empresas mineras. Finalmente se pueden identificar sistemas de monitoreo desarrollados por distintas agencias del sector público respecto del medio humano incluyendo tanto aspectos demográficos como de actividades económicas.

De manera adicional a la descripción de la cuenca en todos estos aspectos, se desarrolló un capítulo que describe y establece los desafíos respecto a la modelación hidrológica, hidrogeológica y ecológica existente en la cuenca del Salar de Atacama. Se presentó una descripción de los antecedentes respecto a los estudios de modelación hidrológica e hidrogeológica de la cuenca, la cual incluye la existencia de modelación hidrológica superficial, además de modelación hidrogeológica. Se evalúa la integración de estos sistemas tanto a nivel conceptual como mediante simulaciones numéricas. Se especifican las bases de datos y los modelos respectivos que fueron utilizados en estas referencias. Por otro lado, se presentan las referencias asociadas a estudios de modelación ecológica de la cuenca y se evalúa el grado de integración entre este sistema con los modelos hidrológicos mencionados anteriormente. Finalmente, se identificaron los desafíos que existen actualmente respecto al desarrollo de la modelación mencionada anteriormente. En específico, respecto a la modelación hidrológica superficial, se cuenta principalmente

con modelos conceptuales de precipitación y escorrentía para establecer un balance hídrico general a escala de cuenca. Con respecto a experiencias con modelos numéricos, destacan el desarrollado por GCF Ingenieros (2018) (análogo al modelo hidrológico SWAT) y el modelo Variable Infiltration Capacity (Liang et al., 2001) desarrollado en la Actualización del Balance Hídrico de Chile (DGA, 2018). Respecto de la modelación numérica hidrogeológica, se cuenta con más de 16 modelos subterráneos desarrollados en MODFLOW y FEFLOW, incluyendo el modelo numérico desarrollado por Amphos 21 para CORFO, el cual servirá como insumo para la Etapa III de este proyecto. Por otro lado, se puede concluir que la mayoría de los estudios existentes de modelación ecológica que comprenden la cuenca del Salar de Atacama son de carácter conceptual, entre los cuales destaca el de Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK (2017b). Se concluye respecto a modelación ecosistémica que se cuenta tanto con estudios conceptuales, los cuales presentan una visión general y completa de la cuenca, como modelos ecosistémicos específicos, los cuales buscan entender el comportamiento de ecosistemas tanto a escala de cuenca como a escala local.

A partir de la recopilación de antecedentes presentada en este informe se concluye que existe una base importante sobre la cual poder desarrollar un diagnóstico sobre la gestión de recursos hídricos y salmueras en la cuenca del Salar de Atacama que se lleva a cabo en la Etapa II de Diagnóstico del proyecto. Sin perjuicio de lo anterior, el levantamiento de información debe ser complementado en el desarrollo del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca especialmente a través de un trabajo participativo que no forma parte de los alcances de este proyecto y el cual debe ser liderado por el órgano competente del Estado en la gestión y administración del recurso hídrico, la DGA.

Por otra parte, respecto de los modelos existentes se reconoce que son una base importante para el desarrollo de la herramienta que se debe desarrollar como parte de la Etapa III de Formulación y ejecución de este proyecto. Sin embargo, para lograr el desarrollo de esta herramienta se deben superar los desafíos en términos de modelación de hidrología superficial y ecológica, así como también la inclusión de la modelación explícita de toma de decisiones, acciones e intervenciones de los distintos actores relevantes en la cuenca. Y finalmente se deben superar aquellos desafíos ligados a la integración de estos distintos modelos.

Diagnóstico

A partir del levantamiento de información base, se distingue entre agua fresca y salmuera, los cuales son fluidos de distinta composición y densidad que pueden ser diferenciados en función de los sólidos disueltos totales (SDT) o su conductividad eléctrica. Sin embargo, si bien el agua y la salmuera presentan diferentes grados de conexión hidráulica entre las unidades hidrogeológicas que los almacenan, estos dos fluidos coexisten de forma estrecha en la cuenca mediante la existencia de la interfaz o cuña salina.

Respecto a los balances, se da cuenta en este informe del balance de agua a nivel superficial y subterráneo que se realizó en el estudio Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018). De acuerdo a los análisis presentados la entrada principal de agua a la

cuenca corresponde a las precipitaciones, las que en su régimen natural satisfacen las salidas evaporativas, las salidas por evapotranspiración, la evaporación desde la napa y el consumo humano que existía en la cuenca. Debido a las extracciones antrópicas de las últimas décadas, a partir de mediados de la década de los 90s de acuerdo con el balance presentado por Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), el equilibrio hídrico natural de la cuenca se vio influenciado, existiendo una variación en el almacenamiento en el balance general, que se ve compensado por el agua disponible del almacenamiento del sistema subterráneo.

Las demandas de agua existentes en la cuenca, se dividen en consumo de agua dulce y salmueras. Respecto del primero, existen demandas de agua dulce para la industria, riego y el consumo por la población (residente y visitante principalmente asociada al turismo). La demanda para el consumo de agua potable para la población en la cuenca del Salar de Atacama se encuentra cubierta casi en su totalidad por Comités de agua potable rural (APR) que de acuerdo a los antecedentes recopilados tienen una buena cobertura (del orden de un 100% salvo en la localidad de San Pedro de Atacama, la cual presenta una confiabilidad del suministro del 96%). Respecto al consumo antrópico, por una parte se encuentra la demanda de agua para fines industriales, que proviene de la actividad minera en gran medida producto de la extracción de agua fresca (concentradas en la zona sureste de la cuenca), y por otra parte la demanda de salmueras, que proviene de la minería metálica que está concentradas principalmente en la zona del núcleo. La actividad agrícola también tiene un consumo de agua a nivel superficial que se concentra en torno a los Ayllus del poblado de San Pedro de Atacama y otros pueblos en la cuenca. Los ecosistemas acuáticos dependen también de los niveles presentes en las lagunas, los que a su vez dependen del balance de entradas y salidas de agua (fresca y salmuera). La conservación de la biodiversidad en estos ecosistemas no solo depende de la cantidad, sino que también de la calidad del agua donde los efectos de la salinidad cobran importancia, sin embargo, no hay claridad respecto de la relación funcional de estas variables.

Se da cuenta en esta Etapa de la información relevante que permita realizar una modelación de las proyecciones climáticas futuras que sirvan para caracterizar la oferta y la demanda de agua en la cuenca del Salar de Atacama. Por una parte, respecto de los escenarios de clima futuro se presenta un análisis de proyecciones futuras asociados a cambio climático que son contrastado con información de tendencias observadas. El análisis de estas proyecciones climáticas da cuenta del alto nivel de incertidumbre respecto de cambios futuros en precipitación (diferente a otras cuencas del país) pero a la vez dan cuenta del importante aumento en temperatura (que supera a la situación de otras cuencas del país). También en esta Etapa se presenta el análisis que permite proyectar el crecimiento demográfico, agrícola, minero y de actividad turística, para poder posteriormente realizar una modelación de los cambios en demanda de recursos hídricos para estos distintos sectores para la cuenca del Salar de Atacama. Se proyecta un aumento en las necesidades de agua potable por parte de la población residente y aquella asociada al turismo. La proyección futura de desarrollo minero podría prever que se continúe con las tasas de extracción de salmuera y agua dulce en el futuro. En el caso de la minería no metálica, podría existir un potencial aumento en la necesidad de extracción

de salmuera y agua dulce en el salar dado que actualmente se encuentra en evaluación ambiental el proyecto "Planta de Producción de Sales de Potasio, SLM NX Uno de Peine". A la fecha no existen nuevas autorizaciones ambientales aprobadas para poder aumentar esta extracción, así como tampoco la autorización de nuevas cuotas de extracción de litio por parte de la CCHEN para la explotación y exportación de litio. Por otra parte, respecto de la extracción de agua fresca por parte de actividades de minería de cobre, a partir de diciembre del año 2019 deja de operar la extracción de agua fresca por parte de Minera Escondida dado que cesa su permiso ambiental de extracción.

Los análisis de balances hidrológicos y de demanda de recursos hídricos por distintos sectores son complementados por análisis de otros componentes relevantes de la gestión de recursos hídricos tales como el nivel de coordinación de los distintos usuarios del agua y las relaciones que existen entre los distintos sectores de usuarios del agua (minería, medioambiente, agricultura, consumo humano). Se incluyen también análisis de los instrumentos que se han diseñado para la gestión de los derechos de aprovechamiento de agua, así como el de protección de ecosistemas y otros recursos. La presencia de estos múltiples actores con diversos objetivos requiere de una gobernanza que debe ser diseñada en el marco del desarrollo del Plan Estratégico de Gestión Hídrica para la cuenca del Salar de Atacama, dirigido por la DGA. Se incluyen también en estos análisis limitaciones respecto de otros instrumentos complementarios pero claves para una correcta gestión, como es el monitoreo de los sistemas naturales y antrópicos. Pese a que existen recursos importantes (públicos y privados) para realizar monitoreo de diversas variables (físicas y bióticas) todavía persisten incertidumbres asociadas principalmente a la gran extensión de la cuenca (en relación con las zonas donde se concentran los monitoreos) y la complejidad de los procesos biofísicos que ahí ocurren, y que tiene relación con los esfuerzos que deben desarrollarse para lograr una integración entre los diversos sistemas de monitoreos que se realizan.

Este diagnóstico se desarrolla en la Etapa II y sirve de base para la Etapa III de Formulación y ejecución del proyecto en el que se desarrolla el Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama.

Formulación y ejecución - Desarrollo de los modelos

En la Etapa III de Formulación y ejecución, se llevó a cabo el desarrollo de una herramienta de modelación integrada a nivel de hidrología superficial y subterránea y un modelo conceptual de como este tipo de herramientas de base física pueden además acoplarse con modelos que representan la toma de decisiones de actores usuarios de los recursos hídricos y la institucionalidad asociada a la gestión de estos recursos. Este modelo integrado busca representar de la mejor manera posible la hidrología superficial y subterránea de la cuenca, la integración de las unidades hidrogeológicas y sus propiedades, los fenómenos relevantes del balance hídrico y la interacción entre los fluidos de distinta densidad, sin embargo, se debe considerar como una herramienta que simplifica un modelo conceptual. Además, la modelación de sistemas hidrológicos e hidrogeológicos a escala de cuenca conlleva una incertidumbre asociada principalmente a la información disponible para la construcción del modelo y las simplificaciones adoptadas para la modelación. Por lo tanto, se debe considerar esto al momento de levantar conclusiones a escalas de trabajo locales,

considerando sus resultados como tendencias o aproximaciones. Para mejorar la representatividad del modelo, éste se debe complementar y actualizar con nueva información meteorológica, hidrológica, geológica, geofísica, hidrogeológica e hidroquímica que sea recopilada en futuros estudios.

A través de los resultados obtenidos, y considerando sus limitaciones, se sugiere el uso del modelo WEAP-MODFLOW acoplado como herramienta de base para el desarrollo del PEGH (DGA) de la cuenca del Salar de Atacama. Se sugiere por otra parte representar la dinámica de la interfaz salina en perfiles bidimensionales representados por el modelo SEAWAT de acuerdo a lo desarrollado en el trabajo de CORFO-Amphos21 (2021).

También se presenta en este informe la potencialidad de acoplar a un modelo de base física módulos explícitos que representen decisiones que toman actores en función de variables biofísicas que pueden observar (monitorear) en una cuenca. En específico se ha implementado un modelo conceptual piloto en base a agentes que contiene un módulo físico que representa de manera simplificada los flujos de agua a nivel subterráneo en una cuenca endorreica y un modelo social que representa el proceso de toma de decisiones asociado a la institucionalidad ambiental existente en Chile. Este es uno de los distintos procesos de toma de decisiones que pueden ser incorporados en un modelo de agentes para una cuenca como la del Salar de Atacama. El modelo conceptual simplificado muestra la conexión entre la toma de decisiones y la observación de variables biofísicas y cómo esta conexión gatilla acciones en decisiones que impactan el estado de estas variables biofísicas.

Se sugiere seguir desarrollando este tipo de herramientas como los modelos de agentes para los futuros desarrollos de los PEGH de la DGA. De esta manera se puede interactuar con distintos actores para poder incorporar sus percepciones respecto del proceso de toma de decisiones y acoplar los módulos con elementos de hidrología social con la versión finalizada del modelo físico integrado.

Introducción

1 Cuenca del Salar de Atacama

La cuenca del Salar de Atacama es una cuenca endorreica donde conviven en el uso y aprovechamiento del recurso hídrico y la salmuera diferentes actores, que utilizan agua a nivel superficial y subsuperficial. El agua y la salmuera son fluidos de distinta composición y densidad que, a pesar de coexistir de forma estrecha en la cuenca mediante la existencia de la interfaz o cuña salina, pueden ser diferenciados para una gestión adecuada de estos recursos. A nivel de consumo superficial destaca el consumo de agua para riego y de suministro de agua potable para algunos pueblos en la cuenca. La extracción de agua subterránea es utilizada para proveer de agua potable a una parte importante de la población residente en la cuenca (y los visitantes que llegan a la cuenca por actividades turísticas), y para el consumo industrial de procesos mineros. Por otra parte, los acuíferos del sector del núcleo del Salar de Atacama, acuíferos con altos niveles de salinidad (salmuera), son utilizados para la extracción de salmueras que poseen altas concentraciones de potasio y litio.

Las diversas necesidades de consumo de agua asociadas a los usuarios existentes, junto con la potencial entrada de nuevos actores a la cuenca, como por ejemplo nuevos proyectos de inversión turística o minera, sumado a una disponibilidad variable en constante cambio, y su vinculación con los ecosistemas específicos del Salar de Atacama, generan un particular escenario, donde resulta necesaria, para una adecuada gestión del recurso hídrico, una estrecha colaboración de los actores en la cuenca, donde destacan los servicios del Estado, los usuarios del recurso hídrico y otros actores con intereses tanto en la gestión del recurso como en su protección y disponibilidad futura.

2 Convenio de Colaboración CORFO - DGA y proyecto Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama

La gestión de los distintos recursos naturales está estrechamente interrelacionada, comprometiendo la colaboración y coordinación desde los distintos servicios del Estado. Esta interrelación cobra fuerza especial en el caso de la gestión de recursos hídricos y la salmuera, dos fluidos que coexisten en la cuenca Salar de Atacama. Respecto de la administración y gestión de los recursos hídricos, la DGA es la agencia del Estado encargada de velar por dichas funciones. Por su parte, CORFO está a cargo de la administración de los contratos con las empresas Albemarle y SQM Salar S.A., que rigen las actuales operaciones de litio en las pertenencias mineras constituidas en el Salar de Atacama de propiedad de dicha Corporación.

La demanda del consumo hídrico y salmuera en la cuenca de Salar de Atacama, en un contexto donde los efectos del cambio climático se manifiestan cada vez más, requieren del desarrollo de herramientas, que fortalezcan y apoyen la toma de decisiones de los organismos competentes para la administración de estos recursos. El Convenio de

colaboración CORFO-DGA[1] se enmarca en este contexto, y es bajo esa colaboración donde se desarrolla una herramienta de análisis integrado que reduzca la incertidumbre en la toma de decisiones en la administración del recurso hídrico y la salmuera de la cuenca del Salar de Atacama.

CORFO, ha avanzado en el desarrollo de un modelo hidrogeológico numérico (Amphos 21, 2021), que permita proporcionar las bases para la generación de un modelo de gestión del recurso hídrico y la salmuera en la cuenca del Salar de Atacama.

Por otra parte, la DGA se encuentra desarrollando Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH) para las 101 cuencas del Banco Nacional de Aguas cuyo diagnóstico se construye en parte a partir del uso de herramientas de modelación que sean capaces de representar los sistemas hidrológicos superficiales y subterráneos.

En el marco del Convenio de colaboración CORFO-DGA, y para apoyar a la planificación estratégica de la DGA, CORFO ha desarrollado el proyecto: **Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama**, que se presenta en este informe. Este proyecto se lleva a cabo por el Centro de Cambio Global de la Pontificia Universidad Católica de Chile con la colaboración del Stockholm Environment Institute (SEI), la Universidad Tecnológica de Sydney (UTS) y TECO Group.

Con este proyecto, se apoya entonces en el diseño del PEGH de la cuenca del Salar de Atacama, llevado a cabo por la DGA, mediante la complementación de los modelos de simulación de flujo hidrogeológico existentes, desarrollando una herramienta de simulación conjunta de hidrología superficial-subterránea, e integrada con capacidades de simulación de las extracciones de agua y salmuera que permitan apoyar la toma de decisiones respecto de la gestión de estos recursos en la cuenca.

3 Objetivos del proyecto

3.1 Objetivo general

El objetivo general de este proyecto es desarrollar un Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la cuenca de Salar de Atacama, como herramienta numérica, de soporte para la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico y la salmuera en la cuenca de Salar de Atacama, que considere la integración de las componentes de agua superficial y subterránea de la cuenca, a fin de reducir la incertidumbre del comportamiento hídrico frente a la entrada de nuevos actores, variación en la oferta y demanda hídrica y extracción de salmuera, protección de ecosistemas sensibles y efectos del cambio climático, considerando la caracterización de proyecciones climáticas y consumo hídrico futuro , tanto en el espacio como en el tiempo.

[1] Convenio de Colaboración Corporación de Fomento de la Producción y Dirección General de Aguas (Resolución CORFO, No 328, 2020).

3.2 Objetivos específicos

Dentro de los objetivos específicos de este proyecto se pueden encontrar:

1. Realizar un diagnóstico de la cuenca de Salar de Atacama, mediante la revisión de estudios ya realizados de carácter público, respecto de la gestión del recurso hídrico, que apunte hacia conocer el estado actual en la cuenca de Salar de Atacama, respecto de la oferta, demanda, balance de agua, extracciones, calidad fisicoquímica de las aguas superficiales y subterráneas, red de monitoreo e hidrometría, entre otros.
2. Construir un modelo de simulación hidrológica, que represente proyecciones de consumo hídrico, de acuerdo con la demanda de actores sectorizados, considerando además proyecciones de cambio climático, económicas y demográficas.
3. Elaborar un modelo hídrico integrado de agua superficial-subterráneo, considerando el acople con un modelo hidrogeológico numérico desarrollado para CORFO el año 2021, y que tenga la capacidad de incorporar las proyecciones de cambio climático y de cambios potenciales en las demandas de consumo hídrico y explotación de salmueras.
4. Diseñar los procesos participativos para el desarrollo de una visión conjunta de gestión del recurso hídrico en la Cuenca de Atacama, en el corto, mediano, y largo plazo.
5. Desarrollar un modelo de agentes que represente un escenario de gobernanza de la institucionalidad ambiental, reflejando el consumo de agua fresca y salmuera en forma dinámica.
6. Integración de los modelos físicos y de agentes en un prototipo de modelo de gestión hídrico integrado para la toma de decisiones en el largo plazo.
7. Identificar proyecciones de desarrollo económico que puedan intervenir en la gestión del recurso hídrico y proponer estrategias alternativas de gobernanza.
8. Crear las capacidades para generar un portafolio de acciones estratégicas a corto, mediano y largo plazo, en coordinación con otros servicios públicos relacionados a la administración del recurso hídrico.
9. Definir y proponer los estudios necesarios para abordar los desafíos detectados en el diagnóstico inicial.

4 Etapas del proyecto Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama

El proyecto se divide en 3 etapas, las cuales principalmente consisten en levantamiento de información de línea base, diagnóstico, formulación y ejecución y cuyo detalle se indica a continuación.

Etapa I: Levantamiento de información de base
La primera Etapa de este proyecto considera el levantamiento de información de base existente y tiene como objetivo contar con la información respecto la situación actual en la cuenca.

Etapa II: Diagnóstico
Esta Etapa consiste en realizar un diagnóstico de la cuenca en base a la información recopilada, el cual presenta un análisis del consumo de agua dulce y salmuera. Se analiza la situación de la cuenca dentro del marco de la gestión del recurso hídrico y se presentan y caracterizan los eventos meteorológicos, demográficos y de desarrollo económico que sirven para definir las proyecciones futuras.

Etapa III: Formulación y ejecución
La formulación y ejecución del proyecto corresponde a la elaboración y calibración del modelo hidrológico superficial, junto con diseñar una solución integrada de éste con el modelo hidrogeológico y se desarrolla un modelo de agentes. Se entrega el modelo integrado (modelo hidrológico superficial acoplado al modelo hidrogeológico) y las bases para el uso de herramientas de modelación integrada que sirvan para la formulación del diagnóstico del PEGH de la DGA, para la cuenca del Salar de Atacama, incluido el desarrollo de proyecciones futuras de gestión de recursos hídricos y salmuera.

Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama

Etapa I: Levantamiento de información de base

I.1 Resumen ejecutivo

En el contexto de interacciones entre los múltiples actores involucrados en la Cuenca del Salar de Atacama con el medio biótico, y su dependencia con el recurso hídrico de la cuenca, surge la necesidad desarrollar un modelo integrado de gestión hídrica (herramienta de análisis integrado), que permita facilitar y reducir la incertidumbre en la toma de decisiones en la administración del recurso hídrico en la Cuenca del Salar de Atacama. En este contexto se ha formulado el Convenio de Colaboración CORFO–DGA, el que contempla el desarrollo de dicha herramienta, la que debe incorporar aspectos de diversa naturaleza, como biofísicos, económicos, sociales, tecnológicos, administrativos e institucionales, en el marco de una visión de desarrollo para el país y la política de recursos hídricos impulsada por la DGA.

En el marco de este Convenio de Colaboración CORFO-DGA se desarrolla el proyecto **Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama**, como herramienta numérica, de soporte para la administración del recurso hídrico en la Cuenca del Salar de Atacama por parte del organismo competente. Este proyecto se estructura en base a 3 Etapas: Etapa I: Levantamiento de información de base; Etapa II: Diagnóstico y Etapa III: Formulación y ejecución.

La presente Etapa corresponde al levantamiento de información de base para el estudio, en la cual se estudió y analizó información pública disponible hasta diciembre de 2019, de distintos estudios, informes, tesis, bases de datos, libros, páginas web, Estudios de Impacto Ambiental, RCA y Adendas, entre otros. Esta información se sintetizó en una base de datos en formato Google Sheets, con un total de 501 antecedentes y se elaboraron fichas de estos.

Tomando en cuenta la información recopilada se presenta en esta Etapa una descripción detalla de la cuenca del Salar de Atacama incluyendo: su ubicación y características geográficas, delimitación(es) política-administrativas existentes, descripción del medio físico, biótico y humano de la cuenca. Con respecto del medio físico se incluye una caracterización climática, hidrológica, hidrogeológica. Con respecto del medio biótico se incluye una caracterización de los biomas y ecosistemas principales separando formaciones vegetacionales zonales y azonales además de especies de fauna y biota acuática relevantes. Finalmente, respecto del medio humano se incluye una caracterización de aspectos demográficos, de la presencia de pueblos originarios y una descripción de las actividades económicas principales en relación con la gestión de los recursos hídricos (agricultura, turismo y minería). Esta recopilación de información permitió elaborar la línea base del estudio, la cual se resume a continuación.

La cuenca del Salar de Atacama es una cuenca endorreica, con una extensión de 17.020 km^2, ubicada dentro de los límites político-administrativos de la Región de Antofagasta, capital ciudad de Antofagasta, específicamente en la provincia de El Loa, comuna San Pedro de Atacama. La altitud mínima de la cuenca es de aproximadamente 2.300 m.s.n.m.,

mientras que, la máxima es superior a los 6.200 m.s.n.m. Su mayor longitud en sentido norte-sur es de 210 km y en sentido este-oeste de 110 km.

En relación con el medio físico se destaca que el origen de la cuenca es tectónico, y está delimitada por la Cordillera Domeyko por el oeste y la Cordillera de Los Andes al este. Está compuesta por un conjunto de rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias, que constituyen el basamento y un relleno compuesto por sedimentos clásticos y evaporíticos en el núcleo del salar. El núcleo del salar se encuentra cortado por el Sistema de Falla Salar, el cual genera un alzamiento mayor a 400 m del bloque occidental. La geología del Salar de Atacama está conformada principalmente por morfoestructuras de orientación, principalmente, norte-sur. Éstas se disponen, de oeste a este, en: Cordillera Domeyko, Llano de la Paciencia, Cordillera de la Sal, Salar de Atacama, Cordillera Occidental, Cordillera de los Andes (donde se ubica el arco volcánico actual) y el Cordón de Lila al sur. Respecto a la hidrogeología de la cuenca, se definen 6 Unidades Hidrogeológicas que corresponden a UH-1 (depósitos aluviales del borde este, norte y sur del Salar de Atacama, de alta importancia hidrogeológica), UH-2 (evaporitas de halita y yeso en el núcleo del salar, gravas y arenas cerca de Monturaqui), UH-3 (rocas fracturadas de relevancia hidrogeológica), UH-4 (rocas fisuradas y kársticas de menor importancia hidrogeológica), UH-5 (rocas volcánicas y depósitos no consolidados de menor importancia hidrogeológica) y UH-6 (rocas volcánicas, intrusivas, volcano-sedimentarias y sedimentarias, sin recursos de agua subterránea). Se concluye que los acuíferos presentan variabilidad de propiedades hidráulicas como conductividad y almacenamiento, principalmente en la UH-1, mientras que la UH-6 presenta una capacidad de almacenamiento y flujo de agua subterránea reducida. En relación con la hidrología, las precipitaciones en la cuenca del Salar de Atacama son escasas. Los caudales afluentes al núcleo del salar están conformados principalmente por flujos subterráneos. La distribución espacial de las precipitaciones dentro de la cuenca es heterogénea, ya que se incrementan a mayor altitud y según la dirección noreste. En el núcleo del salar la precipitación media es menor a 20 mm/año, mientras que, en las subcuencas aportantes se sobrepasan los 100 mm/año. Se concluye que el régimen de precipitación de la cuenca es seco y presenta la principal recarga del sistema hidrológico subterráneo. Los principales aportes hacia el núcleo del salar se producen desde los extremos, en especial desde el extremo sureste, pues es ahí donde se producen la mayor cantidad de precipitaciones.

Con relación al medio biótico de la cuenca del Salar de Atacama, se realiza una caracterización de su bioma, compuesto de la flora y fauna que comparten características comunes, y se describen los ecosistemas presentes en la cuenca. En su mayoría, la biota presente en el salar se caracteriza por vivir en condiciones extremas de humedad y salinidad. Los ecosistemas descritos se componen por formaciones vegetales zonales y azonales, fauna y biota acuática. Respecto a las formaciones vegetales de la cuenca, éstas se conforman principalmente por estepa y matorral desértico de baja cobertura, mientras que los cultivos ocupan una menor proporción respecto a las primeras. En cuanto a la fauna presente en la cuenca, se identifican tanto especies endémicas como nativas no endémicas, las cuales se desagregan en anfibios, reptiles, aves y mamíferos. En relación con la biota acuática, ésta corresponde en su mayoría a invertebrados y microorganismos que componen el fitoplancton, zooplancton, zoobentos y tapetes microbianos. Estas

últimas formaciones se componen de microorganismos extremófilos, los cuales destacan por su importancia ecosistémica para captar CO_2. A estos grupos se agregan además comunidades vegetales acuáticas de macrófitas.

La posibilidad del desarrollo de esta vida vegetal y animal se encuentra estrechamente relacionada a la presencia de agua en el lugar, la cual a su vez está determinada por las lluvias estivales en la alta cordillera y el paso del flujo subterráneo hacia sectores de lagunas. En efecto, la presencia y distribución de vegetación en la cuenca está directamente determinada por la disponibilidad de agua asociada a lluvias o a cuerpos de aguas locales que a su vez se pueden nutrir de afloramiento de aguas subterráneas; y la presencia de fauna está, en gran medida, asociada a esta vegetación. Se concluye que la cuenca del Salar de Atacama alberga una diversidad de ecosistemas, los cuales dependen de los recursos hídricos de la cuenca.

Con respecto al medio humano, la cuenca del Salar de Atacama se ubica en la comuna de San Pedro de Atacama que ha experimentado un explosivo crecimiento demográfico del 121% en el último período censal, alcanzando un total de 10.996 habitantes al 2017. Dicha población se distribuye de forma equilibrada entre el sector urbano (50,2%), que reside en el pueblo de San Pedro de Atacama y otros poblados cercanos, y la población rural (49,8%). Esta última se organiza en su mayoría en localidades autónomas denominadas Ayllus, que pertenecen al pueblo Atacameño. En concreto, 21 comunidades indígenas se encuentran registradas en CONADI dentro del territorio comunal. De éstas, 18 se organizan además bajo el alero del Consejo de Pueblos Atacameños (CPA), asociación indígena cuyo principal objetivo consiste en proteger y promover el etnodesarrollo, y preservar la cultura Atacameña, velando por el fortalecimiento del espíritu de comunidad y solidaridad entre sus miembros. La cosmovisión del pueblo Atacameño residente en esta cuenca se expresa en una profunda y recíproca relación entre el hombre y la naturaleza. Siendo la principal deidad la "Pachamama" o madre tierra, diversos espíritus habitan también cada manifestación natural como ríos y cerros.

En cuanto a la actividad económica, la principal actividad de la Región de Antofagasta es la minería, la cual representa en promedio el 53% (período 2013-2017) de su economía, lo que se refuerza considerando que cerca del 45% del PIB minero del país se genera en esta región. Misma tendencia regional se manifiesta en la cuenca del Salar de Atacama, en la cual se ubican las operaciones de las empresas Albemarle y SQM para el procesamiento de salmuera que permite la obtención de productos como los compuestos de litio (carbonato de litio, hidróxido de litio y cloruro de litio), potasio (cloruro de potasio y sulfato de potasio), y boro (ácido bórico). La significativa presencia de comunidades indígenas centra su actividad económica en la actividad agrícola-ganadera y turística. La primera, juega un papel secundario en el desarrollo económico de la cuenca, debido principalmente a la salinidad de los suelos y la aridez característica de la zona, aunque es una actividad de subsistencia y una forma de vida para las comunidades Atacameñas. Los principales cultivos corresponden a plantas forrajeras, mientras que la actividad ganadera consiste principalmente en ganadería bovina. Por el contrario, la actividad turística juega un rol fundamental en la economía local, lo cual se evidencia en el reconocimiento de la Zona de Interés Turístico declarada sobre el área de *San Pedro de Atacama – Cuenca*

Geotérmica el Tatio, la cual reconoce que esta zona es uno de los principales productos turísticos que posee la oferta de turismo en Chile, y se sustenta además en la diversidad de atractivos turísticos locales (ej., el Salar de Atacama, la Reserva nacional Los Flamencos, lagunas, vegas y bofedales), y su gran valor arqueológico, arquitectónico, cultural, ecológico, natural, geográfico y paisajístico.

Se incluye también una descripción de los componentes claves para la gestión de los recursos hídricos tomando en cuenta el rol de actores claves y herramientas e instrumentos para la gestión. Con respecto a los actores involucrados en la gestión del recurso hídrico en la cuenca del Salar de Atacama, estos pueden clasificarse a nivel público, privado y pertenecientes a la sociedad civil. En cada estrato, se identifica un amplio rango de actores que forma parte del proceso regulatorio. A nivel público, por ejemplo, se identifican una serie de instituciones nacionales, regionales y organismos locales (ej., Municipalidad de San Pedro de Atacama). A un nivel privado, se caracterizan una serie de empresas usuarias del recurso hídrico a partir del catastro de derechos de aprovechamiento de aguas, que principalmente tienen foco en la minería. Además, no se encuentran organizaciones de usuarios de aguas organizadas dentro de los límites de la cuenca. Por último, a nivel de la sociedad civil se identifican 5 localizaciones en donde se enclavan sistemas de Agua Potable Rural (Toconao, Socaire, San Pedro de Atacama, Río Grande y Peine), entre los que destacan por sus niveles de producción y suministro de agua potable, el "Comité de Agua Potable Rural de San Pedro de Atacama" (CAPRA) y el "Comité de Agua Potable de Toconao". Se suman en este último grupo de actores las comunidades indígenas Atacameñas y sus organizaciones (ej. el Consejo de Pueblos Atacameños), Universidades (ej. Universidad de Antofagasta), centros de investigación, fundaciones y ONGs, todos los cuales participan de las diversas instancias de gestión locales.

Con respecto a los instrumentos y herramientas de planificación y gestión, se consideran las distintas opciones que tiene el Estado para gestionar de manera directa e indirecta los recursos hídricos. Estas se clasifican según su foco de acción en: (1) planificación del territorio, (2) planificación de los recursos hídricos (incluida infraestructura asociada), (3) gestión del aprovechamiento de los recursos hídricos, (4) gestión de áreas naturales, (5) gestión de territorios indígenas y (6) gestión de otros recursos de asociados a actividades productivas (ej. minería no metálica, agricultura, energía).

En el **primer punto**, sobre planificación del territorio, los lineamientos de planificación para el territorio regional provienen de la Estrategia Regional de Desarrollo 2009-2020 para la región de Antofagasta, la cual propone un conjunto de Lineamientos Estratégicos, Objetivos Generales y Líneas de Acción sobre temáticas de relevancia como el Desarrollo Territorial, Económico, Social, Medio Ambiental, y en Salud. Bajo el alero de este instrumento se desarrolla el Plan de Desarrollo Comunal de San Pedro de Atacama (2015 – 2020), el cual orienta el accionar municipal, integrando las miradas sectoriales para el desarrollo de la comuna. Este instrumento, al ser una síntesis transversal de las actividades que ocurren en la cuenca, y en armonía con la mirada regional, tiene el potencial de situarse como un catalizador de los esfuerzos de un plan integrado de gestión hídrica, lo cual cobra mayor importancia al reconocer que el recurso hídrico es la piedra angular para el desarrollo de la comuna y sus habitantes. Con respecto al **segundo punto**, sobre planificación de los

recursos hídricos, se destaca la realización de diagnósticos y planes de gestión integrada de recursos hídricos de la cuenca. Estos son antecedentes relevantes para el diseño de un Plan Estratégico de Recursos Hídricos para la cuenca. Respecto del **tercer punto,** de gestión del aprovechamiento de los recursos hídricos, se describen una serie de herramientas de gestión respecto del otorgamiento y ejercicio de derechos de agua y su aplicación en casos específicos para la cuenca del Salar de Atacama. En el **cuarto punto,** respecto de la gestión de áreas naturales se presenta información que describe los instrumentos y herramientas de gestión de áreas naturales (no incluidas en el punto anterior). En particular se detallan aspectos de aquellos instrumentos que garantizan la protección de los ecosistemas presentes en el Salar de Atacama tomando las diversas clasificaciones de áreas protegidas contempladas en la institucionalidad en Chile. En el **quinto punto**, relativo a la gestión de territorios indígenas destaca la declaración como Área de Desarrollo Indígena al área de Atacama la Grande, fundada sobre un territorio de 23.400 km^2, con una población total Atacameña de 2.500 personas, y agrupando un total de 17 comunidades indígenas. Este espacio territorial permite al Estado focalizar su acción en beneficio del desarrollo armónico de los indígenas y sus comunidades. En cuanto al **sexto y último punto**, de gestión de otros recursos de asociados a actividades productivas, todas las actividades económicas que se desarrollan en esta región están reguladas o tienen incentivos en base a leyes y decretos. Por ejemplo, los recursos minerales, los recursos energéticos (Ley de Fomento a las Energías Renovables no Convencionales), la actividad agrícola (Ley de Fomento al Riego) y la actividad turística (Zona de interés Turístico San Pedro de Atacama – Cuenca Geotérmica el Tatio). Todas estas regulaciones impactan directa o indirectamente en los recursos hídricos disponibles, y por ello deben considerarse como parte integral de un plan de gestión, de modo de lograr un uso eficiente y adecuado de los recursos naturales del país.

La gestión de los recursos hídricos requiere de un adecuado monitoreo del estado de las variables críticas que componen dicho sistema. Complementando la información entregada respecto de instrumentos y herramientas para la gestión de recursos hídricos, se describen también en esta Etapa, de manera básica, las características de los sistemas de monitoreo existentes en la cuenca del Salar de Atacama siguiendo la estructura en la cual se presentó la descripción de la cuenca, es decir, considerando el medio físico, biótico y humano.

Respecto del medio físico se puede destacar que la cuenca posee 12 estaciones con registros de fluviometría medidos por la Dirección General de Aguas (DGA), 12 estaciones con registros meteorológicos (temperaturas extremas, precipitación, viento y humedad relativa) medidos por la DGA, la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Tres estaciones han medido niveles piezométricos de pozos de observación de la DGA y 7 estaciones poseen mediciones de calidad del agua de distintos parámetros hidrogeoquímicos, dentro de los cuales destacan la conductividad eléctrica, concentración de cloruros e isótopos. Estas estaciones operadas por servicios públicos se complementan con estaciones de pluviometría y nivel de pozos de propiedad de empresas mineras (SQM Salar S.A. y Rockwood/Albemarle). Respecto del medio biótico también existen sistemas de monitoreo de áreas de protección oficial bajo tutela del Estado como es el caso de la Reserva Nacional Los Flamencos y el Sistema Hidrológico de Soncor.

A este sistema de monitoreo se agrega el monitoreo de especies de flora y fauna realizado por las mismas dos empresas mineras. Finalmente se pueden identificar sistemas de monitoreo desarrollados por distintas agencias del sector público respecto del medio humano incluyendo tanto aspectos demográficos como de actividades económicas.

De manera adicional a la descripción de la cuenca en todos estos aspectos, se desarrolló un capítulo que describe y establece desafíos respecto a la modelación hidrológica, hidrogeológica y ecológica existente en la cuenca del Salar de Atacama. Se presentó una descripción de los antecedentes respecto a los estudios de modelación hidrológica e hidrogeológica de la cuenca, la cual incluye la existencia de modelación hidrológica superficial, además de modelación hidrogeológica. Se evalúa la integración de estos sistemas tanto a nivel conceptual como mediante simulaciones numéricas. Se especifican las bases de datos y los modelos respectivos que fueron utilizados en estas referencias. Por otro lado, se presentan las referencias asociadas a estudios de modelación ecológica de la cuenca y se evalúa el grado de integración entre este sistema con los modelos hidrológicos mencionados anteriormente. Finalmente, se identificaron los desafíos que existen actualmente respecto al desarrollo de la modelación mencionada anteriormente. En específico, respecto a la modelación hidrológica superficial, se cuenta principalmente con modelos conceptuales de precipitación y escorrentía para establecer un balance hídrico general a escala de cuenca. Con respecto a experiencias con modelos numéricos, destacan el desarrollado por GCF Ingenieros (2018) (análogo al modelo hidrológico SWAT) y el modelo Variable Infiltration Capacity (Liang et al., 2001) desarrollado en la Actualización del Balance Hídrico de Chile (DGA, 2018). Respecto de la modelación numérica hidrogeológica, se cuenta con más de 16 modelos subterráneos desarrollados en MODFLOW y FEFLOW. Por otro lado, se puede concluir que la mayoría de los estudios existentes de modelación ecológica que comprenden completamente la cuenca del Salar de Atacama son de carácter conceptual, entre los cuales destaca el de Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK (2017b). Se concluye respecto a modelación ecosistémica que se cuenta tanto con estudios conceptuales, los cuales presentan una visión general y completa de la cuenca, como modelos ecosistémicos específicos, los cuales buscan entender el comportamiento de ecosistemas tanto a escala de cuenca como a escala local.

A partir de la recopilación de antecedentes presentada en esta Etapa se concluye que existe una base importante sobre la cual poder desarrollar un diagnóstico sobre la gestión de recursos hídricos y salmueras en la cuenca del Salar de Atacama que se lleva a cabo en la Etapa II del proyecto. Sin perjuicio de lo anterior, el levantamiento de información debe ser complementado en el desarrollo del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de la cuenca especialmente a través de un trabajo participativo que no forma parte de los alcances de este proyecto y el cual debe ser liderado por el órgano del Estado competente en la gestión y administración del recurso hídrico, la DGA.

Por otra parte, respecto de los modelos existentes se reconoce que son una base importante para el desarrollo de la herramienta que se debe desarrollar como parte de la Etapa III de este proyecto. Sin embargo, para lograr el desarrollo de esta herramienta se deben superar los desafíos en términos de modelación de hidrología superficial y ecológica,

así como también la inclusión de la modelación explícita de toma de decisiones, acciones e intervenciones de los distintos actores relevantes en la cuenca. Y finalmente se deben superar los desafíos asociados fundamentalmente la integración de estos distintos modelos.

I.2 Introducción

En esta Etapa se entregan los resultados de primera etapa del proyecto, estableciendo el marco bibliográfico para la gestión del recurso hídrico en la cuenca, incluyendo la descripción de la cuenca y de las experiencias previas de modelación superficial y subterránea de los recursos hídricos en la cuenca. En detalle la Etapa I considera:

- Revisión de antecedentes, estudios, planes, programas o políticas reguladores de desarrollo económico, y otros documentos como estudios descriptivos de la cuenca que se hayan realizado.
- Diagnósticos de usuarios, otros planes de gestión hídrica de otros autores, diagnósticos técnicos del recurso hídrico y biótico, análisis de datos de carácter descriptivo del recurso hídrico o, su oferta y demanda, entre otros.

Desarrollando estos puntos esta etapa consta de cuatro secciones después de esta introducción. Una primera sección da cuenta del proceso de recopilación de antecedentes, una segunda sección entrega la descripción de la cuenca, la tercera sección entrega los antecedentes referentes a modelación hidrológica, hidrogeológica y ecológica, mientras que la sección final entrega unas primeras conclusiones.

Esta primera etapa de revisión de antecedentes permite recopilar, organizar y ordenar la información disponible que se utilizará en las etapas posteriores del estudio y como resultado se obtiene una base de datos que contiene estudios, repositorio de datos climáticos e información SIG. Esta base de datos será analizada en la Etapa II para elaborar el diagnóstico para el desarrollo posterior de la herramienta de modelación integrada de los recursos hídricos de la cuenca del Salar de Atacama.

I.3 Revisión de antecedentes

I.3.1 Introducción

La metodología empleada para realizar la recopilación, revisión, análisis y resumen de la información se describe en el presente capítulo. La información que se registra corresponde a toda aquella disponible de manera pública hasta diciembre de 2019 y que tiene relación de manera directa e indirecta con la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Salar de Atacama. Esta información debe ser complementada en próximas etapas del proyecto y complementada también con actividades propias del desarrollo posterior de un Plan Estratégico para la gestión de recursos hídricos de la cuenca del Salar de Atacama, en el marco de las acciones de competencia de la DGA.

I.3.2 Recopilación, revisión y análisis de antecedentes

Los antecedentes recopilados se obtuvieron de distintas fuentes, dentro de las cuales destacan organismos públicos, estudios de EIA, mapas, bases de datos, estudios de ingeniería, artículos de investigación, noticias, tesis, páginas web.

Parte de esta etapa se encuentra realizada en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), la cual aborda y se enfoca principalmente en los aspectos hidrogeológicos, meteorológicos, hidrológicos, geofísicos, geológicos, geomorfológicos y variables hidrogeoquímicos.

Dado el alcance integrado de gestión de recursos hídricos y la necesidad de interacción con los agentes de la cuenca en estudio, se debieron incorporar nuevos antecedentes para la revisión bibliográfica, los cuales incorporan antecedentes para el desarrollo de la hidrología superficial, modelo hidrogeológico, estudio ecosistémico y modelo agente.

La información recopilada se clasificó en categorías según tipo de información relevante. Dichas categorías se describen a continuación:

1. **Hidrogeología/caracterización hidrogeológica/criterios de definición de acuíferos/sustentabilidad de acuíferos**: antecedentes de transmisividad, coeficiente de almacenamiento, radios de influencia, permeabilidad y/o unidades hidrogeológicas. Documentos relacionados con direcciones de flujo, recarga, descarga, isopiezas, geometría de los acuíferos y/o unidades hidrogeológicas, entre otros. Además, documentos de extracciones de agua subterránea, derechos de agua, explotación minera de aguas subterráneas, definición de acuíferos y disponibilidad hídrica.

2. **Meteorología:** estudios climatológicos que contienen el análisis de variables meteorológicas como viento, precipitación, temperatura, radiación solar, insolación, presión atmosférica, evaporación, sublimación y/o humedad. Bases de datos de variables hidrometeorológicas utilizadas en modelos superficiales y subterráneos.

3. **Hidrología**: estudios que contienen el análisis integrado de las componentes que intervienen en el balance hidrometeorológico; es decir, contempla la interacción de las variables atmosféricas (precipitación, evaporación, evapotranspiración), con los flujos superficiales (aforos en ríos), datos de la altura de la lámina de agua en lagos, embalses y/o lagunas, entre otros. Por lo tanto, en esta área temática se incluyen estudios que determinan valores de infiltración o recarga.

4. **Geofísica:** documentos que incluyen el análisis de datos y perfiles geofísicos obtenidos por diferentes métodos (TEM, NanoTEM, tomografía eléctrica, gravimetría, sísmica, entre otros).

5. **Geología/geomorfología**: información geológica regional y local presentada en las cartas geológicas, artículos de investigación, informes, antecedentes relacionados con la descripción del relieve de la cuenca.

6. **Hidrogeoquímica/calidad del agua/isótopos**: incluye estudios que contengan un análisis de componentes mayoritarios y/o minoritarios del agua subterránea y superficial de las diferentes cuencas y también, estudios de investigación relacionados con el origen de las aguas y mezcla e interacción agua-roca, además de características isotópicas de las aguas subterráneas y superficiales.

7. **Balance hídrico**: documentos que caracterizan y determinan las entradas y salidas de aguas de los sistemas acuífero.

8. **Modelo numérico**: archivos e informes de modelización numérica realizados en la cuenca o en zonas específicas de ésta.

9. **Demografía:** cantidad de habitantes de la cuenca del Salar de Atacama, incluye asentamientos, características sociales de la cuenca, consumo de agua por habitante, distribución espacial de poblados en la cuenca.

10. **Agricultura:** estudios relacionados con recursos hídricos para riego, proyectos de planes de riego, infraestructura hidráulica, coberturas agrícolas, tipos de cultivo, usuarios de agua y proyecciones de riego, uso de suelo y vegetación.

11. **Comunidades indígenas**: comunidades presentes en la cuenca del Salar de Atacama de pueblos originarios, su ubicación y distribución, relación étnico-ambiental y étnico-económica y gestión de recursos hídricos en las comunidades.

12. **Ecología y ecosistemas en salar**: estudios que contengan información de modelación ecológica existente, inventarios y distribución de cuerpos de agua que almacenan ecosistemas como humedales, bofedales y/o ecosistemas de interés ambiental. Estudios de especies vegetales, áreas protegidas, relaciones del ecosistema y el humano, ecosistemas terrestres y conservación, determinación del caudal ecológico, estrategias regionales de biodiversidad, especies de flamencos, descripción etnobotánica y microbiológica del salar.

13. **Minería no metálica con énfasis en extracción de litio:** estudios que contengan capacidades y cuotas de producción de litio, extracciones de salmuera, desarrollo minero, minería de litio, artículos sobre sustentabilidad en minería, producción de sulfato y potasio.

14. **Agua para minería fuera de la cuenca**: estudios de uso y proyección de consumo de agua en la minería del cobre.

15. **Uso actual y proyectado del recurso subterráneo**: estudios de disponibilidad hídrica futura, balance predictivo de aguas subterráneas, proyecciones de demanda futura, proyecciones de disponibilidad hídrica considerando cambio climático.

16. **Instrumentos de Planificación Territorial (ITP):** incluye planes reguladores y políticas de desarrollo urbano, comunal y regional.

17. **Otros aspectos normativos (zonas de protección, de prohibición, especies, características concesión)**: bases de datos SIG y estudios sobre sitios de protección, sitios RAMSAR, zonas de prohibición, acuíferos y áreas silvestres protegidas. Sitios arqueológicos y reservas nacionales.

18. **Estrategias de monitoreo y gestión hídrica a largo plazo**: estudios referentes a planes de monitoreo ambiental, planes estratégicos para la gestión de recursos hídricos, diagnósticos de riego y drenaje y políticas ambientales.

19. **Economía**: antecedentes relacionados a la actividad minera, planes de desarrollo regional, planes de infraestructura de la región, estadísticas de economía, comercio, importaciones y exportaciones.

20. **Turismo**: documentos que contengan planes de acción en sector turismo, zonas de interés turístico, recursos hídricos del sector turístico, planes regionales y tasas de aumento de turismo.

21. **Agua potable y saneamiento**: antecedentes de agua potable rural, derechos de agua, descripción de plantas de plantas de tratamiento de agua potable y residual, puntos de captación de agua potable, cobertura sanitaria, demanda de agua y desarrollo de recursos hídricos.

22. **Derechos de aprovechamiento/mercados de agua**: datos referidos a derechos de agua superficiales y subterráneos registrados, estimación de extracciones, consumo de agua, planes de alerta temprana con condicionamiento de derechos, fuentes hídricas no convencionales.

23. **Monitoreos de fauna, monitoreo de espejos de agua**: coberturas de bofedales, inventario de humedales, bases de datos SIG de mapas vectoriales de áreas silvestres, bases de datos SIG con catastro e inventario de cuerpos de agua.

24. **Cartografía**: bases de datos SIG con coberturas de sistemas vegetacionales altoandinos, uso de suelo, cobertura vegetacional de Chile, coberturas de cuerpos lacustres y recursos hídricos, infraestructura y mapas de cobertura de suelos en formato ráster.

I.3.3 Base de datos de antecedentes

Los antecedentes obtenidos se organizaron en una base de datos, la cual se construyó en formato Google Sheets. El objetivo de la base de datos es facilitar el acceso y la lectura de la información relevante que contiene cada documento revisado.

Para identificar el documento y el registro de éste en la base de datos, se codificaron todos los archivos anteponiendo una letra "A", seguida por un número correlativo A_REF.XXX, donde XXX corresponde al número correlativo. La base de datos queda organizada de la siguiente forma:

A_REF.XXX: referencia de identificación de cada uno de los estudios.

- Tipo de información: información que contiene el documento referente a geología, hidrogeología, meteorología, entre otros.

- Tipo de estudio: clasificación del documento en función de si se trata de un expediente, un mapa, los anexos específicos pertenecientes a un informe, un trabajo de tesis universitaria, si es un archivo correspondiente a una base de datos, un artículo de investigación, un documento presentado para una DIA (Declaración de Impacto Ambiental), una EIA (Evaluación de Impacto Ambiental) o una RCA (Resolución de Calificación de Impacto Ambiental).

- Título: título del proyecto.

- Año: año de publicación del trabajo.

- Elaborado por: indica la entidad (empresa, institución, compañía, consultora) que realizó el estudio.

- Autor(es): personas que realizaron el proyecto o empresa mandante.

- Link de descarga: ruta de internet para encontrar el archivo vía web, en caso de que exista.

- Alcance geográfico: indica el ámbito geográfico que abarca el estudio (nacional, interregional, regional o de cuenca).

- Región: indica la región en donde se emplaza el proyecto del informe consultado.

- Provincia: indica la provincia en donde se ubica la zona de estudio del proyecto.

- Cuenca: indica la cuenca en donde se emplaza la zona de estudio del proyecto.

- Subcuenca: indica la subcuenca en donde se emplaza la zona de estudio del proyecto.

- Otro: esta casilla incluye información en los casos en los que el área del proyecto abarque más de una región o más de una cuenca, etc. De esta forma, se describe tal referencia.

- Observaciones: en esta columna se indica cualquier otra información relevante para el proyecto que no se pudieron incluir en ninguno de los puntos anteriores.

- Objetivo de la información: objetivo del proyecto o del documento.

- Resultados de interés: información de interés que se extrae del documento y es útil para el presente trabajo.

- Nombre del documento: nombre del archivo digital que se consultó.

El detalle de los antecedentes recopilados se encuentra en el Anexo 1 y Anexo Digital 1 de la Etapa I de este proyecto.

I.4 Descripción de la cuenca

I.4.1 Introducción

Este capítulo presenta la descripción de la cuenca del Salar de Atacama en el sentido más amplio posible para sentar las bases de una herramienta integrada de gestión de recursos hídricos de la cuenca del Salar de Atacama. Esta descripción comienza con una presentación básica de la situación geográfica, la cual incluye la división político-administrativa relevante para la cuenca. Luego se describe el medio físico de la cuenca tomando en cuenta de manera especial algunos hitos relevantes como la geológica del Salar de Atacama y los sistemas lacustres que se encuentran en la interfaz entre el acuífero de aguas dulces y el acuífero de aguas salinas. Se mencionan, pero sin mayor descripción, por escapar el foco de este proyecto, obras de infraestructura que complementan este medio físico. Posteriormente, se caracteriza el medio biótico de la cuenca, comenzando por describir su bioma, hasta un nivel desagregado de biota acuática y terrestre. La descripción del medio humano de la cuenca contempla su dimensión demográfica, pueblos originarios y principales actividades económicas economía. Finalmente se describen elementos críticos asociados a la gestión de recursos hídricos de la cuenca incluyendo actores relevantes e instrumentos y herramientas de gestión de estos recursos y recursos complementarios. Complementando la descripción de estas herramientas se incluye una revisión básica de los sistemas de monitoreo de los distintos medios (físico, biótico y humano) relevantes para la gestión de recursos hídricos.

El análisis de la dinámica de estos sistemas, junto con los consumos de agua y salmuera actuales y proyecciones futuras de cada sector son tratados en la Etapa II del proyecto de diagnóstico de la información recopilada.

I.4.2 Situación geográfica

Esta sección presenta la situación geográfica de la cuenca del Salar de Atacama, indicando tanto su ubicación como su delimitación político-administrativa.

La cuenca del Salar de Atacama corresponde a una cuenca endorreica, con una extensión de 17.020 km^2 según delimitación que el Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH) encargó al Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN 2014) y 15.576 según la delimitación más antigua (DGA 1978b) realizada por el Banco Nacional de Aguas (BNA) (DGA 1978a) de la Dirección General de Aguas. La cuenca se extiende desde la latitud 22°20' hasta la latitud 24°10' sur y presenta una morfología elipsoidal, cuyo eje mayor de orientación N-S tiene una longitud cercana a 250 Km. La altitud mínima de la cuenca es de aproximadamente 2.300 m.s.n.m., mientras que, la máxima es superior a los 6.200 m.s.n.m. Su mayor longitud en sentido norte-sur es de 210 km y en sentido este-oeste de 110 km.

La cuenca se ubica dentro de los límites político-administrativos de la Región de Antofagasta, capital Antofagasta, dentro de la provincia de El Loa y la de Antofagasta. Esta división se muestra en la *Figura I-1*.

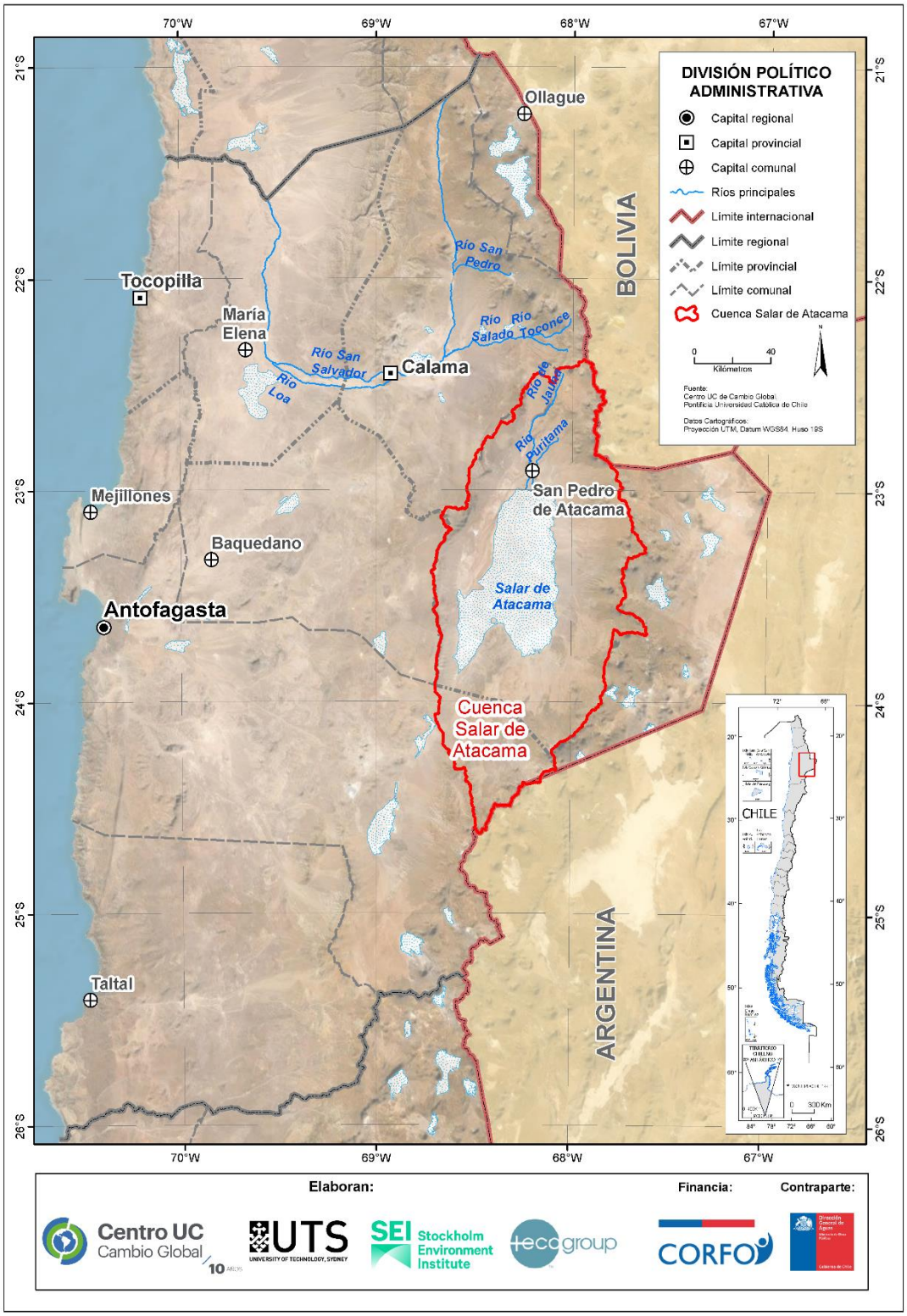


Figura I-1: División político-administrativa de la región de Antofagasta.
Fuente: Elaboración propia a partir de límites político-administrativos de la Biblioteca del Congreso Nacional y delimitación de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

I.4.3 Descripción del medio físico de la cuenca

Esta sección describe el medio físico de la cuenca del Salar de Atacama, abarcando tanto el clima de la cuenca, como hidrología, geología e hidrogeología, entre otros.

I.4.3.1 Caracterización climática

El clima de la cuenca se caracteriza por ser de carácter desértico y árido frío (BWk) (Köeppen (1936)), cuya clasificación es aplicada a sectores con temperatura media anual inferior a los 18°C y precipitaciones medias anuales inferiores a 200 o 250 mm aproximadamente. Esta categoría agrupa diferentes tipos de clima como el árido templado, de montaña, el continental, e incluso el árido alpino y el de tundra seca. En cuanto a precipitaciones, el clima de la cuenca presenta extensos períodos sin lluvia, interrumpidos por eventos de precipitaciones estivales, las cuales oscilan entre 0 - 200 mm al año. La temperatura media anual varía en torno a los 15,5 °C, con un promedio máximo de 28,0 °C y una mínima promedio de 5,0 °C, implicando una alta oscilación térmica durante el día.

I.4.3.2 Caracterización hidrológica

En esta sección se describe la caracterización hidrológica del área de estudio, la cual incluye la hidrografía y morfología de la cuenca del Salar de Atacama.

Las precipitaciones en la cuenca del Salar de Atacama son muy escasas. Los caudales afluentes al núcleo del salar están conformados principalmente por flujos subterráneos debido a que las unidades más superficiales y la zona de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo se comportan como un acuífero libre. Los escurrimientos superficiales que logran llegar hasta el núcleo son menores. La distribución espacial de las precipitaciones dentro de la cuenca es heterogénea, ya que se incrementan a mayor altitud y según la dirección noreste. En el núcleo del salar la precipitación media es menor a 20 mm/año, mientras que, en las subcuencas aportantes se sobrepasan los 100 mm/año. Los principales aportes hacia el salar se producen desde los extremos, principalmente desde el extremo sureste, pues es ahí donde se producen la mayor cantidad de precipitaciones.

I.4.3.2.1 Caracterización hidrográfica

Al conformar una cuenca endorreica, las principales salidas del sistema hidrológico del Salar de Atacama se producen por evaporación, en su mayor parte de la zona este del salar y por evapotranspiración de las especies vegetales presentes en la cuenca del salar.

Los ríos principales de la red hidrográfica de la cuenca que presentan escurrimiento permanente, y cuya ubicación se ilustra en la *Figura I-2* corresponden a:

1. Río Putana
2. Río San Pedro

3. Río Salado
4. Río Puritama
5. Río Tulán
6. Quebrada Honar – Toconao

Los Ríos San Pedro y Tulán, en particular, desembocan en el Salar de Atacama. En la *Figura I-2* se presenta la red hidrográfica de la cuenca del Salar de Atacama, incluyendo los ríos principales y cuerpos de agua del salar. Los principales ríos afluentes al Salar de Atacama de esta lista corresponden al Río San Pedro y Vilama, que desembocan en la zona norte del salar. Además, numerosas quebradas de carácter semi permanente desembocan en el Salar de Atacama tanto en su parte este como oeste en forma de conos aluviales, los cuales infiltran rápidamente en las zonas de mayor permeabilidad.

La cuenca del Salar de Atacama posee un número reducido de cauces con escurrimiento permanente y la mayoría de sus quebradas aportantes presentan un régimen de caudales esporádico. Esto se debe a que la parte baja de la cuenca no presenta precipitaciones regulares y las quebradas sólo presentan un flujo apreciable luego de que ocurren precipitaciones importantes. Además de los ríos principales ya mencionados, las quebradas que poseen escurrimiento permanente, conforme a los registros de la Red hidrométrica la DGA BNASIGIRH, corresponden a la quebrada de Zapar, Hamar, Potor, Aguas Blancas, Camar, Socaire, Peine, Talabre, Jerez y Tarjne. Las quebradas del margen este presentan una orientación preferente de este a oeste, mientras que las del margen oeste escurren en dirección contraria. Ninguna de las quebradas del margen oeste presenta escurrimiento permanente.

La cuenca Salar de Atacama se divide en una serie de subcuencas cuya delimitación oficial (DGA SIGIRH, 2020) se presenta en la *Figura I-3*. Adicionalmente, existen estudios en la cuenca que presentan su propia delimitación, como Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), Rockwood-SGA (2015) y DGA-GCF Ingenieros (2010).

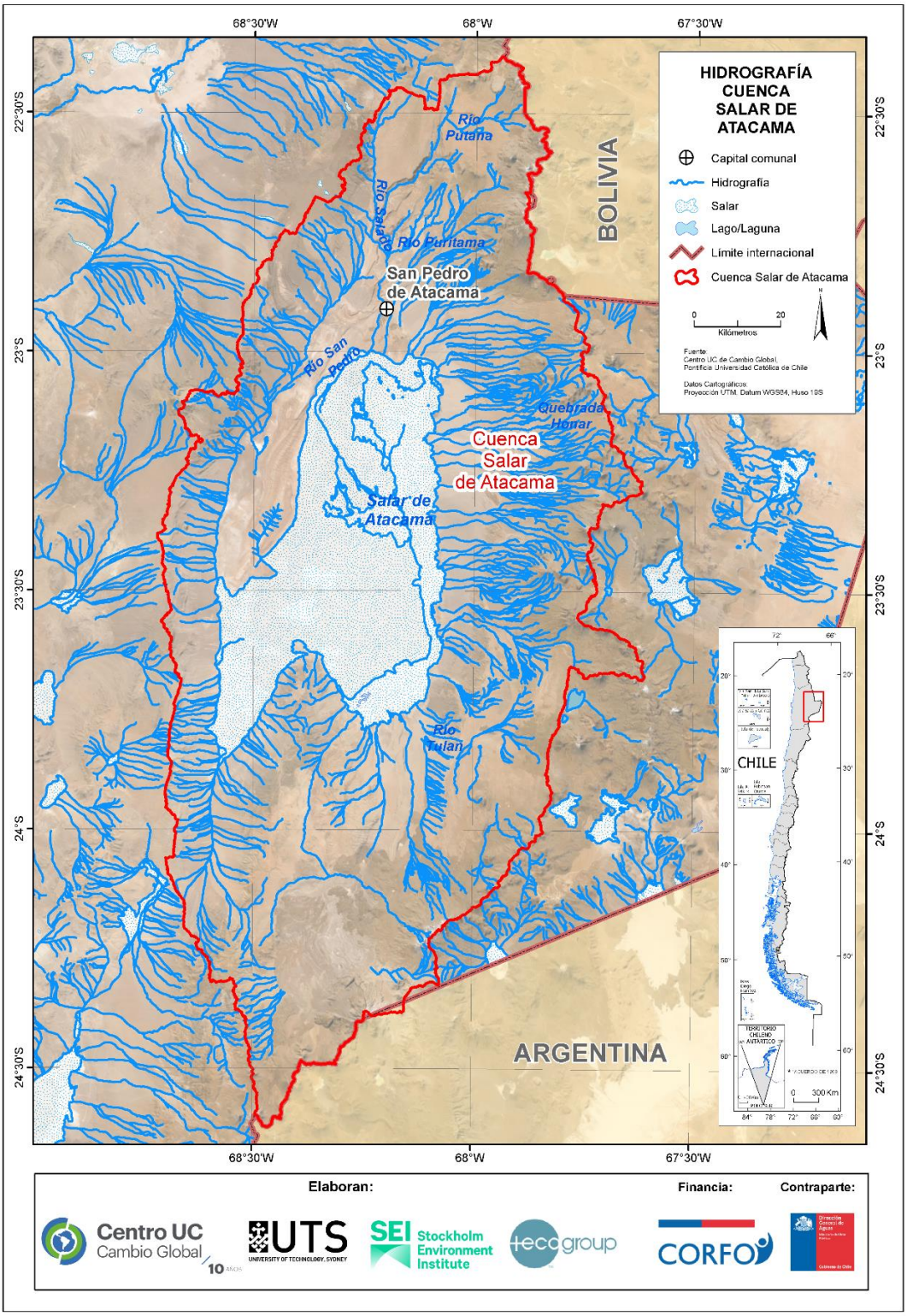


Figura I-2: Hidrografía de la cuenca del Salar de Atacama, mencionando ríos y quebradas principales.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

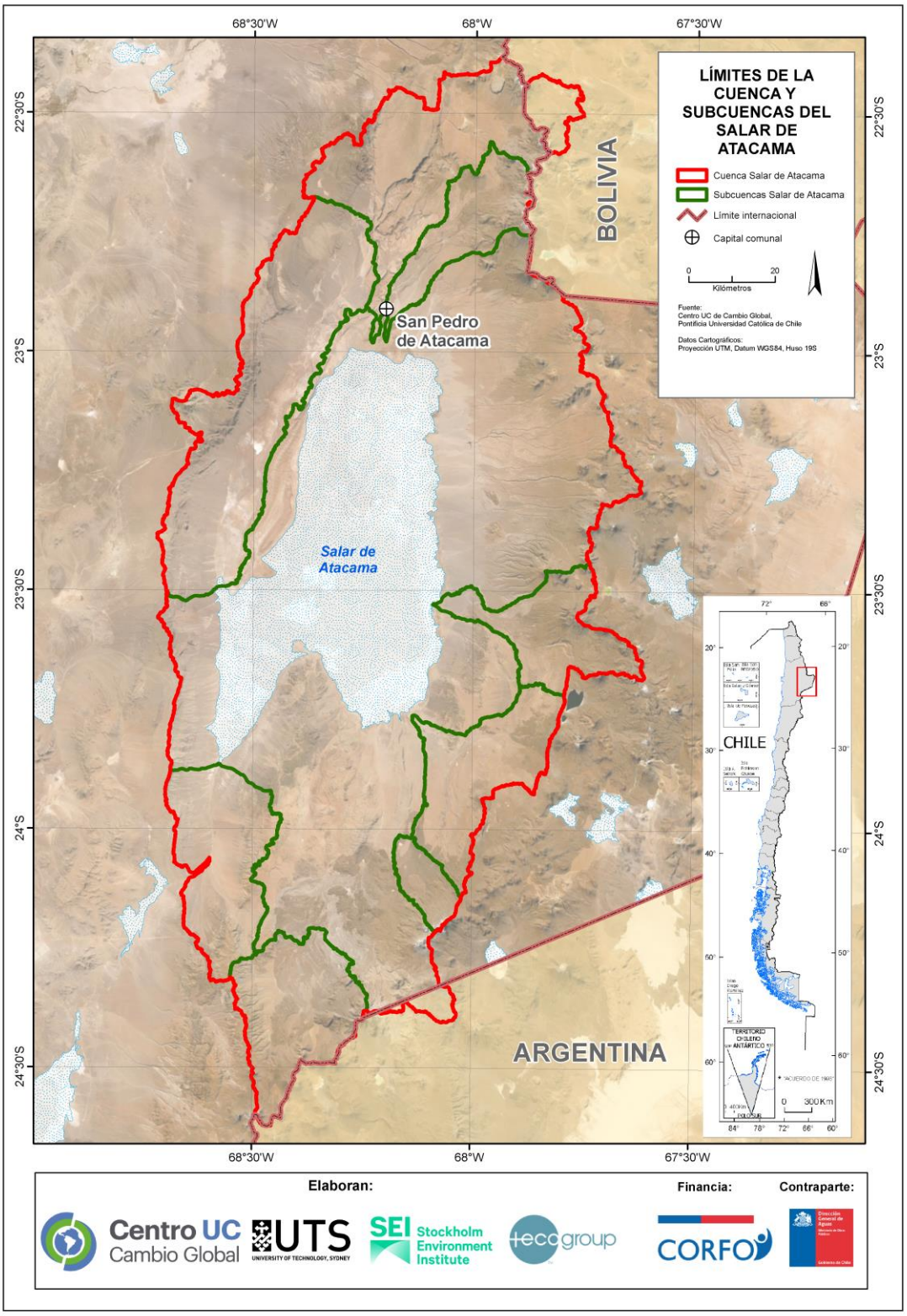


Figura I-3: Límites de la cuenca y subcuencas definidos por la delimitación oficial del DARH.

Fuente: Elaboración propia a partir de DGA (2019).

I.4.3.2.2 Caracterización morfológica

La caracterización morfológica de la cuenca del Salar de Atacama se divide en 4 zonas principales: Zona Norte, Zona Sur, Zona Oeste y Salar (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018), cuya zona norte presenta una mayor pendiente y altura promedio. Las características geomorfológicas de la cuenca se presentan en la Tabla I-1.

Tabla I-1 Parámetros morfológicos de la cuenca del Salar de Atacama.

Zona	Zona norte	Zona sur	Zona oeste	Zona centro
Atura mínima [m]	2.347	2.290	2.257	2.198
Altura máxima [m]	5.283	5.450	3.713	2.507
Altura promedio [m]	3.451	3.342	2.680	2.323
Pendiente media [%]	18,2	17,5	13,75	9,75

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

I.4.3.3 Caracterización geológica

En este apartado se describen los principales hitos geológicos de la cuenca del Salar de Atacama, los cuales corresponden a geomorfología, geología y geología estructural.

I.4.3.3.1 Marco geomorfológico

La cuenca está delimitada por morfoestructuras de orientación, principalmente, norte-sur. Éstas se disponen, de oeste a este, en el siguiente orden: Cordillera Domeyko, Llano de la Paciencia, Cordillera de la Sal, Salar de Atacama, Cordillera Occidental, Cordillera de los Andes (donde se ubica el arco volcánico actual) y el Cordón de Lila al sur. La descripción y localización de estas formaciones se presenta a continuación:

1. Cordillera Domeyko: cordón montañoso de aproximadamente 3.000 m.s.n.m. de altura, colindante al este con el sistema de fallas denominado El Bordo.

2. Llano de la Paciencia: corresponde a una depresión en forma de valle de una altura aproximada de 2.300 m.s.n.m., la cual tiene forma de elipsoide y se orienta de norte a noreste, mientras que hacia el sur la dirección de su formación corresponde principalmente de norte a sur.

3. Cordillera de la Sal: consiste en un cordón montañoso de estructura anticlinal de forma cóncava, la cual contiene una gran cantidad de pliegues y fallas, originando una formación de aproximadamente 2.500 m.s.n.m.

4. Salar de Atacama: zona de depositación más grande de la cuenca, de forma elíptica y orientación norte a sur. Su composición consiste en depósitos salinos que abarcan una superficie total aproximada de 3.500 km^2. La elevación promedio del Salar de Atacama es de 2.300 m.s.n.m., y contiene un núcleo salino junto con una costra superficial, la cual se originó debido a procesos de evaporación, condensación de evaporitas y cristalización de sales. respecto a estas últimas, el borde este presenta solidificación de sales cálcicas y hacia el centro del salar se observan depositaciones de sales sulfatadas. Las sales del núcleo del salar consisten en salmueras cloruradas sódicas (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018).

5. Cordillera occidental: es un cordón montañoso que rodea el este de la cuenca del Salar de Atacama, con alturas promedio de 3.500 m.s.n.m.

6. Arco volcánico: son formaciones montañosas de mayor altura, cuya elevación promedio corresponde a 4.200 m.s.n.m. y cuyos volcanes de mayor altitud alcanzan los 6.000 m.s.n.m.

7. Cordón de Lira: corresponde a un cordón montañoso que delimita el sur de la cuenca del Salar de Atacama, con una altura promedio de aproximadamente 3.200 m.s.n.m. Esta morfología desciende hasta el Salar de Atacama, presentando una gran cantidad de quebradas. Este cordón se encuentra conformado por rocas intrusivas constituidas durante el período Paleozoico Inferior.

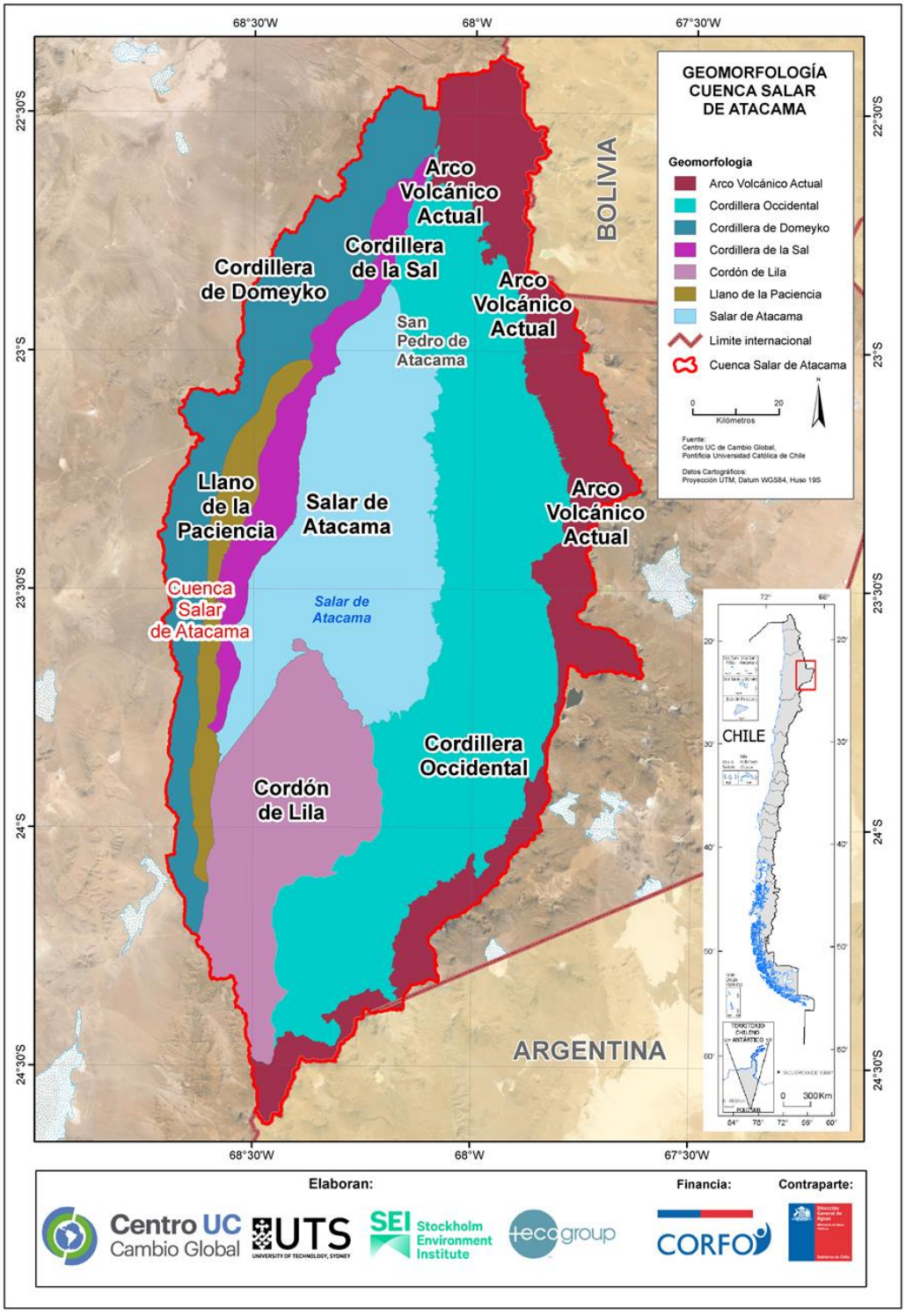


Figura I-4: Geomorfología de la cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

I.4.3.3.2 Marco geológico

Los eventos geológicos que han dado origen a las distintas formaciones de la cuenca del Salar de Atacama desde sus inicios hasta la actualidad se detallan a continuación.

Los materiales más antiguos que afloran en la cuenca del Salar de Atacama se sitúan en el Cordón de Lila y son intrusivos del Paleozoico Inferior. Sobre estos materiales se depositó de manera discordante una secuencia sedimentaria marina somera. Estas formaciones rocosas conforman un prisma de acreción originado desde el Paleozoico hasta el Triásico, en el borde del supercontinente Gondwana, ligado a procesos de subducción (Mpodozis et al., 2000).

El levantamiento y erosión del arco magmático genera secuencias sedimentarias, intercaladas con otras secuencias volcánicas, ambas de gran potencia, las cuales se forman desde finales del Pérmico hasta el Triásico. Durante Triásico Superior se produce la formación de grandes espesores de rocas volcánicas, con intercalaciones de rocas sedimentarias. Luego se generan potentes secuencias sedimentarias de ambiente transicional. Por otro lado, el ciclo tectónico andino que perdura hasta la actualidad se inicia entre el Jurásico Superior y el Cretácico Medio, el cual genera un cambio en la dirección y ángulo de subducción y la aceleración de la cordillera. La orogenia Incaica que da origen a la geomorfología descrita anteriormente se produce en el límite Eoceno-Oligoceno.

Distintos eventos intrusivos producidos durante el Cretácico Superior y el Paleoceno dan origen a fallas inversas y pliegues.

Los procesos erosivos de la cuenca, producidos entre el Oligoceno Superior y el Mioceno Inferior, dieron origen a secuencias continentales de tipo piedemonte y de cuencas salobres. Posteriormente, la erosión de alzamientos en estas secuencias, producidos por fallas inversas, formaron la Cordillera de la Sal y el Llano de la Paciencia. El origen de los depósitos salinos y evaporitas se produjo durante este mismo período, conformando el Salar de Atacama y los sistemas lacustres. Posterior a este período, se producen eventos distensivos que dan origen a las fallas que controlan la distribución de los volcanes en la cuenca. Durante esta última etapa y hasta el Pleistoceno, se depositan materiales piroclásticos intercalados con evaporitas y depósitos salinos.

Finalmente, desde el Mioceno hasta el Holoceno se forman depósitos no consolidados que dan origen a depósitos salinos y costras de sal del salar.

Unidades geológicas

Esta sección presenta una descripción de las unidades geológicas de la cuenca del Salar de Atacama según Comité de Minería No Metálica-Amphos21, (2018), las cuales se explican a continuación:

1. **Depósitos no consolidados**: están conformados por depósitos detríticos en su

mayoría de origen fluvial, los cuales conforman extensos piedemontes (depósitos aterrazados) y llanuras (depósitos aluviales). Las otras clases de depósitos no consolidados presentes tienen un origen volcánico (piroclastos), glacial (morrenas), eólicos (dunas) y lacustres. Estos depósitos se localizan en el borde del Salar de Atacama, en las quebradas y en las áreas deprimidas.

2. **Rocas estratificadas**: la segunda unidad geológica corresponde a las rocas estratificadas de la cuenca Salar de Atacama, las cuales se formaron desde el Devónico hasta el Holoceno, abarcando un periodo superior a los 380 millones de años.

3. **Rocas intrusivas**: esta tercera unidad incluye tanto las rocas plutónicas como subvolcánicas. Las unidades plutónicas se distribuyen casi exclusivamente en la Cordillera Domeyko y en el Cordón de Lila, mientras que las subvolcánicas sólo se reconocen en la Cordillera de los Andes. En la Cordillera Domeyko, los plutones son principalmente de composición granodiorítica y granítica e intruyen a las formaciones mesozoicas; mientras que, en el Cordón de Lila, las rocas intrusivas son de composición granítica, granodiorítica y tonalítica, y subyacen a las formaciones paleozoicas y mesozoicas. Estas rocas a su vez son intruídas por plutones terciarios graníticos, granodioríticos, dioríticos y por pórfidos graníticos. Asociados a estas rocas intrusivos, existen zonas de alteración hidrotermal.

I.4.3.3.3 Geología estructural

Este acápite describe el sistema estructural del Salar de Atacama. El núcleo del salar se encuentra cortado por el Sistema de Falla Salar (SFS), que corresponde a una estructura de carácter inverso y orientación NNW SSE, con buzamiento al oeste, que ha generado un alzamiento de más de 400 m del bloque occidental desde el Paleógeno, y se encuentra activo en el presente.

Durante el período del Eoceno-Oligoceno se desarrolla el sistema de fallas inversas. Este sistema de fallas del salar caracteriza la morfología del basamento del Salar de Atacama y se compone de una falla principal, con una orientación NS a NO-SE.

Desde el Mioceno hasta el Holoceno, se desarrollan depósitos no consolidados que se distribuyen principalmente en la base de las grandes morfoestructuras, depósitos y costras salinas en el Salar de Atacama, la cual determina la configuración actual de la red de drenaje, con excavación de profundas quebradas. En la *Figura I-4* se presenta una distribución geoespacial de estas formaciones, mientras que la distribución del sistema geológico estructural del Salar de Atacama se presenta en la Figura *I-5*.

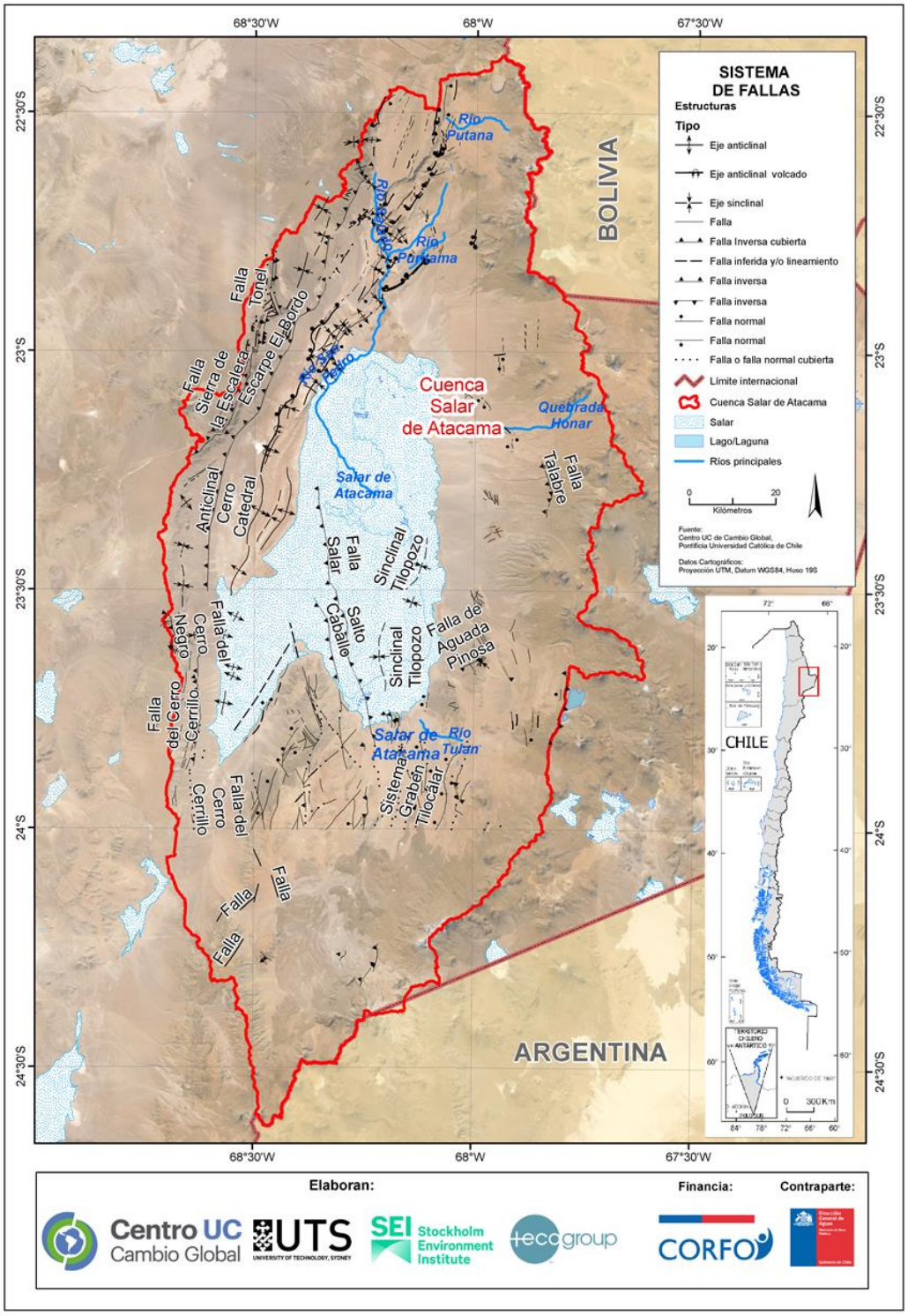


Figura I-5: Sistema de geología estructural de la cuenca del Salar de Atacama elaborado a partir de hojas geológicas.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

I.4.3.3.4 Descripción geológica del Salar de Atacama

En esta sección se describen las características geológicas principales del Salar de Atacama.

El origen de la cuenca del Salar de Atacama es tectónico, en un ambiente compresivo, y está delimitada por la Cordillera Domeyko por el oeste y por la Cordillera de los Andes al este. La cuenca se compone por un conjunto de rocas intrusivas, volcánicas y sedimentarias, originadas durante el Paleozoico Inferior hasta la actualidad. Estas rocas constituyen el basamento hidrogeológico y un relleno sedimentario compuesto por sedimentos clásticos y evaporíticos en el núcleo del salar, que se han acumulado desde el Mioceno Superior hasta la actualidad.

El Salar de Atacama se compone de 2 unidades geológicas principalmente: depósitos salinos e ignimbritas. La primera unidad corresponde a depósitos salinos y evaporitas acumulados durante el periodo Eoceno-Oligoceno, los cuales conformaron el núcleo salino y los sistemas lagunares. Debajo de los depósitos salinos del Salar de Atacama se ubica la segunda unidad, compuesta por un conjunto de ignimbritas o rocas piroclásticas, las cuales están constituidas principalmente por tobas. Estas rocas se formaron debido a la actividad volcánica de la Cordillera Occidental y en el Arco volcánico actual durante el Mioceno, Plioceno y el Pleistoceno.

El Salar de Atacama consiste en una planicie cubierta por capas salinas que dificultan el reconocimiento de estructuras. Se diferencian los siguientes sistemas estructurales:

1. Sistema de Falla Cabeza de Perro: zona sur del salar.
2. Sistema Falla Peine: Falla N-S. inversa.
3. Sistema de Falla Caballo: falla inversa con alto ángulo de vergencia, se observa en el Cordón de Lila y continúa por el Salar de Atacama.
4. Sistema Falla Salar: falla inversa que atraviesa el Salar de Atacama por su centro. Sistema de Falla Tilopozo: falla inversa de dirección NNE-SSW con buzamiento hacia el norte.

I.4.3.4 Caracterización hidrogeológica

En esta sección se describen las características hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama, elaboradas a partir de parámetros hidráulicos, descripción de las unidades hidrogeológicas, la descripción de la interfaz salina, junto con el funcionamiento de los sistemas lagunares.

I.4.3.4.1 Unidades hidrogeológicas y sus parámetros hidráulicos

Respecto al funcionamiento del sistema de acuíferos de la cuenca, se distingue la existencia de un sistema somero y uno profundo, en este sentido, se puede definir la existencia de 6 unidades hidrogeológicas, las cuales se diferencian por su litología,

potencia, conductividad hidráulica y almacenamiento.

Respecto a su hidrogeología, el núcleo del Salar de Atacama está conformado por depósitos salinos evaporíticos, los cuales conforman un acuífero fracturado somero de una potencia de alrededor de 50 m, de permeabilidad media, lo cual corresponde a la UH-2 hacia el oeste del sistema de fallas, mientras que, hacia el oriente, estas evaporitas conforman un acuífero altamente transmisivo, con una potencia mayor que el acuífero anterior, correspondiendo a la UH-3, como se muestra desde la *Figura I-6* hasta la *Figura I-8*.

Debajo de estas formaciones hidrogeológicas se ubican depósitos evaporíticos, los cuales conforman acuíferos fracturados y medianamente permeables, con una potencia variable de aproximadamente 1.100 m de profundidad en el núcleo del salar, reduciéndose en dirección oeste del núcleo hasta 750 m y hasta 500 m en la frontera del Salar de Atacama. El este de la frontera del salar está compuesto por depósitos sedimentarios detríticos de grano grueso, de alta permeabilidad, con una potencia aproximada de 400 m, los cuales corresponden a UH-1, como se muestra en la *Figura I-6* hasta la *Figura I-8*.

El basamento de este sistema de acuíferos del Salar de Atacama está compuesto por sedimentos volcánicos de baja permeabilidad y poca capacidad de almacenamiento, lo que corresponde a la UH-6, como se muestra en la *Figura I-6* hasta la *Figura I-8*.

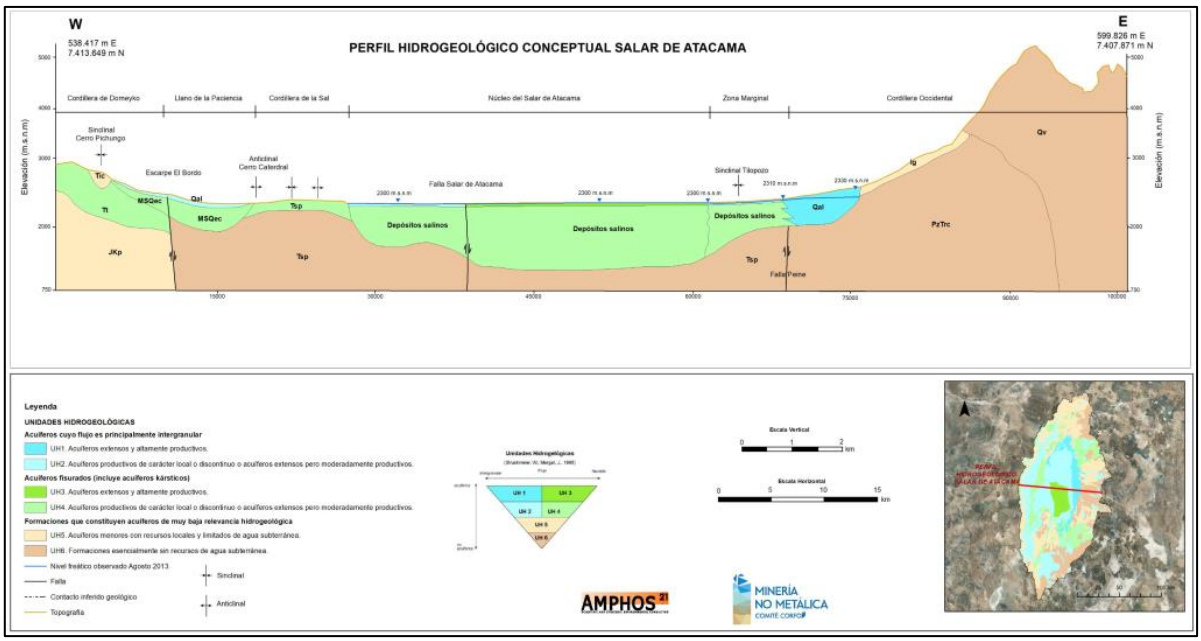


Figura I-6: Perfil hidrogeológico conceptual del Salar de Atacama en dirección WE. Se muestran las unidades hidrogeológicas.
Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

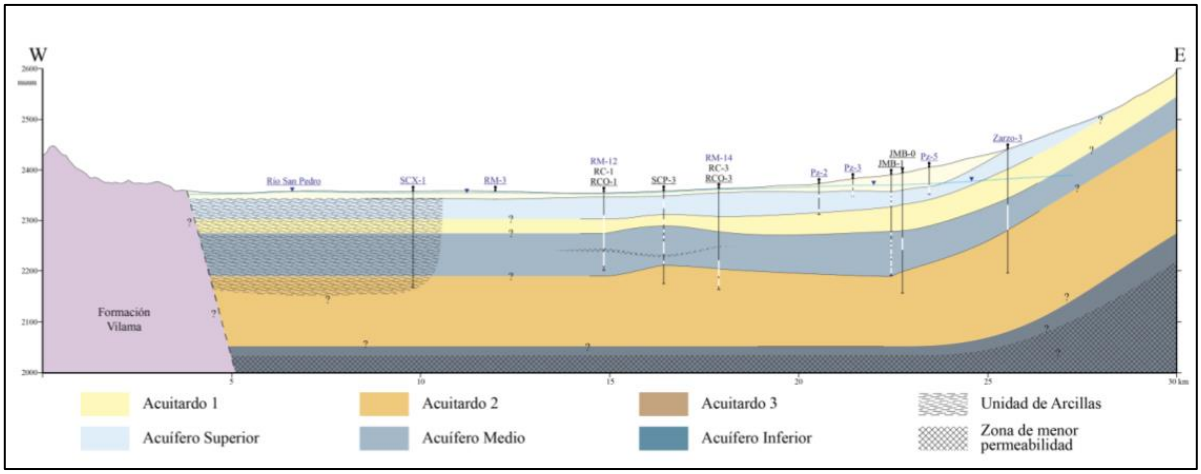


Figura I-7: Perfil hidrogeológico conceptual del Salar de Atacama en dirección WE. Se muestran los acuíferos.
Fuente: Exploraciones San Pedro S.A. (EPSA)-Gestionare (2018).

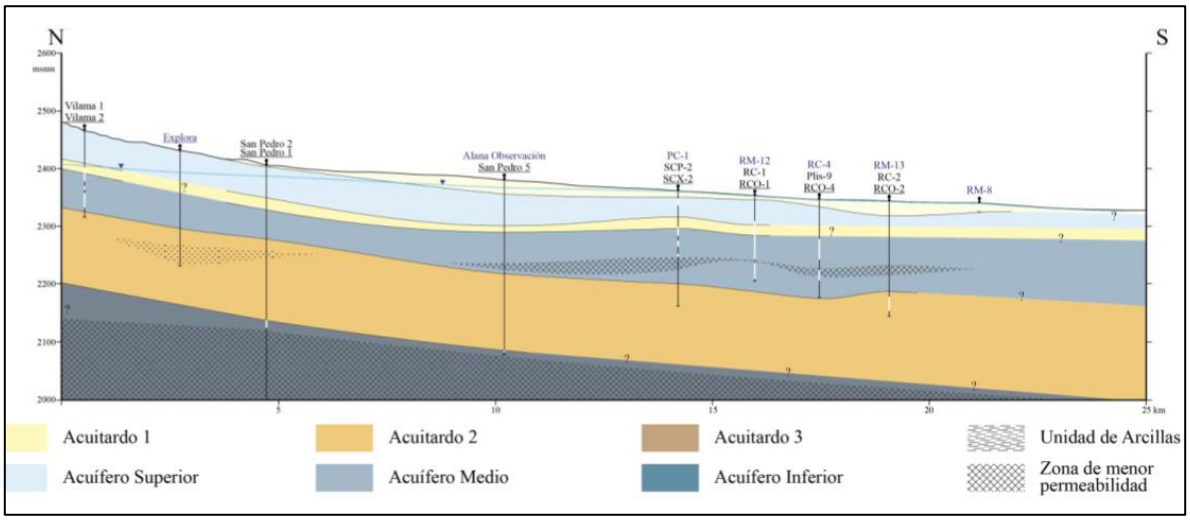


Figura I-8: Perfil hidrogeológico conceptual del Salar de Atacama en dirección NS. Se muestran los acuíferos.
Fuente: Exploraciones San Pedro S.A. (EPSA)-Gestionare (2018).

Unidades hidrogeológicas

El agua subterránea circula a través de las Unidades Hidrogeológicas y su movimiento y capacidad para ceder agua está determinada en parte por sus propiedades hidráulicas. El estudio hidrogeológico de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), permite clasificar 6 unidades hidrogeológicas principales.

Por otro lado, los parámetros hidráulicos del sistema de acuíferos de la cuenca corresponden a la transmisividad, la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento.

La conductividad hidráulica (K), se define como una propiedad de la matriz acuífera, la cual cuantifica la tasa a la cual se mueve el flujo subterráneo. La transmisividad, queda determinada por el producto de la conductividad por el espesor saturado del acuífero.

El almacenamiento corresponde a una propiedad del acuífero, la cual permite cuantificar el volumen de agua retenido o liberado frente a un cambio de la carga hidráulica.

Los valores de estos parámetros se obtienen mediante pruebas de bombeo, ensayos slug test o pruebas de Packer. Estos valores obtenidos se pueden utilizar para estimar el potencial hidráulico de las unidades geológicas y de los acuíferos que éstas conforman y se clasifican en 6 unidades hidrogeológicas (UH-1 a UH-6).

A continuación, se especifican los parámetros hidráulicos correspondientes a cada unidad hidrogeológica definidas según Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

1. **Unidad hidrogeológica 1 (UH-1)**: esta unidad corresponde a depósitos aluviales ubicados en el borde este, norte y sur del Salar de Atacama. Se conforma principalmente por gravas y arenas con intercalaciones de arcillas, limos y arenas. Entre estos materiales también existen intercalaciones entre capas de cenizas y/o ignimbritas.

   Esta unidad se encuentra diferenciada en el borde norte del salar por 2 acuíferos, uno libre y superficial de espesor máximo conocido de 80 m, con sectores confinados arcillas en la superficie, y otro confinado por una capa de 100 m de espesor de ignimbritas y arcillas, aunque el espesor puede ser variable espacialmente. Las ignimbritas y las arcillas constituyen una unidad hidrogeológica menos permeable (UH-5).

   La UH-1 en la zona este comprende un acuífero superficial de tipo libre, de una potencia superior a los 100 m, formado por gravas y arenas con intercalaciones de arcilla y otro profundo, de arenas finas, limos, arcillas, cenizas, entre otros, confinado por una capa de ignimbritas, cenizas y tobas, éstas últimas de entre 5 y hasta 50 m de espesor. Por último, esta unidad está conformada por depósitos aluviales en la zona sur del Salar de Atacama, con una potencia entre 8 m y 52,5 m.

   La conductividad hidráulica de la UH-1 en la zona norte y este varía entre 43 y 63 m/d, mientras que el coeficiente de almacenamiento es del orden de 10^{-4}. También se han estimado coeficientes de almacenamiento para esta unidad del orden de 10^{-3} (DGA-ICASS (2014)). La permeabilidad de los acuíferos libres de esta unidad se encuentra entre 7 y 66 m/d, mientras que el coeficiente de almacenamiento varía entre 10^{-4} a 10^{-1}. Por último, las pruebas de bombeo del sector sur indican un rango de conductividad hidráulica entre 6 y 100 m/d.

2. **Unidad hidrogeológica 2 (UH-2)**: compuesta principalmente por evaporitas de halita y yeso en el núcleo del salar y por gravas y arenas cerca de la zona de Monturaqui. Esta unidad representa un acuífero de permeabilidad media.

En el sector occidental del núcleo del salar, la UH-2 tiene un rango de conductividad hidráulica entre 0,04 y 82,1 m/d a menos de 50 m de profundidad, y entre 0,01 a 5,18 m/d a más de 50 m de profundidad. El coeficiente de almacenamiento en esta zona varía entre 10^{-3} y 0,59 en los primeros 50 m de profundidad, mientras que a mayores profundidades varía entre 0,0026 y 0,86 (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018).

La UH-2 en la zona sur del borde marginal presenta una permeabilidad entre 0,3 m/d y 70 m/d, mientras que en la zona de Monturaqui, donde se conforma por gravas y arenas cementadas, dicha permeabilidad corresponde a 19 m/d y el coeficiente de almacenamiento corresponde a 10^{-1} (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018).

3. **Unidad hidrogeológica 3 (UH-3):** esta unidad se desarrolla en el bloque hundido del Sistema de Fallas del Salar de Atacama, cuyo flujo subterráneo se produce a través de fracturas, fallas y estratificaciones, las cuales han sufrido procesos de disolución y conforman un acuífero kárstico. La potencia de este acuífero se estima entre 20 m y 50 m.

   Esta unidad presenta una permeabilidad alta, con rangos entre 40 m/d y 169.000 m/d, con un promedio de 20.000 m/d. Los valores de coeficiente de almacenamiento verían entre 10^{-2} hasta 10^{-1} (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018).

4. **Unidad hidrogeológica 4 (UH-4):** conformada por rocas estratificadas, sedimentarias y volcánicas, la cual se extiende hasta la zona occidental del Salar de Atacama. Estos minerales se ubican en profundidades entre los 40 m y 60 m por debajo del núcleo del salar.

   Esta unidad es de baja conductividad hidráulica primaria, con valores de 0,5 m/d (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018).

5. **Unidad hidrogeológica 5 (UH-5):** esta unidad corresponde principalmente a rocas volcánicas sedimentarias, rocas intrusivas e ignimbritas. La UH-5 se caracteriza por su baja permeabilidad y almacenamiento, por lo cual tienen una baja capacidad de transmitir y contener agua. La potencia de esta unidad se estima entre 250 m y 2500 m para las rocas volcánicas y 40 m a 100 m para las ignimbritas.

   El rango de los valores de conductividad hidráulica de esta unidad es menor a 10^{-4} m/d.

6. **Unidad hidrogeológica 6 (UH-6):** se encuentra conformada por rocas volcánicas, sedimento-volcánicas, de baja permeabilidad y poca capacidad de almacenar y transmitir agua. Esta unidad está constituida por formaciones carentes de recursos de agua subterránea.

Los valores de conductividad hidráulica para esta unidad se ubican por debajo de los 10^{-5} m/d (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018).

A modo de síntesis de las unidades hidrogeológicas expuestas y sus parámetros hidráulicos, en la Figura I-9 se presenta la disposición geográfica de las unidades hidrogeológicas anteriormente descritas, mientras que la *Tabla I-2* muestra los parámetros hidráulicos obtenidos de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) y Rockwood Lithium -SGA (2015).

Tabla I-2: Conductividades hidráulicas estimadas para las unidades hidrogeológicas del Salar de Atacama

K (m/día)	Calificación conductividad hidráulica	Unidad hidrogeológica	Calificación acuífera
10^{4}	Muy alta	UH-3	Acuíferos buenos a moderados
10^{3}		UH-3	
10^{2}		UH-3	
	Alta	UH-1 y UH-3	
10^{1}		UH-1 y UH-3	
	Media	UH-1, UH-2, UH-4	
1		UH-2 y UH-4	
	Baja	UH-4	Acuíferos pobres
10^{-1}		UH-4	
10^{-2}		UH-4 y UH-5	
	Muy baja	UH-5	
10^{-3}		UH-5	
10^{-4}		UH-5 y UH-6	No acuífero
10^{-5}		UH-6	
10^{-6}		UH-6	

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) y Rockwood Lithium-SGA (2015).

El estudio de Minera Escondida Ltda.-Golder (2018) contiene los parámetros de conductividad hidráulica y transmisividad (producto de la conductividad hidráulica por el espesor saturado del acuífero). Estos valores se estimaron para la zona del acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo y se muestran en la *Tabla I-3*.

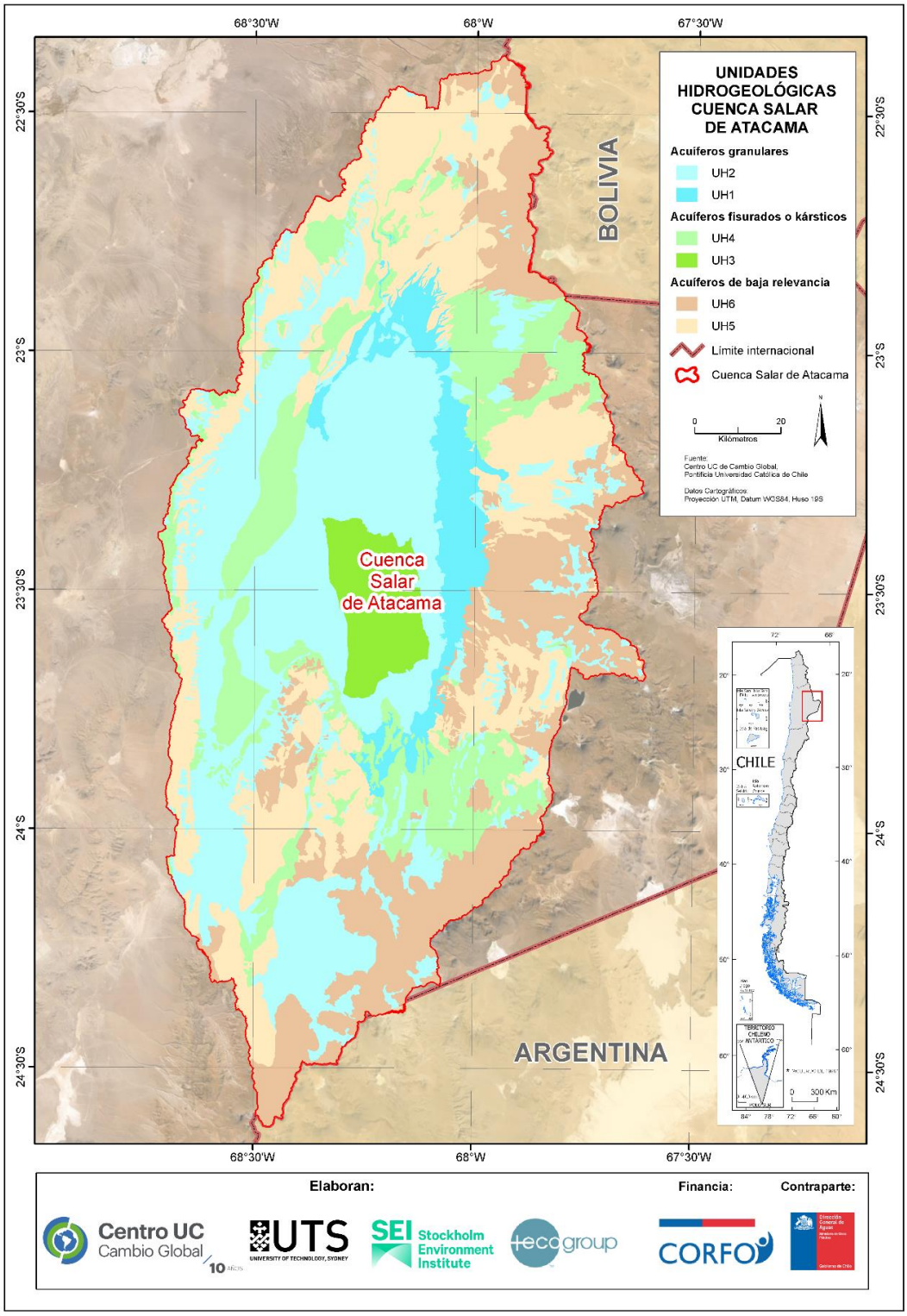


Figura I-9: Distribución de las unidades hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama, desde UH-1 a UH-6.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

Tabla I-3: Conductividades hidráulicas estimadas para el sector de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo

Tipo de prueba	Sector	N° de pruebas	T (m²/d)			K (m/d)		
			Mín.	Máx.	Promedio	Mín.	Máx.	Promedio
Prueba de bombeo	Monturaqui	45	26	1.340	683	0,15	7,9	4
	Roca volcánica	3	30	632	331	0,18	3,7	2
	Negrillar	14	136	6.531	3.333	0,54	33,7	17
	Callejón	3	150	3.500	1.825	6	100	53
Valores promedio Acuífero MNT			1.543			19		

Fuente: Minera Escondida Ltda.-Golder (2017).

I.4.3.4.2 Interfaz salina

En este apartado se explica el funcionamiento de la interfaz salina entre las salmueras del Salar de Atacama y el agua fresca. En el Salar de Atacama existen 3 tipos de salmuera, las primeras corresponden a salmueras cálcicas, al contar con Ca en su composición, las cuales forman sales de calcio (Na-Ca-(Mg)-Cl). El segundo tipo de salmueras corresponde a las sulfatadas, al contar con sulfatos SO_4 en su composición forman sales del tipo (Na-(Mg)-SO4-Cl). Las salmueras cálcicas se encuentran al oeste del salar cerca de la Cordillera de Domeyko, donde predominan las rocas sedimentarias, mientras que las salmueras sulfatadas ocupan la parte oriental bordeada por terrenos volcánicos. El tercer tipo de salmueras corresponde a las salmueras cloruradas sódicas (NaCl), las que se encuentran en el núcleo del salar.

La composición química del agua presenta un promedio de salinidad de 2.255 mg/L de NaCl en la cuenca, encontrándose una alta variabilidad de 3.744,1 mg/L de NaCl según la posición geográfica, donde las mínimas salinidades se encuentran en los ríos y esteros en la parte alta de la cuenca, mientras que la mayor salinidad se produce en el núcleo del salar, donde el agua se evapora. Este sistema forma un gradiente de salinidad desde las mayores elevaciones hacia el salar, donde se genera una interfaz salina entre el agua dulce y las salmueras. Por consiguiente, la dinámica de esta interfaz salina se encuentra estrechamente relacionada con las precipitaciones meteóricas, los flujos superficiales y subterráneos, la recarga del sistema subterráneo producto de las precipitaciones, las salidas de agua producto del flujo de evapotranspiración y las extracciones de agua fresca y salmueras. El funcionamiento de esta interfaz salida se esquematiza en la Figura I-10.

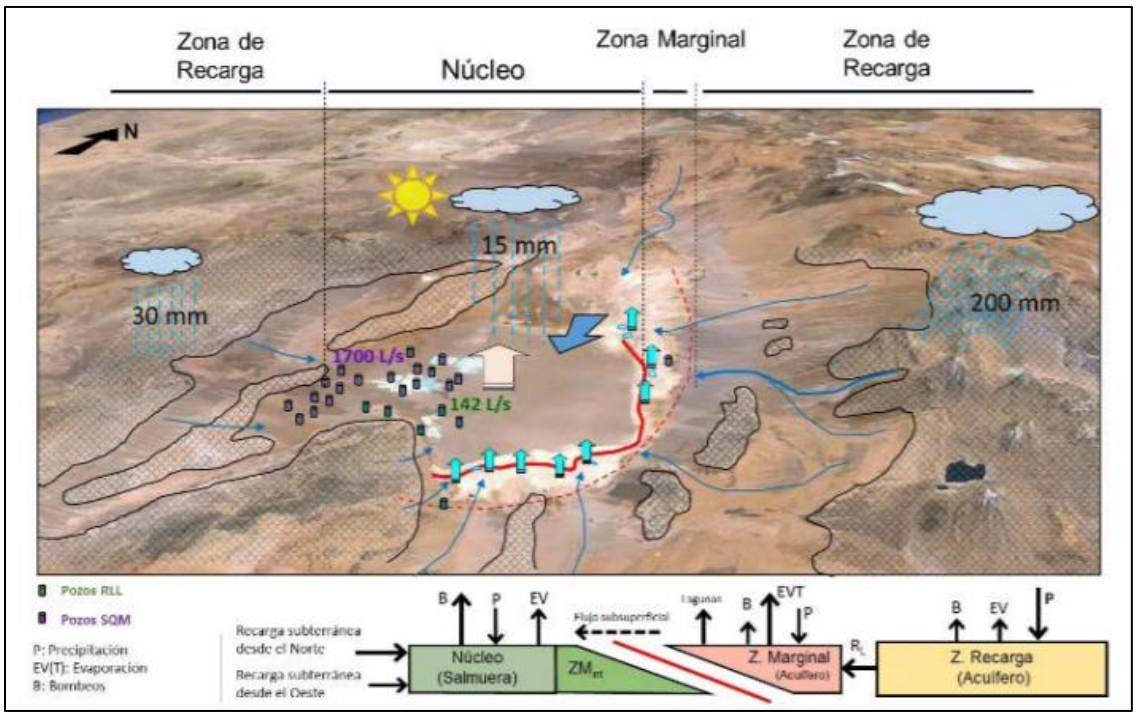


Figura I-10: Esquema conceptual del funcionamiento hidrológico de la zona donde se genera la interfaz salina del Salar de Atacama.
Fuente: Rockwood-SGA (2015)

El funcionamiento de la interfaz salina es de vital importancia para la formación de lagunas, las cuales albergan ecosistemas en el Salar de Atacama. En la Figura I-11 se presenta una vista en planta de dicha estructura.

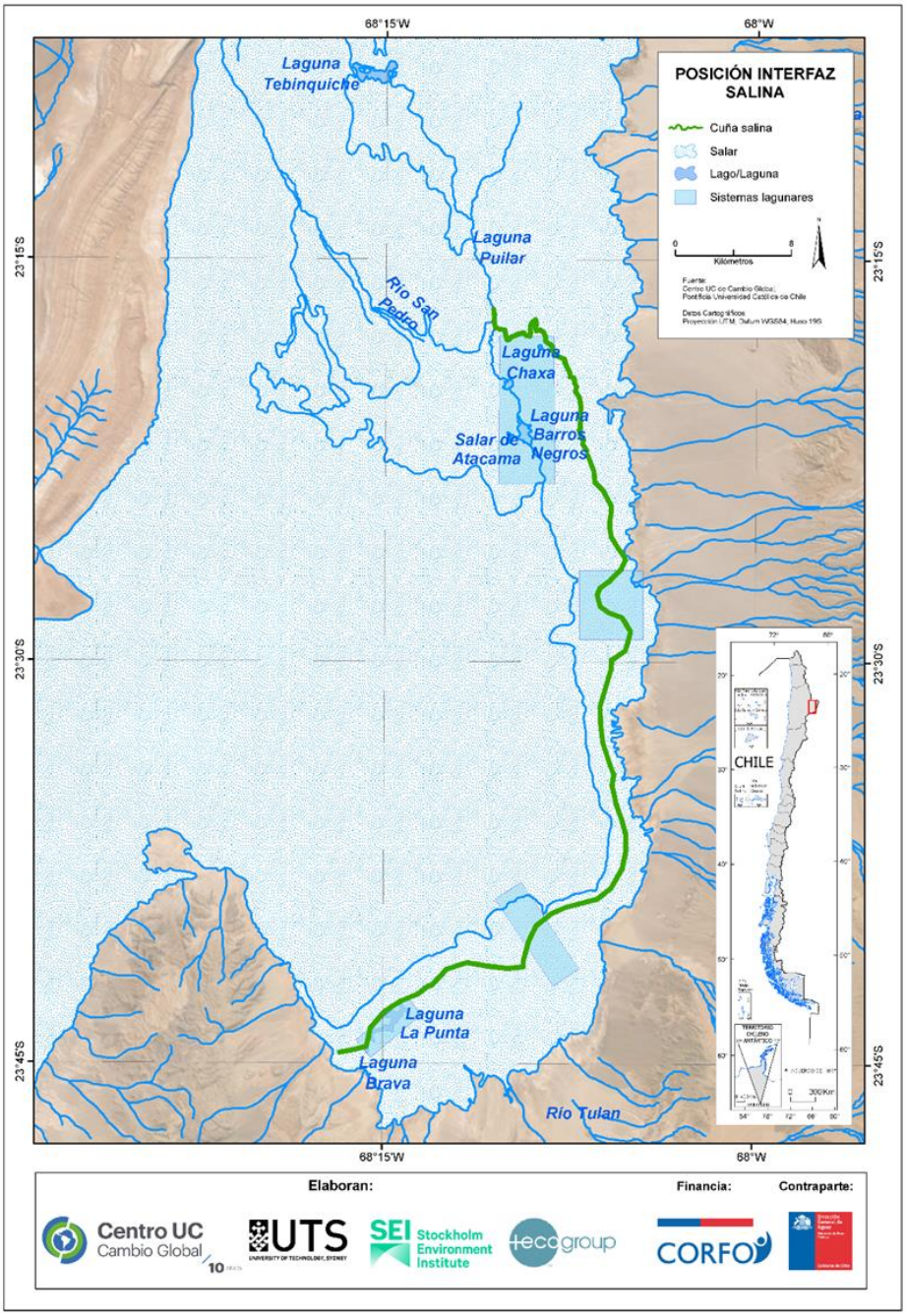


Figura I-11: Posición de la interfaz salina del borde este del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

I.4.3.4.3 Piezometría

En este apartado se presenta la piezometría en régimen estacionario y transiente del sistema subterráneo de la cuenca del Salar de Atacama, junto con las zonas de recarga principales y las direcciones de flujo. Las zonas de monitoreo donde se analizan los niveles

piezométricos subterráneos en el Salar de Atacama se muestran en el capítulo I.4.6.3.1. La evolución de esos niveles se presentará como parte del diagnóstico del balance hídrico en la Etapa II.

Zonas de recarga y direcciones de flujo

A partir de la red de medición de niveles piezométricos (ver Capítulo I.4.6.3.1), se obtiene la piezometría del Salar de Atacama corregida por densidad y por elevación (Figura I-12). Una vez determinada la distribución de isopiezas, se obtienen las direcciones de flujo subterráneo del sistema, las cuales, de acuerdo con la ley constitutiva de Darcy, deben ser ortogonales a las curvas piezométricas, en la dirección descendente del gradiente de cota piezométrica.

Las principales zonas de recarga corresponden a las regiones de la zona Cordillera y la zona de Monturaqui, cuya dirección de flujo se muestra en la Figura I-12 y la Figura I-13. En general, la recarga se produce desde las partes altas de la cuenca hacia las regiones más bajas del Salar de Atacama.

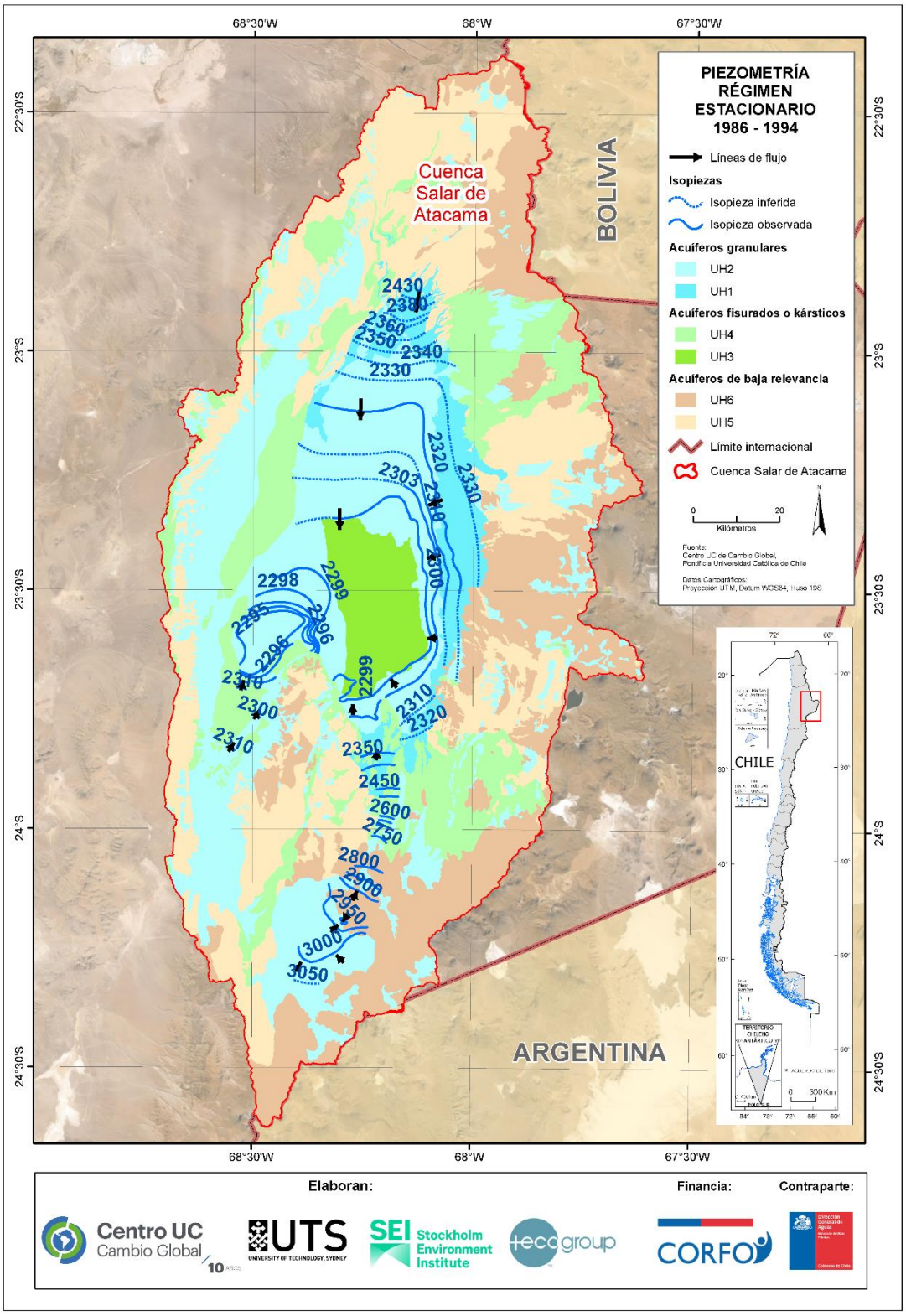


Figura I-12: Piezometría en régimen estacionario entre 1986-1994
Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21(2018)

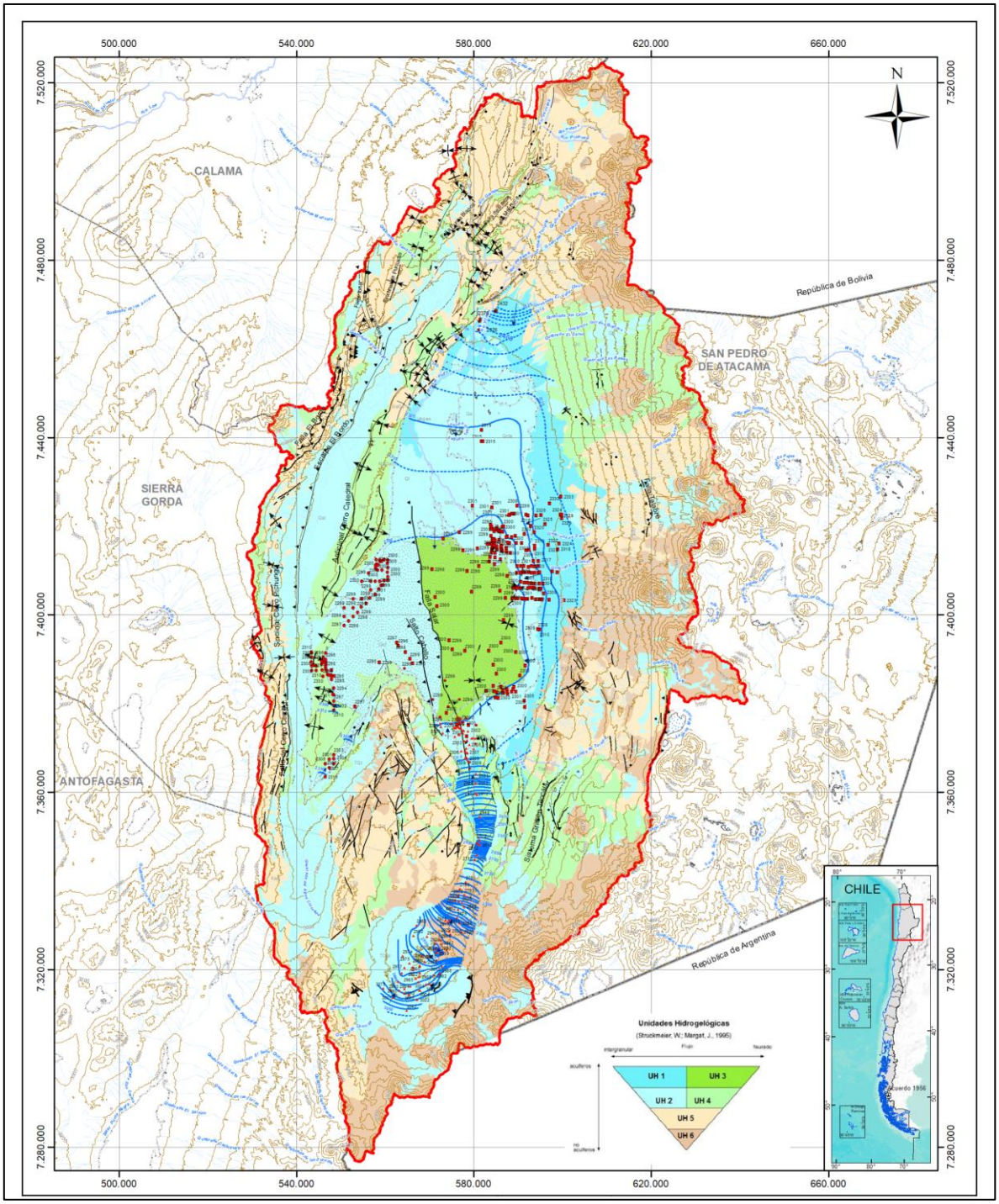


Figura I-13 Piezometría en régimen transitorio de 2013
Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

I.4.3.4.4 Funcionamiento de los sistemas lagunares

A continuación, se describen los sistemas de lagunas presentes en el Salar de Atacama, el cual se ha basado en la información extraída de Rockwood-SGA (2015). Las lagunas presentes en el Salar de Atacama se ubican en la frontera del núcleo del salar, colindantes

con la interfaz salina, bajo el cambio del gradiente topográfico. Este sistema de lagunas es de carácter permanente.

Estos cuerpos de agua son de vital importancia para el ciclo hidrológico debido a que en ellos se produce el mayor flujo evaporativo en la cuenca, y se mantienen en equilibrio debido a los flujos de recarga subterránea, precipitación directa, evaporación de las lagunas, la boyancia producto de la diferencia de densidades y el almacenamiento.

Estos sistemas lagunares conforman un medio ecosistémico particular, de ambientes salinos y almacenamiento de agua en un clima desértico marginal de altura, los cuales albergan microorganismos y especies locales. Los principales sistemas lagunares del salar son Soncor, Aguas de Quelana, Peine, Laguna Tebinquinche, La Punta y La Brava. En la Figura I-14 se presenta la disposición general del sistema de lagunas en el Salar de Atacama.

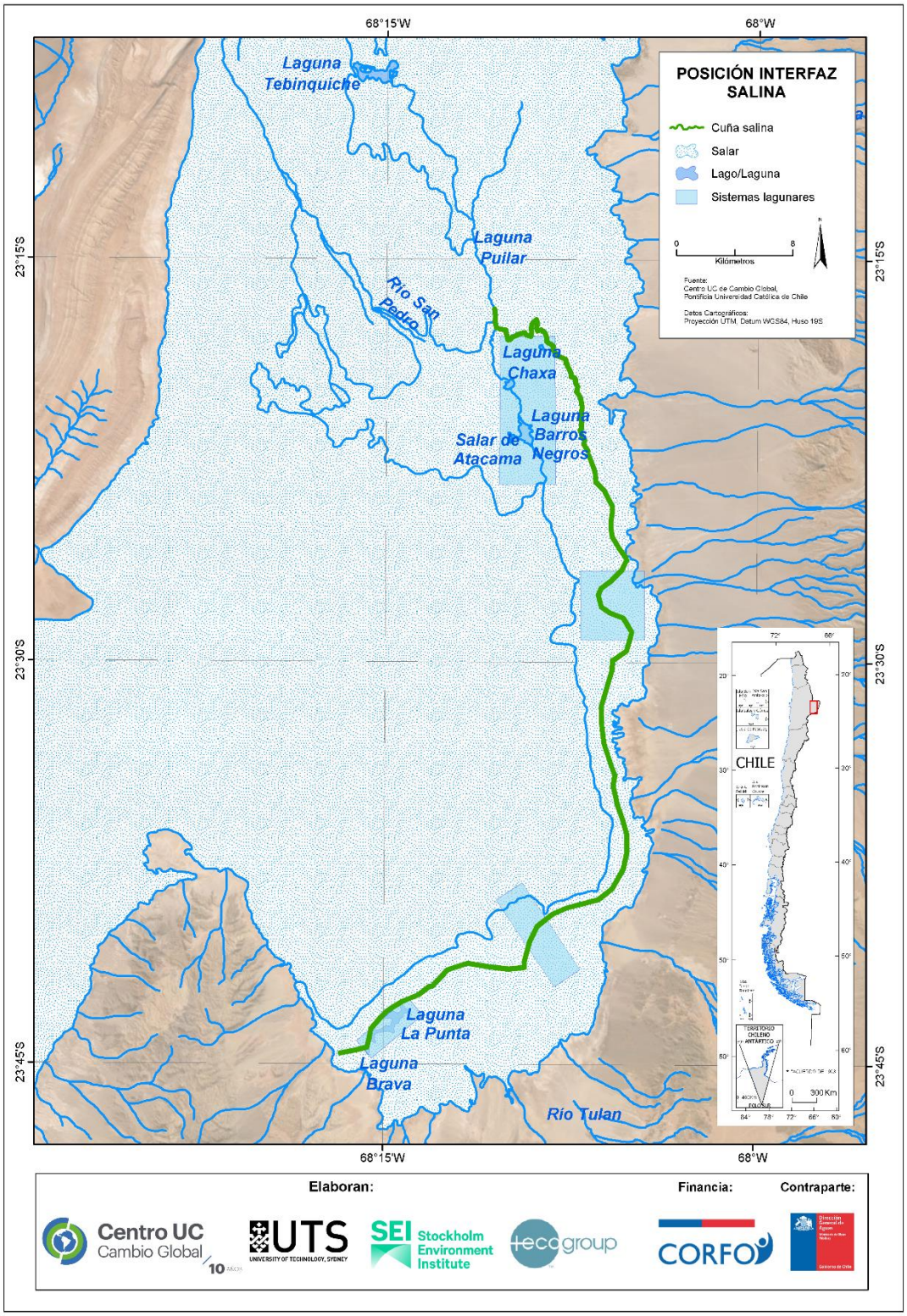


Figura I-14: Distribución espacial en planta de los sistemas lagunares del Salar de Atacama.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

A continuación, se describen las características de cada uno de estos sistemas.

Sistema Soncor

Este sistema está conformado por tres lagunas: Chaxa, Barros Negros y Puilar. Este sistema se ubica en el norte del salar y se alimenta de los flujos provenientes del norte y este. Tal como se describió en la sección anterior, estas lagunas se generan debido al cambio del gradiente topográfico al llegar al salar y producto de los flujos subterráneos de agua dulce-salobre que afloran por boyancia producto de diferencias de densidad. Estos flujos subterráneos alimentan el caudal del Canal Burro Muerto, el cual alimenta las lagunas de Barros Negros, Chaxa y Puilar, además de brindar una conexión hidráulica entre estos dos últimos, tal como se muestra en el esquema de este sistema. La Figura I-15 muestra la localización de estos sistemas, mientras que la Figura I-16 presenta el esquema conceptual del funcionamiento hidrogeológico de estas lagunas.

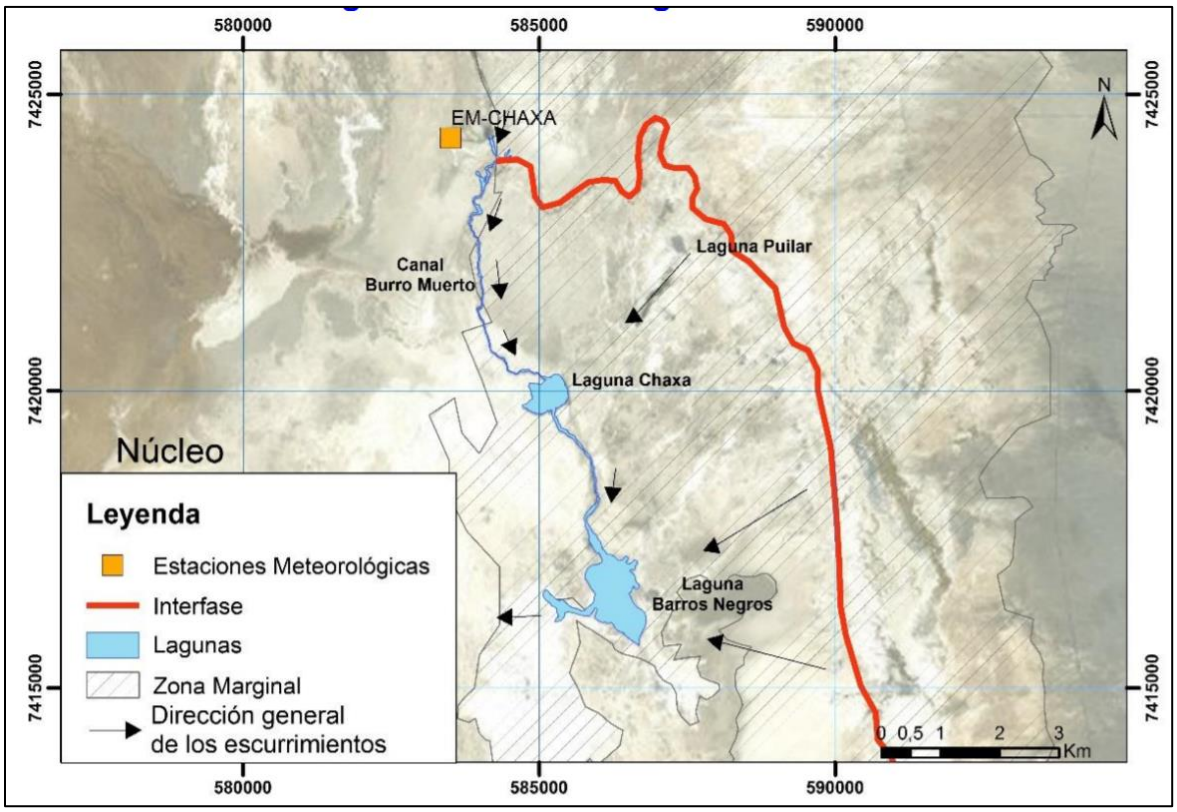


Figura I-15: Vista en planta del sistema lagunar de Soncor.
Fuente: Rockwood Lithium-SGA (2015)

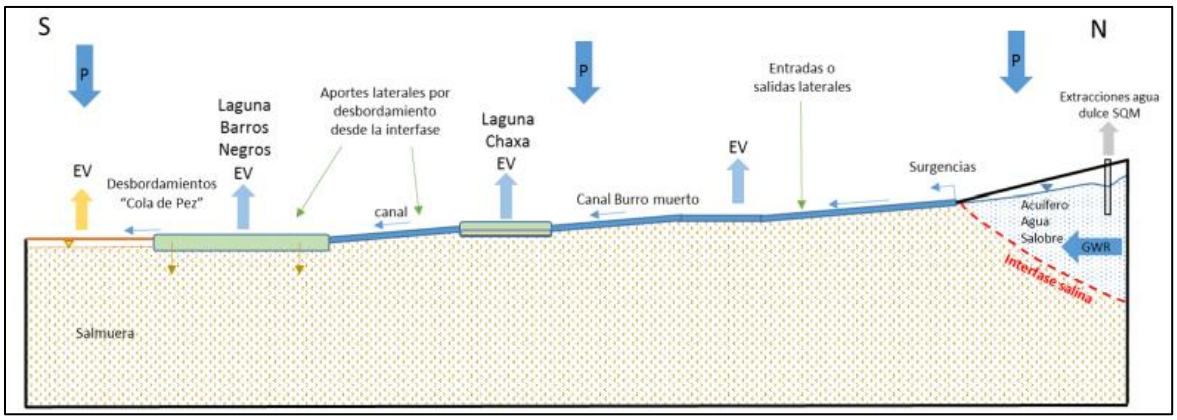


Figura I-16: Esquema conceptual del funcionamiento hidrológico del sistema lagunar de Soncor.

Fuente: Rockwood Lithium-SGA (2015)

Sistema Aguas de Quelana

Este sistema de lagunas está compuesto por cuerpos de agua someros, interconectados entre sí y dispuestos de forma paralela a la interfaz salina debido al ascenso de agua subterránea proveniente del acuífero aluvial somero del este, producto de diferencias de densidad que se producen en la interfaz salina, aflora en las lagunas. La localización de este sistema se puede apreciar en la Figura I-17.

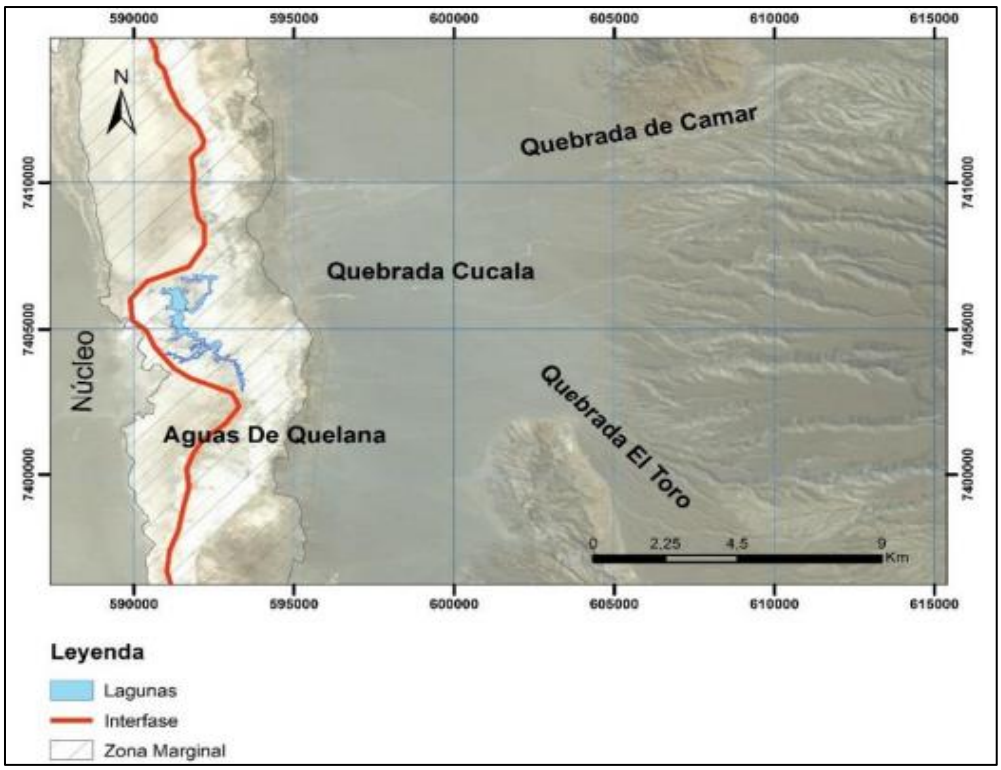


Figura I-17: Vista en planta del sistema de Aguas de Quelana.

Fuente: Rockwood Lithium-SGA (2015)

En la Figura I-18 se presenta un esquema conceptual del funcionamiento del sistema Aguas de Quelana descrito anteriormente.

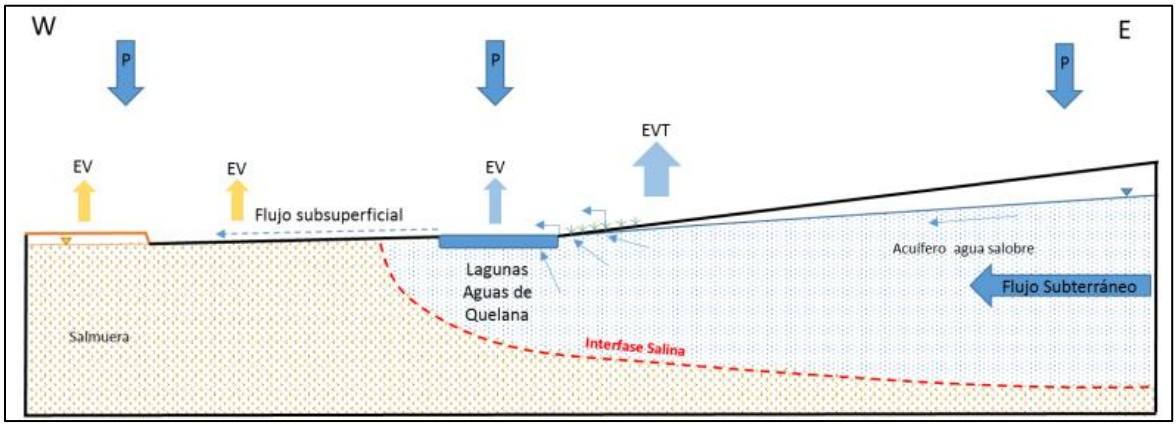


Figura I-18: Esquema conceptual del funcionamiento hidrológico del sistema lagunar Aguas de Quelana.
Fuente: Rockwood Lithium-SGA (2015)

Sistema Peine

Este sistema está compuesto por 3 lagunas: Laguna Salada, Laguna Saladita y Laguna Interna. Las lagunas de este sistema se ubican de forma perpendicular a la interfaz salina y se originan debido a afloramientos del acuífero somero cuando su nivel freático interseca la depresión de la topografía en este sector.

En la Figura I-19 se muestra una disposición en planta y la Figura I-20 un esquema conceptual de este sistema de lagunas.

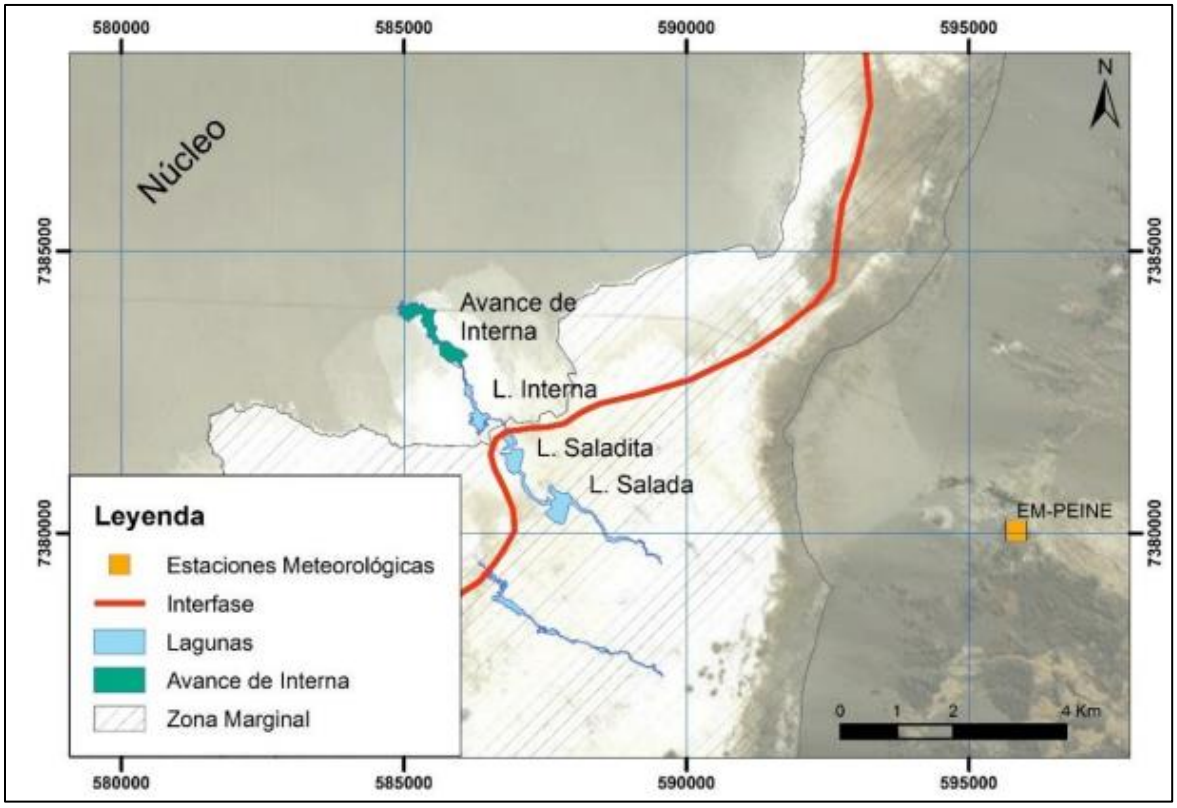


Figura I-19: Vista en planta del sistema Peine.
Fuente: Rockwood Lithium-SGA (2015)

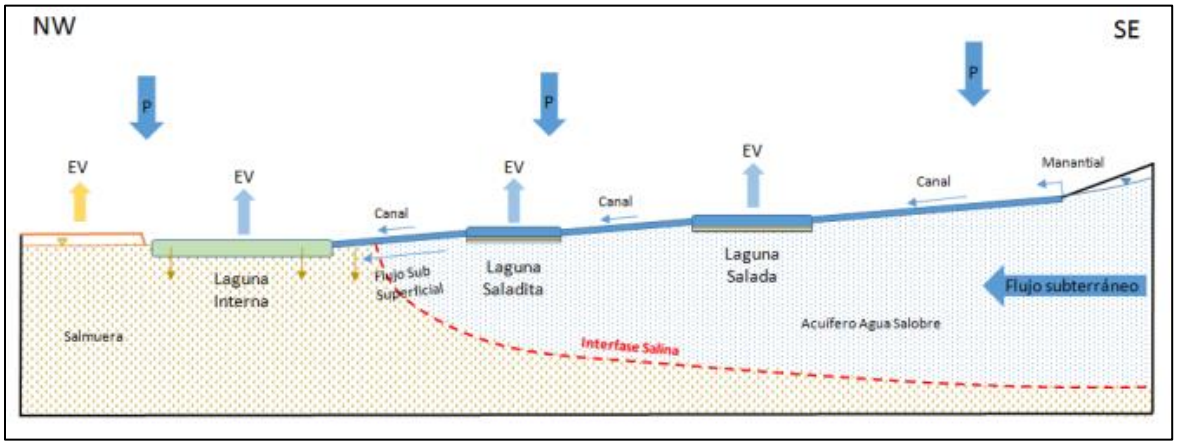


Figura I-20: Esquema conceptual del funcionamiento hidrológicos del sistema lagunar de Peine. Balance entre precipitación, evaporación y flujo subterráneo.
Fuente: Rockwood Lithium-SGA (2015)

Sistema La Punta y La Brava

Este sistema está conformado por 2 lagunas, La Punta y La Brava, las cuales presentan una interconexión hidráulica entre ellas. La disposición de estos cuerpos de agua es paralela a la interfaz salina, cuya distribución se puede observar en la Figura I-21.

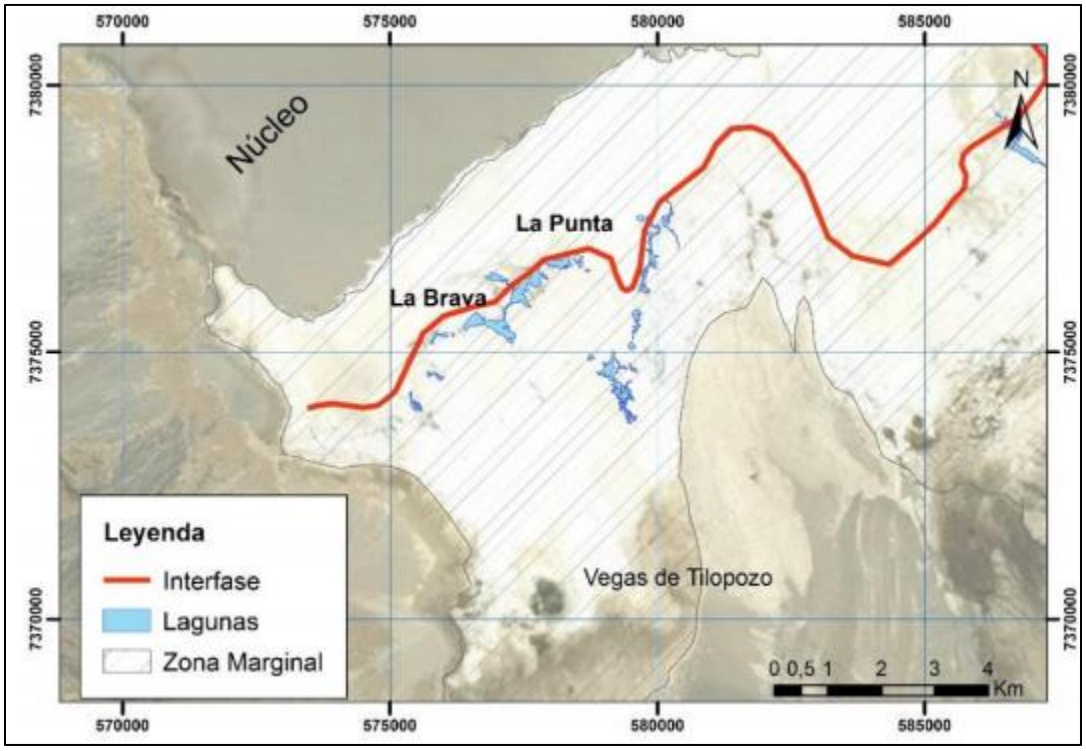


Figura I-21: Vista en planta del sistema de lagunas La Punta y La Brava.
Fuente: Rockwood Lithium-SGA (2015)

En la Figura I-22 se presenta un esquema conceptual del funcionamiento de este sistema lagunar.

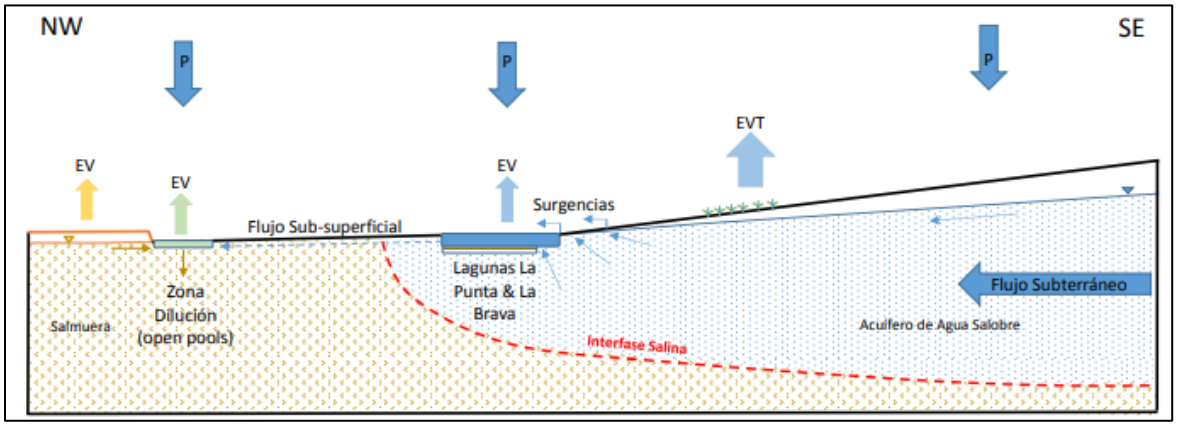


Figura I-22: Esquema conceptual del funcionamiento hidrológico del sistema de lagunas sistema La Punta y La Brava.
Fuente: Rockwood Lithium-SGA (2015)

I.4.3.5 Caracterización de infraestructura hidráulica

En esta sección se menciona la infraestructura existente en la cuenca del Salar de Atacama. En este sentido, cabe mencionar que la infraestructura hidráulica existente en la

cuenca del Salar de Atacama consiste en:

1. Redes de canales de agua y arranques para abastecimiento de agua potable y riego.
2. Pozos de bombeo para abastecimiento de agua potable y producción económica.
3. Obras de protección fluvial.

I.4.4 Descripción del medio biótico de la cuenca

Esta sección describe el medio biótico de la cuenca del Salar de Atacama, abarcando tanto la caracterización de su bioma, como la desagregación de los ecosistemas presentes en la cuenca.

I.4.4.1 Caracterización de bioma

Se llama bioma al área del planeta que comparte tipos de flora y fauna dado un conjunto de características abióticas en común.

El Salar de Atacama se ubica en la Provincia del Desierto, que se extiende por el lado occidental de la Cordillera de los Andes desde el norte del Perú hasta la latitud de La Serena en Chile. El Salar de Atacama se ubica entre los 1.800 y 3.500 m.s.n.m. y representa el piso vegetacional superior del Desierto. La posibilidad de desarrollo de vida vegetal y animal está dada por la influencia marginal de las lluvias estivales en la alta cordillera. La presencia de vegetación en este sector está directamente determinada por la disponibilidad de agua asociada a lluvias o a cuerpos de aguas locales.

I.4.4.2 Caracterización de ecosistemas

En este apartado se desagregan los ecosistemas presentes en la cuenca en formaciones vegetales zonales y azonales, fauna y biota acuática. Estos ecosistemas se describen utilizando las referencias de Millenium Ecosystem Assessment (2005), Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK (2017a), Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, (2017b), Rockwood Lithium-SGA (2015) y Gajardo (1994).

I.4.4.2.1 Formaciones vegetales zonales

Las formaciones vegetales zonales se describen a continuación:

Desierto de la cuenca superior del río Loa: Esta formación vegetal muestra características de composición que la relacionan con el piso inferior de la estepa alto-andina de la Puna. Este conjunto está conformado principalmente por arbustos bajos xerófitos y en muchos lugares presenta extensas superficies sin vegetación alguna. Las asociaciones más características es *Acantholippia punenis – Franseria meyeniana* (rica – petaloxa).

Desierto de los Aluviones: comprende amplias áreas desprovistas de vegetación con la presencia en algunos sectores de arbustos bajos y adaptados a la extrema aridez de la zona. Algunos de los géneros de plantas que se pueden encontrar son: *Philippiamra*, *Atriplex*, *Adesmia*, *Coldenia*, *Hoffmanseggia*, *Calandrinia*, *Cristaria*, y *Acantholippia*. Esta formación vegetal comprende las vertientes orientales y llanos de la Cordillera de Domeyko ubicada en el sector oeste de la cuenca del salar, los que reciben la influencia de los grandes aluviones y las precipitaciones marginales de la alta cordillera.

Desierto del Salar de Atacama: sector que comprende la mayor parte de la cuenca del salar y zonas aledañas. En general esta desprovisto de vida vegetal principalmente debido a las condiciones hipersalinas de los suelos. Se ubican en algunos sectores, comunidades vegetales caracterizadas por individuos de *Atriplex atacamensis* (cachiyuyo) y *Tessaria absinthioides* (brea). Otras especies que se pueden encontrar en estas comunidades son la *Acantholippia punensis* (rica-rica), *Franseria meyeniana* (petaloxa) y *Acantholippia trífida* (Oreganillo). La presencia de agregaciones de *Prosopis chilensis* (tamarugos) y *Geoffroea decorticans* (chañar) en algunos sectores se debe principalmente a introducciones y manejo humano.

Desierto Interior: formación que se ubica al noroeste de la cuenca del Salar de Atacama. Es parte de una vasta formación vegetal que se extiende desde Perú hasta los 25º de latitud Sur en el norte de Chile. Presenta escasa vegetación con una comunidad principalmente compuesta por *Tessaria absinthioides* (brea) y *Distichlis spicata* (grama salada), las cuales son poco frecuentes y están usualmente asociadas a presencia de agua en algunos sectores.

Desierto Montano de la Cordillera de Domeyko: formación ubicada en el margen oeste de la cuenca del salar, en las faldas de la Cordillera de Domeyko. Comparte vegetación típica del desierto más seco con aquella de sectores de mayor altura. Entre las asociaciones de especies vegetales más representativas se destacan *Atriplex atacamensis – Acantholippia trífida* (cachiyuyo - oreganillo), *A. atacamensis – Coldenia atacamensis* (cachiyuyo -cauchal), *A. atacamensis - Lycium minutifolium* (cachiyuyo - calpiche), *Atriplex imbricata-Cristaria andicola* (ojalar-malvilla), *Festuca chrysophylla-Fabiana bryoides* (paja hiro-pata de pizaca).

Estepa Arbustiva Pre-Puneña: se caracteriza por ser una formación vegetacional en donde predominan los arbustos bajos y de baja cobertura. En su extensión hacia el sur recibe menos precipitaciones, lo que otorga un carácter de mayor aridez y produce cambios en las comunidades. De este modo se mencionan comunidades de *Fabiana densa – Baccharis boliviensis* (checal - lejía) para el área sur de la formación, mientras que para el área norte la comunidad está dominada por *Baccharis incarum* – Lampaya medicinalis.

Estepa Desértica de la Puna de Atacama: formación de arbustos de baja altura acompañados por gramíneas de mechón. Existen amplias áreas desprovistas de vegetación. Las especies representativas son la *Fabiana bryoides* (pata de pizaca) y

Parastrephia lepidophylla (tola vaca), acompañadas de *Mulinum crassifolium* (susurco), *Stipa frígida* (paja amarilla), *Artemisia copa* (copa), *Fabiana denudata* (tolilla), *Stipa chrysophylla* (coirón amargo), *Phacelia viscosa* (Té de Burro), *Adesmia hystrix* (varilla brava), *Calandrinia occulta* (pata de guanaco), *Cristaria andicola* (malvilla), *Perezia atacamensis* (marancel), *Stipa atacamensis* (coirón) y *Viola frigida* (escarapela).

Estepa Desértica de los Salares Andinos: se ubica al sur de la cuenca del Salar de Atacama. Es un matorral abierto y pobre en especies. Lo domina la presencia de *Atriplex imbricata*, con la compañía de otros elementos tales como *Cristaria andicola* (malvilla) y *Adesmia hystrix* (varilla brava). Las fuertes influencias desérticas de manifiestan en la presencia de *Adesmia atacamesnis* (allaval) y *Argylia tomentosa* (terciopelo).

En la Figura I-23 se muestra la disposición de las formaciones vegetales descritas anteriormente.

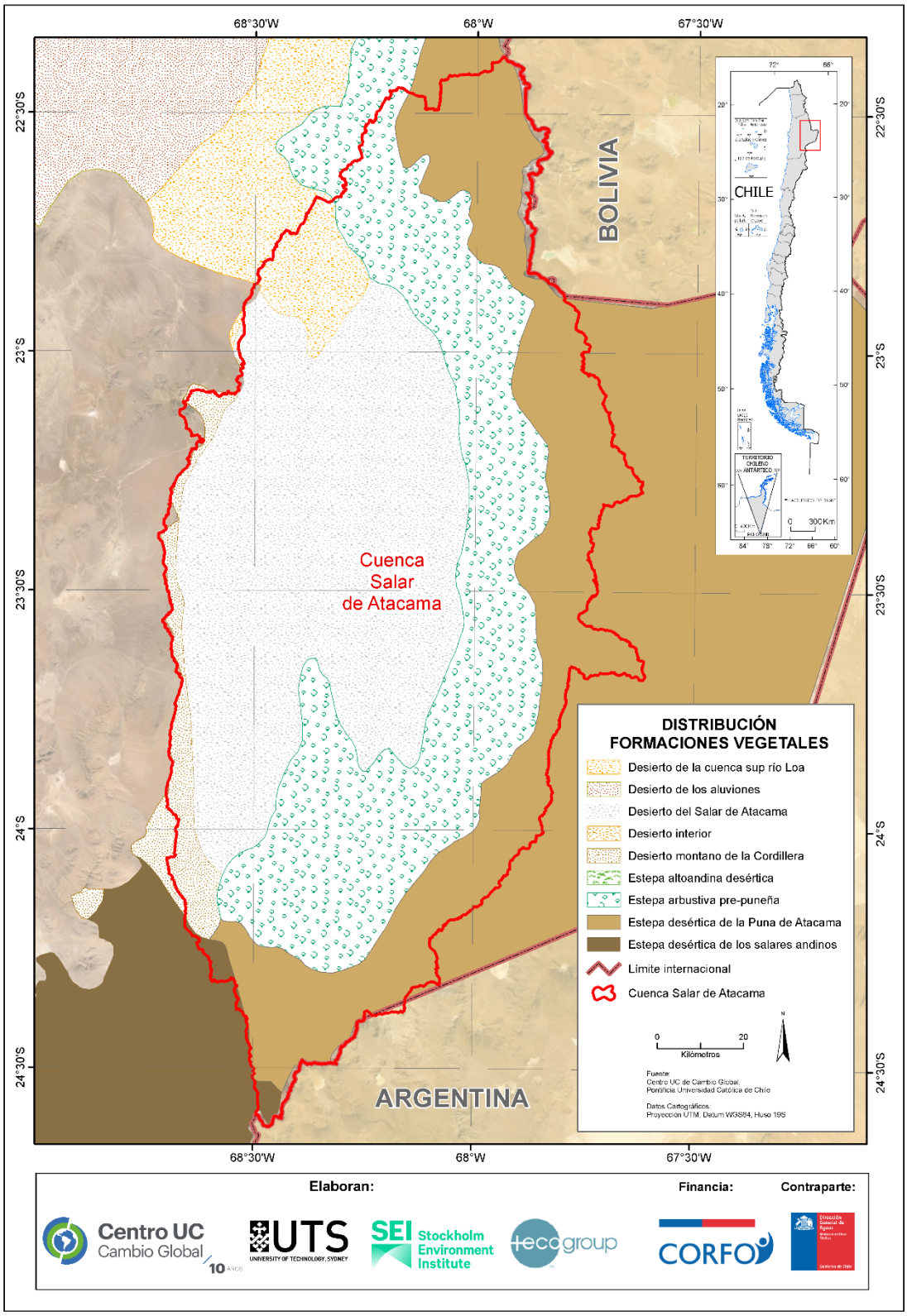


Figura I-23: Distribución de las formaciones vegetales zonales de la cuenca del Salar de Atacama.

Fuente: Elaboración propia a partir de Zhao et al., (2016)

I.4.4.2.2 Formaciones vegetales azonales

Las formaciones vegetales azonales se describen a continuación:

Vegas, bofedales y lagunas: los bofedales y vegas consisten en ecosistemas húmedos, los cuales se encuentran saturados permanentemente, albergando numerosas especies de flora y fauna. Pueden existir en sectores de afloramientos de aguas subterráneas como también en los bordes de las lagunas.

Estos ecosistemas están ocupados por formaciones vegetales que se conocen como vegetación azonal y cuya distribución responde a condiciones locales de suelo, principalmente humedad, la que condiciona su desarrollo. Existen formaciones dominadas por *Schaenoplectus americanus* (totora), como también algunos bofedales donde *Juncus balticus* (cachina) o *Distichlis spicata* (grama salada) son las especies que dominan. Algunas otras especies que acompañan son *Baccharis juncea* (suncho), *Sarcocornia fruticosa* (sosa), *Tessaria absinthioides* (brea), *Lycium humile*.

Estas formaciones azonales sirven como áreas de forraje y hábitat para valiosas especies de aves amenazadas en su conservación como *Phoenicopterus chilensis* (flamenco chileno), *Phoenicoparrus andinus* (parina grande), *Phoenicoparrus jamesi* (parina chica), *Tinamotis pentlandii* (perdiz de la puna), *Fulica cornuta* (tagua cornuda), *Larus serranus* (gaviota andina), *Attagis gayi* (perdicita cordillerana), *Chloephaga melanoptera* (guayata) y *Rhea pennata* (suri); además de mamíferos como *Vicugna* (vicuña), *Lama guanicoe* (guanaco), *Pseudalopex culpaeus* (zorro culpeo), *Pseudalopex griseus* (zorro gris), *Lagidium viscacia* (vizcacha).

En la Figura I-24 se muestra la distribución geoespacial de los sistemas de vegas y bofedales de la cuenca del Salar de Atacama. La superficie total de las vegas presentes dentro de la cuenca corresponde a 160.496 (ha), de acuerdo con la información disponible de INE, (2007). Existen otros catastros puntuales de vegas los cuales no se consideraron en este cálculo. La superficie cubierta por los bofedales en la cuenca del Salar de Atacama corresponde a 124.291 (há) (INE, (2007)).

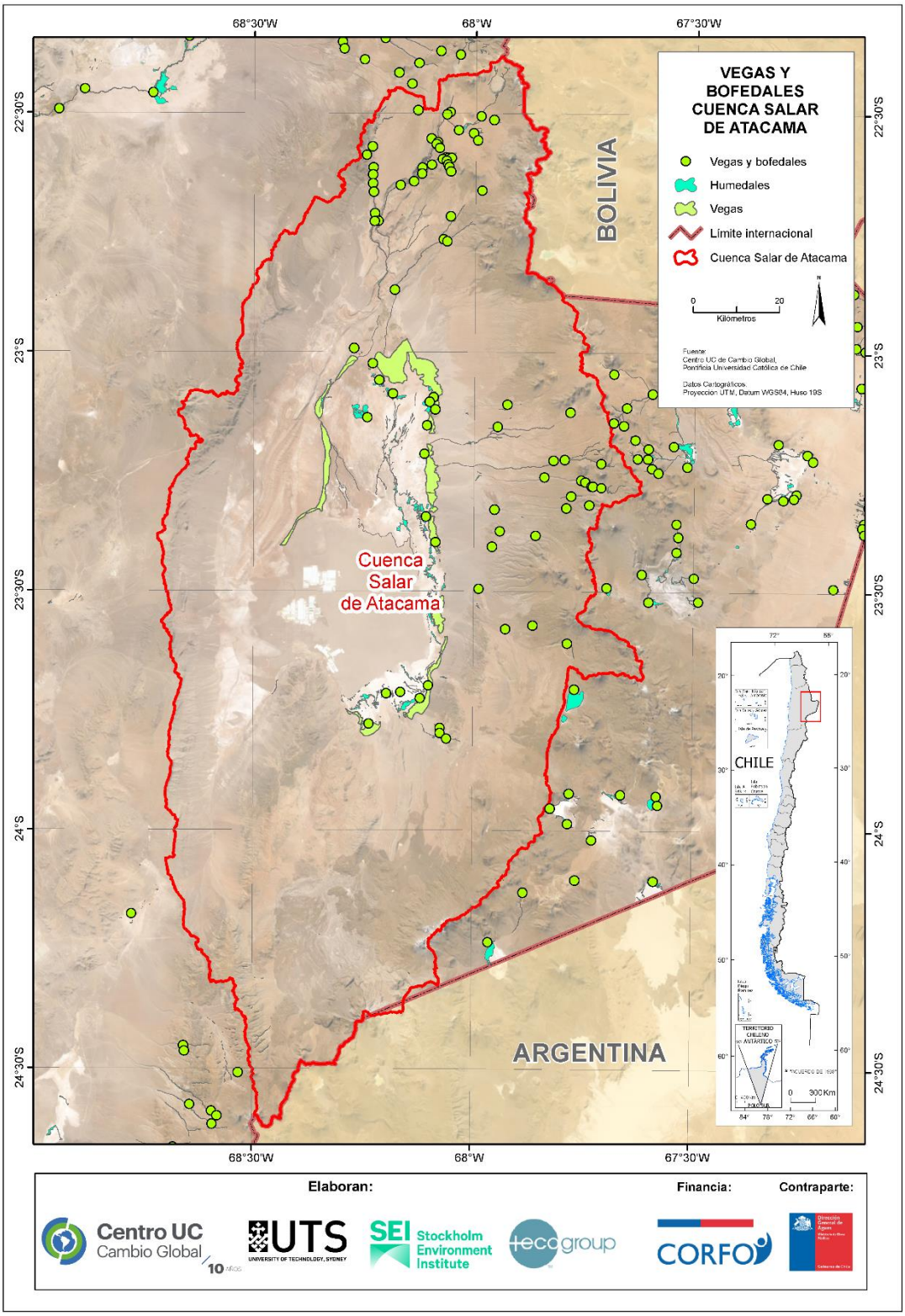


Figura I-24: Distribución geoespacial de vegas y bofedales de la cuenca del Salar de Atacama.

Fuente: Elaboración propia a partir de información pública del MMA

I.4.4.2.3 Fauna

Este apartado presenta la descripción de la fauna presente en la cuenca, la cual se basa en la información entregada en el Millenium Ecosystem Assessment (2005) y SGA (2015).

Tabla I-4: Cantidad de especies de fauna en torno a San Pedro de Atacama.

	Total Especies	Endémicas
Invertebrados terrestres	238	-
Reptiles	14	9
Anfibios	2	2
Aves	133	1
Mamíferos	24	0

Fuente: Millenium Ecosystem Assessment (2005)

Se mencionan a continuación las especies de vertebrados más características de la fauna de la cuenca del Salar de Atacama.

Anfibios: *Rhinella spinulosa, Pleurodema thaul, Telmatobuis dankoi* (endémica) *y Telmatobius vilamensis* (endémica).

Reptiles: Tachymenis peruviana, *Liolaemus fabiani (endémica), Liolaemus constanzae (endémica), Liolaemus audituvelatus* (nativa), *Liolaemus schmidti, Liolaemus puritamensis* (endémica)(Núñez y Veloso (2001)).

Aves: Dentro de las aves presentes en la cuenca destacan las tres especies de flamencos que habitan en el país: *Phoenicopterus chilensis* (Flamenco Chileno), *Phoenicoparrus andinus* (Flamenco Andino), *Phoenicoparrus jamesi* (parina chica), *Charadrius alticola* (chorlo de la Puna), *Fulica cornuta* (tagua cornuda), *Recurvirrostra andina* (Caití), *Phalaropus tricolor* (pollito de mar tricolor), *Calidris bairdii* (Playero de baird), *Metriopelia aymara* (tortolita de la puna), *Lophonetta specularioides* (pato juarjual), *Geositta marítima* (minero chico), *Leptasthenura aegithaloides* (tijeral), *Sicalis olivascens* (chirihue) y *Rhea pennata* (suri).

Mamiferos: *Vicugna* (vicuña), *Lama guanicoe* (guanaco), *Pseudalopex culpaeus* (zorro culpeo), *Pseudalopex griseus* (zorro gris), *Lagidium viscacia* (vizcacha), *Abrothrix andinus* (ratón andino del Altiplano), *Ctenomys fulvus* (tuco del Tamarugal), *Eligmodontia puerulus* (ratita de pie sedoso), *Phyllotis xanthopygus* (lauchón orejudo) y *Thylamys pallidior* (yaca).

I.4.4.2.4 Biota acuática

Dentro de los ecosistemas presentes en la cuenca se encuentra la biota acuática, la cual se describe a continuación:

Fitoplancton: Corresponde al conjunto de organismos autótrofos que viven en los cuerpos de agua. Para las lagunas del Salar de Atacama se han registrado diatomeas (Clase Bacillariophyceae), Pennales o diatomeas pennadas (Clase Fragilariophyceae), Cianobacterias (Clase Cyanophyceae), carofitas (Clase Charophyta) y Algas verdes (Clase Chlorophyceae). Algunos géneros de diatomeas presentes Amphora, Cocconeis, Denticula, Navicula, Nitzschia, Pinnularia y Surirella.

Zooplancton: corresponde al grupo de organismos heterótrofos acuáticos que se alimentan de los productores primarios de fitoplancton que habitan en los cuerpos de agua presentes en la cuenca del salar. Pequeños moluscos de las clases Gastropoda, pequeños crustaceos de las clases Ostracada, Maxillopoda y Malacostraca (Orden Amphipoda); copépodos de las clases Hexanauplia, (Ordenes Calanoida y Harpacticoida); artrópodos de la Clase Insecta (Orden Diptera, familias Chironomidae, Ceratopogonidae, Ephydridae Stratiomyidae y Tipulidae); Clase Arachnida (Orden Acari); rotíferos de la clase Monogononta (orden Ploimida, Familia Brachionidae) y braquipodos Clase Branchiopoda (orden Anostraca Familia Artemiidae). De estos últimos destacan aquellos del género *Artemia*.

Zoobentos: Corresponden a aquellos invertebrados que habitan en el bentos, el fondo de los ecosistemas acuáticos. Corresponden a organismos que se alimentan del tapete microbiano y las macrofitas que también habitan en estas superficies. Entre los grupos de organismos que se han identificado hay quironomidos (clase Insecta) de las familias Ceratopogonidae y Chironomidae, crustaceos de las clases Maxillopoda y Malascostraca (familia Hyalella), dipteros (clase Insecta) de la familia Ephydridae y gastropodos del orden Littorinimorpha (familias Hydrobiidae y Amnicolidae). Destaca la presencia de la especie endémica de gastrópodo: Heleobia atacamensis.

Macrófitas: Algunas plantas acuáticas que se pueden encontrar son *Potamogeton pectinatus* y *Ruppia filifolia*.

Tapate microbiano: se ha descrito como una formación constituida por capas de microorganismos, estratificada en distintos colores, los que reflejan la funcionalidad de los organismos que la componen. Algunos de los grupos taxonómicos que han sido identificados son: Proteobacteria, Thermi, Chloroflexi, Verrucomicrobia, Bacteroidetes, Planctonmycetes, Chlamidiae (Farias et al. 2017). Es importante señalar que algunas de las lagunas de la cuenca del Salar de Atacama han sido destacadas como lugares de alta diversidad de microorganismos extremófilos (Dorador et al., 2018). La importancia de estos microorganismos radica en que pueden captar el CO_2 atmosférico y transformarlo en carbonato de calcio, liberando O_2 a la atmósfera.

I.4.5 Descripción del medio humano de la cuenca

En esta sección se caracteriza y describe el medio humano presente en la cuenca del Salar de Atacama. Por ello, se analiza primero la dimensión demográfica a nivel regional y comunal. Luego, dada la importante presencia de población indígena atacameña en la cuenca, se caracterizan las comunidades y asociaciones indígenas, incluyendo su

ubicación, distribución y cosmovisión. Como segundo punto, se caracteriza la actividad económica de la Región de Antofagasta, incluyendo las principales actividades económicas que tienen lugar a nivel de la cuenca: agricultura, turismo y minería.

I.4.5.1 Dimensión Demográfica

La división político-administrativa de la región de Antofagasta se reparte en 3 provincias: Tocopilla, El Loa y Antofagasta. La división comunal de estas provincias comprende nueve comunas: Tocopilla, María Elena, Calama, Ollagüe, San Pedro de Atacama, Antofagasta, Mejillones, Sierra Gorda y Taltal. Dado que la cuenca del Salar de Atacama se extiende sobre la provincia de El Loa, en específico sobre la comuna de San Pedro de Atacama, se presentan los antecedentes demográficos solo de dichas zonas administrativas de interés (ver *Figura I-1*).

Dentro de los límites administrativos de la cuenca, la mayor parte de la población, así como las actividades económicas, se concentran en el pueblo de San Pedro de Atacama. Sumado a este importante centro urbano, existen una serie de poblados con menor densidad poblacional: Río Grande, Machuca, Toconao, Talabre, Camar, Socaire y Peine. A su alrededor, se encuentran además una serie de Ayllus (localidades autónomas que establecen su dominio en un nicho macro ecológico especifico de control de recursos para su subsistencia) que se clasifican en tres grandes grupos de acuerdo con su cercanía geográfica al área urbana de San Pedro de Atacama, y por tanto su accesibilidad y relación funcional (Mapocho Consultores, 2017):

- Sector norte: Ayllus más aislados, que conservan actividades agropecuarias y una mínima cantidad de población con residencia permanente (Vilama, Suchor, Bellavista, Guachar, Tambillo, Catarpe y Cuchabrache).
- El sector central, periférico a San Pedro de Atacama y que se caracteriza por la ocupación que combina los usos urbanos con una actividad agrícola bastante desarrollada (Quitor, Yaye, Larache, Solcor, Checar, Séquitor).
- El sector sur, formado por Ayllus independientes entre sí, conectados con San Pedro mediante caminos rurales (Solor y Coyo).

Provincia de El Loa

De acuerdo con los resultados del Censo 2017 (INE, 2017), la provincia de El Loa tiene una población de 177.048 habitantes, de los cuales 92.417 son hombres y 84.631 son mujeres. Cubriendo una superficie de 42.934,1 km^2, la provincia tiene una densidad poblacional de 4,12 habitantes/km^2. En cuanto a la distribución por edad, destaca una importante proporción de la población joven (menor de 25 años), alcanzando el 46% del total, así como un 93,3% menor a los 64 años. La tasa de crecimiento poblacional intercensal de esta provincia es similar en los tres períodos temporales registrados por el INE (1982-1992, 1992-2002, 2002-2017), alcanzando el 23,2% en el último período, valor muy cercano a la tasa de crecimiento a nivel regional (23%).

Tabla I-5: Población Total censos 1982, 1992, 2002, 2017 en zonas administrativas de interés

Región/Provincia	Censo 1982	Censo 1992	Censo 2002	Censo 2017
	(Habitantes)			
Región de Antofagasta	341.702	410.724	493.984	607.534
Tasa Crecimiento Intercensal (%)	-	20,2	20,3	23
Provincia de El Loa	103.633	125.079	143.689	177.048
Tasa Crecimiento Intercensal (%)	-	20,7	14,9	23,2
Comuna de San Pedro de Atacama	2.578	2.829	4.969	10.996
Tasa Crecimiento Intercensal (%)	-	9,7	75,6	121,3

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2017 (INE, 2017).

Comuna de San Pedro de Atacama

La provincia de El Loa cuenta con tres comunas, entre ellas la comuna de San Pedro de Atacama, cuya capital comunal corresponde al poblado turístico del mismo nombre. La población residente en esta comuna alcanza las 10.996 personas (6.161 hombres y 4.835 mujeres), que constituyen el 1,81% de la población total de la Región de Antofagasta y el 6,21% de la población de la Provincia de El Loa, posicionando a la comuna como una de las con menor población dentro de la región (INE, 2017). En específico, y como se observa en la *Tabla I-6*, al extenderse sobre una superficie de 23.439 km^2 alcanza una densidad poblacional de 0,47 hab/km^2, cifra que se encuentra muy por debajo y contrasta con la media provincial (4,22 hab/km^2) y regional (4,82 hab/km^2).

Tabla I-6: Población, superficie y densidad a nivel regional, provincial y comunal.

Región, Provincia o Comuna	Censo 2017 *(Hab)*	*Superficie (Km^2)*	Densidad *(Hab/km^2)*
Región de Antofagasta	607.534	126.049	4,82
Provincia de El Loa	177.048	42.000	4,22
Comuna de San Pedro de Atacama	10.996	23.439	0,47

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2017 (INE, 2017).

En cuanto a la distribución por edad (ver *Tabla I-7*), la población comunal se concentra en los tramos de edad entre 30 a 44 años (31,1%), con un total del 93,6% de la población menor a los 64 años, valores similares a los obtenidos a escala provincial (93,3%) y regional (92,5%).

Tabla I-7: Distribución de habitantes por edad en la comuna de San Pedro de Atacama.

Grupo de Edad	Habitantes Censo 2017
0 a 14	1.799
15 a 29	2.760
30 a 44	3.417
45 a 64	2.313
65 o más	707

Fuente: Reportes comunales (BCN, 2017).

En cuanto a la distribución urbano-rural de la población, de acuerdo con el último Censo (INE, 2017) la comuna de San Pedro de Atacama presenta un equilibrio entre habitantes del sector rural (49,8%) y la población urbana (50,2%). Dichas proporciones difieren significativamente del panorama provincial y regional, los cuales presentan elevados índices de urbanización (92,6% y 94,1% respectivamente). Esta diferencia se explica en la milenaria tradición cultural del área, caracterizada por una importante presencia de comunidades indígenas Atacameñas cuya forma de vida se asocia con actividades de carácter agropecuario (Mapocho Consultores, 2017).

Tabla I-8: Relación población urbana y rural en zonas administrativas de interés.

Región, Provincia o Comuna	Población Total	Urbana		Rural	
	Hab.	Hab.	%	Hab.	%
Región de Antofagasta	607.534	571.748	94,1	35.786	5,9
Provincia de El Loa	177.048	164.011	92,6	13.037	7,4
Comuna de San Pedro de Atacama	10.996	5.524	50,2	5.472	49,8

Fuente: Mapocho Consultores (2017), en base a Censos de Población y Vivienda 1982, 1992, 2002 y 2017 (INE).

En cuanto a la evolución histórica de la población en esta comuna, como se evidenciaba en la *Tabla I-8*, se ha producido un explosivo crecimiento tanto en el período 1992-2002 (75%) como en el período 2002-2017 (120%). Ambas variaciones se explican por el efecto conjunto del auge de la actividad minera local (trabajadores desplazados por dichas faenas) y turística. Esta última está cada vez más consolidada en la comuna, resultando en una constante migración (Mapocho Consultores, 2017), y la presencia de una importante población flotante a lo largo del año, producto del flujo de turistas nacionales y extranjeros que acuden a visitar el patrimonio natural y cultural local.

I.4.5.2 Pueblos Originarios

El Estado de Chile, mediante la Ley Indígena (Ley 19.253, 1993) reconoce que los indígenas son los descendientes de quienes conformaron los asentamientos humanos existentes en el territorio nacional desde tiempos precolombinos, que conservan manifestaciones étnicas y culturales propias, siendo para ellos la tierra y el medio físico-natural el fundamento principal de su existencia y cultura (CONADI-Ingeland, 2016). Con esta Ley Indígena, el Estado Chileno reconoce como etnias indígenas que habitan en Chile a los siguientes pueblos originarios: Mapuche, Aymara, Rapa Nui, Atacameños (Lykan Antai), Quechuas, Collas, Diaguitas, Kawashkar (Alacalufe), y Yamana (Yagán).

Para su organización, la Ley Indígena 19.253 permite y reconoce la constitución de dos tipos de organizaciones: la Comunidad Indígena, que es un grupo de personas de una misma etnia indígena, vienen de un mismo tronco familiar, aceptan una jefatura tradicional, tienen o hayan tenido tierras indígenas en común, y sean de un mismo poblado antiguo (Art. 36); y la Asociación Indígena, entendida como un grupo integrado a lo menos por veinticinco personas indígenas que se organizan para trabajar por intereses comunes, como, por

ejemplo: educación, cultura, actividades profesionales comunes, planes económicos que beneficien a sus integrantes (agricultores, ganaderos, artesanos y pescadores) (Art. 36 y 37).

A continuación, se describen los pueblos originarios y organizaciones indígenas presentes en la zona administrativa de interés.

I.4.5.2.1 Comunidades Indígenas

En la Región de Antofagasta habitan, de acuerdo con el Censo 2017 (INE, 2017), comunidades indígenas pertenecientes a los pueblos: Mapuche, Aymara, Rapa Nui o Pascuenses, Lican Antai o Atacameños, Quechuas, Collas, Diaguitas, Kawésqar, y Yagán. De las 2.185.792 personas pertenecientes a pueblos originarios a nivel nacional, el 3,77% (82.404 personas) se encuentra en esta región. La distribución por etnia de esta población originaria regional se sintetiza en la *Figura I-25*.

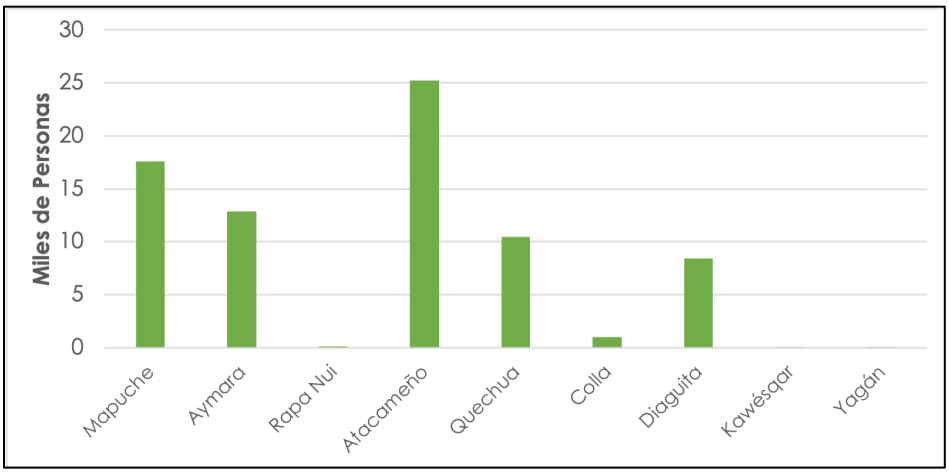


Figura I-25. Distribución de la población perteneciente a un pueblo originario por etnia, Región de Antofagasta.
Fuente: Elaboración propia en base a información del Censo 2017 Chile (INE, 2017).

De acuerdo con el Registro Nacional de Agrupaciones Indígenas (RNAI), hay un total de 45 comunidades distribuidas en las diversas provincias y comunas de la Región de Antofagasta (ver *Tabla I-9*).

Tabla I-9. Número de comunidades indígenas en la Región de Antofagasta.

Región	Provincia	Comuna	N° Comunidades
Antofagasta	El Loa	Calama	21
	El Loa	Ollague	4
	El Loa	San Pedro de Atacama	21
	Tocopilla	María Elena	1
Total			45

Fuente: Ingeland, Proyecto Georreferenciación Comunidades Indígenas Zona Norte (CONADI-Ingeland, 2016) actualizado con el Registro Comunidades Indígenas - CONADI (2020).

En cuanto a la cuenca del Salar de Atacama en particular, habitan en el territorio 21 comunidades indígenas pertenecientes a la etnia Atacameña. Su demografía se resume en la *Tabla I-10*, mientras que su ubicación geoespacial se muestra en la *Figura I-26* .

Tabla I-10. Catastro y demografía Comunidades Indígenas presentes en la cuenca del Salar de Atacama.

Provincia	Comunidad	Sector	Familias
El Loa	Atacameña de Machuca	Machuca	34
El Loa	Atacameña de Rio Grande	Río Grande	51
El Loa	Atacameña de Quitor	Ayllu de Quitor	35
El Loa	Atacameña de Coyo	Ayllu de Coyo,	80
El Loa	Atacameña de San Pedro De Atacama	San Pedro de Atacama	140
El Loa	Atacameña de Solor	Ayllu de Solor	30
El Loa	Atacameña de Socaire	Socaire	146
El Loa	Atacameña de Camar	Camar	20
El Loa	Atacameña de Talabre	Talabre	25
El Loa	Atacameña de Peine	Peine	160
El Loa	Atacameña de Toconao	Toconao	427
El Loa	Atacameña de Sequitor Y Checar	Ayllu de Sequitor	24
El Loa	Atacameña de Larache	Ayllu de Larache	25
El Loa	Atacameña de Catarpe	Catarpe	30
El Loa	Atacameña de Solcor	Ayllu de Solcor	15
El Loa	Atacameña de Yaye	Ayllu de Yaye	12
El Loa	Atacameña de Guatin	Guatin	16
El Loa	Atacameña de Puna de Tocon, Alis, Celeste y Puques	Valle de Puques	-
El Loa	Atacameña de Cucuter	Ayllu de Cucuter	8
El Loa	Atacameña de Agricultores y Regantes del Río Vilama	Vilama	12
El Loa	Atacameña Tulor y Beter	Ayllu de Tulor y Ayllu de Beter	-

Fuente: Elaboración propia en base a CONADI-Ingeland (2020) y actualizado con el Registro Comunidades Indígenas CONADI (2020).

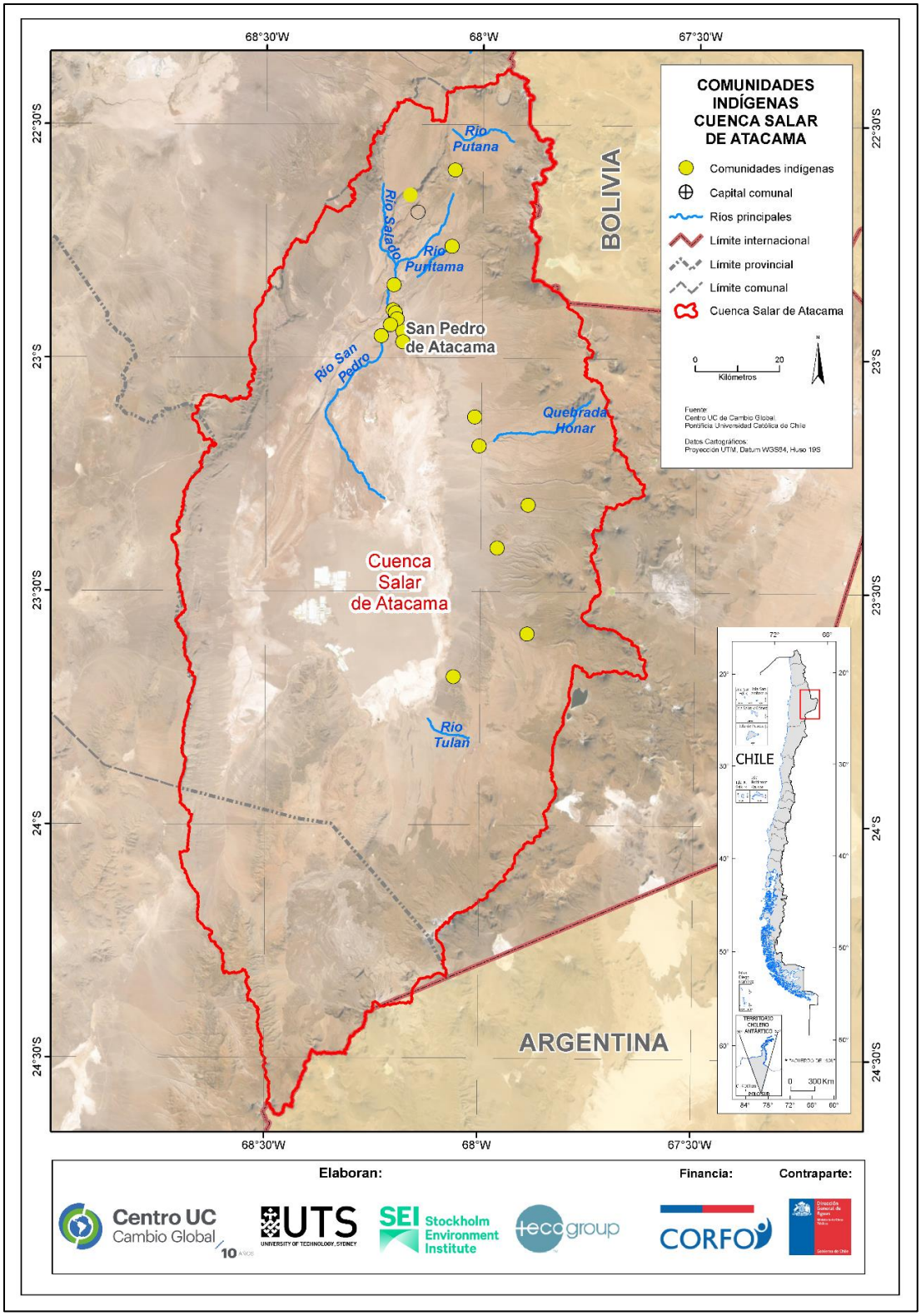


Figura I-26: Distribución de comunidades indígenas en la cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración propia a partir de información de CONADI-Ingeland (2016)
Nota: en esta figura no se consideran las comunidades "Comunidad Indígena Atacameña de Tulor y Beter" ni "Comunidad Indígena Atacameña de Agricultores y Regantes del Río Vilama" creadas con posterioridad al 2016.

I.4.5.2.2 Asociaciones indígenas

Bajo el alero de las Asociaciones Indígenas, se crea en el año 1994 el Consejo de Pueblos Atacameños (CPA), como una organización de segundo orden que aglutine a las comunidades indígenas Atacameñas (Prieto, 2014). Su principal objetivo consiste en proteger y promover el etnodesarrollo, valorar y preservar la cultura atacameña, velando por el fortalecimiento del espíritu de comunidad y solidaridad entre sus miembros. El CPA se articula entonces como una instancia de reunión en que los presidentes de las comunidades indígenas pueden reunirse en representación de sus comunidades y emprender acciones conjuntas sobre temáticas variadas (Arrau EIRL., 2014).

Esta organización es dirigida y administrada por una directiva elegida por asamblea general ordinaria (presidente, secretario, tesorero y directores), y se encuentra al nivel de los involucrados funcionando como órgano asesor de las comunidades (CONAF, 2008). A pesar de que su dirigencia ha ido cambiando en el tiempo, al 2020 el CPA agrupa a 18 comunidades Atacameñas localizadas en la comuna de San Pedro de Atacama (ver *Tabla I-11*).

Tabla I-11: Comunidades indígenas Atacameñas pertenecientes al Consejo de Pueblos Atacameños.

Comunidad indígena Atacameña
Machuca
Río Grande
Quitor
Ayllu de Coyo
San Pedro de Atacama
Solor
Camar
Socaire
Talabre
Peine
Toconao
Sequitor
Larache
Catarpe
Ayllu de Solcor
Ayllu de Cucuter
Yaye
Guatin

Fuente: Pagina web del CPA[2].

[2] http://www.lickanantay.com/#!/-consejo-pueblos-atacamenos/

I.4.5.2.3 Cosmovisión Atacameña y prácticas ancestrales

Todas las comunidades indígenas que habitan en la cuenca del Salar de Atacama pertenecen Al puebloatacameño o *Licán-Antai*. La cosmovisión de este pueblo originario se expresa en una profunda y recíproca relación entre el hombre y la naturaleza, siendo su principal deidad la "Pachamama" o madre tierra. Asimismo, espíritus viven en cada manifestación natural, de entre de las cuales, los cerros son una de las más relevantes, puesto que de ellos depende la bonanza, ya sea por la provisión de forraje a los animales, por los minerales que se ocultan en su interior, o por el surgimiento de cursos de agua (ODEPA, 2011). Viva imagen de esta relación es la ceremonia del Convido, en la cual se ofrecen alimentos y bebidas a la madre tierra (*Patahoiri*), al agua (*tata-putarajni*), y a los antepasados míticos o *Mallkus*que (Biblioteca Nacional de Chile, 2020).

La identidad cultural Atacameña se conforma y refuerza en la comunidad, unidad organizacional que cimienta la estructura social, cultural, política y económica de este pueblo. Es en las comunidades donde se definen las responsabilidades, la participación, la colaboración y la toma de decisiones sobre el desarrollo presente y futuro de cada localidad. Las comunidades pueden estar compuestas por familias residentes en distintos territorios o localidades, además de incorporar a quienes han migrado a los centros urbanos para participar del mercado laboral formal e informal (ODEPA, 2011).

Las fiestas y ceremonias tradicionales del pueblo Atacameño que se celebran en la actualidad incluyen el carnaval, la limpia de canales (*talatur*), el floramiento del ganado y el culto a los antepasados o gentiles. Todas estas prácticas en torno a la religión y el culto de origen prehispánico subsisten de distintas formas con la religión católica y evangélica, generando matices y particularidades en cada comunidad y unidad familiar (Biblioteca Nacional de Chile, 2020). Por ejemplo, en las fiestas patronales cada comunidad rinde homenaje a Santos Patronos católicos o divinidades que protegen a sus habitantes, quienes lo veneran por sus atributos milagrosos (ej., la protección del ganado que se le atribuye a San Antonio). Todas estas tradiciones toman además un rol aglutinador al convocar a los habitantes en las fechas de las celebraciones. En este sentido, las localidades ceremoniales y comerciales más importantes son Caspana, Peine, Socaire, San Pedro de Atacama y Toconao (MOP, 2011).

I.4.5.3 Actividad Económica

En el presente apartado se describe de forma agregada la actividad económica presente en la Región de Antofagasta, destacando la importancia del sector minero (principalmente por cobre), y su incidencia en el presupuesto (exportaciones) y desarrollo nacional. Luego, el análisis se enfoca en la actividad económica existente en la cuenca del Salar de Atacama, en donde la significativa presencia de comunidades indígenas Atacameñas pone como eje central a la actividad agrícola y turística, las cuales se entrelazan con una creciente actividad minera de la industrial del litio.

De acuerdo a información del Banco Central (2018), el Producto Interno Bruto Regional (PIBR) del año 2018 para la Región de Antofagasta alcanzó los 14.884 miles de millones de

pesos, representando el 10% del PIB nacional, y ocupando el segundo lugar a nivel país. Destaca el alto crecimiento que tuvo este indicador (más de un 9%) en el último período, tal y como se aprecia en la Figura I-27.

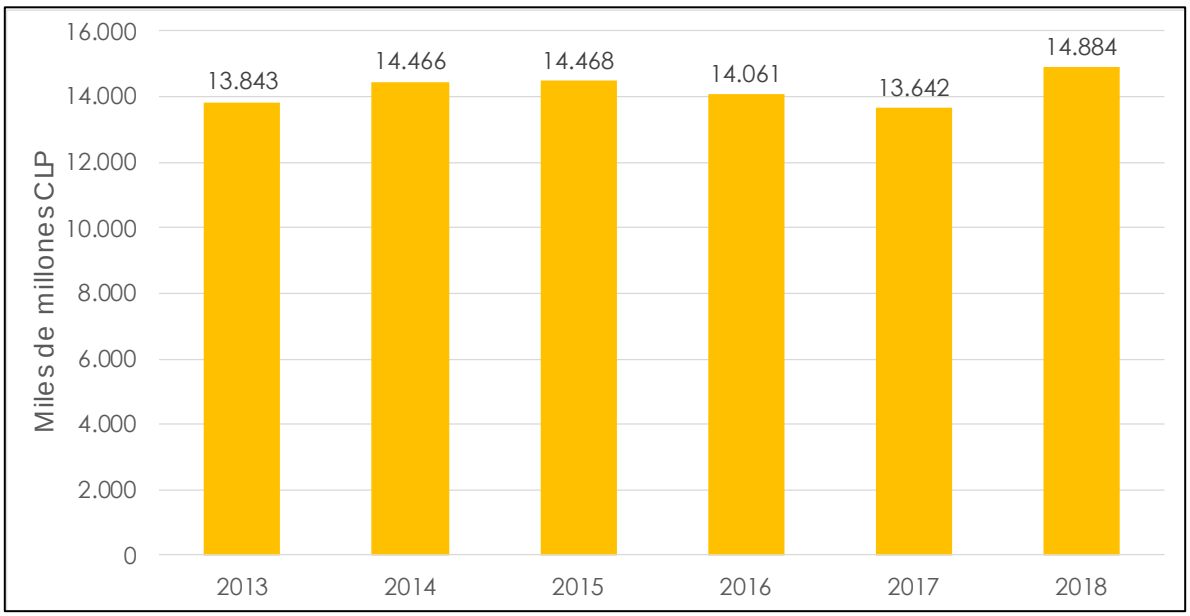


Figura I-27: Producto Interno Bruto Regional anual Antofagasta
Volumen a precios del año anterior encadenado en miles de millones de pesos.
Fuente: Elaboración propia en base a información del Banco Central (2018).

La principal actividad económica de la Región de Antofagasta es la minería, la cual representa en promedio el 53% (período 2013-2017) de la economía, lo que se refuerza considerando que cerca del 45% del PIB minero se genera en esta región. El segundo sector económico relevante para la región es el de la construcción, el cual aporta en promedio un 10,7% a la economía, seguido del sector de servicios financieros y empresariales con un 10,3%, tal y como se muestra en la *Figura I-28*.

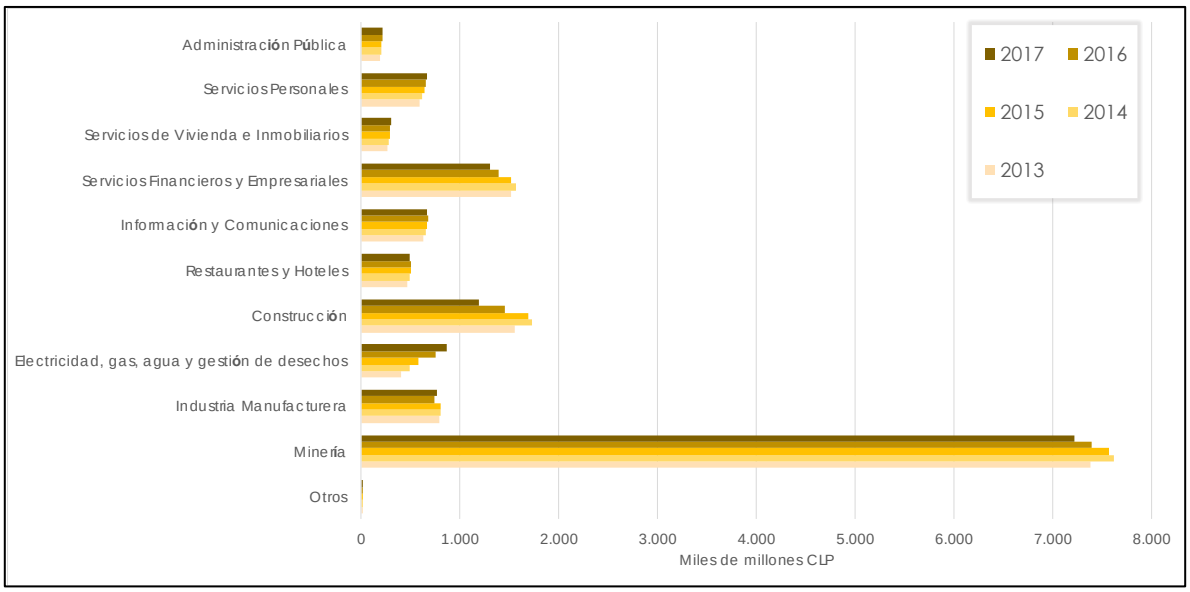


Figura I-28: Producto Interno Bruto anual por actividad económica en la Región de Antofagasta. Volumen a precios del año anterior encadenado en miles de millones de pesos.

Fuente: Elaboración en base a información del Banco Central (2018).

De acuerdo con el anuario estadístico del Servicio Nacional de Aduanas (2019), la exportación nacional del sector minero del año 2018 representó el 56,9% de las exportaciones totales del país y alcanzó los 43.319 millones de dólares FOB, lo que significó un alza del 11,1% respecto al año anterior. De dichas exportaciones mineras, el 47,5% correspondió a ventas del cobre y sus derivados, de los cuales un 57% provino de la Región de Antofagasta, es decir, 20.592 millones de USD. Además de la importante actividad minera del cobre que se desarrolla en las diversas operaciones mineras ubicadas en la Región de Antofagasta, esta destaca también por ser la única en producir y exportar compuestos de litio en Chile, y una de las más importantes a nivel mundial.

A continuación, se describen con mayor detalle aquellas actividades económicas que tienen una relación directa con el uso y la disponibilidad de recursos hídricos. En la cuenca del Salar de Atacama se reconocen tres sectores económicos dentro de esta categoría: la agricultura, el turismo y la minería[3].

[3] Respecto del sector económico asociado a la producción de energía se han revisado los antecedentes disponibles y se ha decidido en función de estos no considerarlo como un sector económico relevante en relación a la gestión de recursos hídricos en esta cuenca. Son dos tipos de proyectos de generación eléctrica que podrían tener una relación con la gestión de recursos hídricos en la cuenca del Salar de Atacama: generación fotovoltaica y geotérmica. En el caso de la generación fotovoltaica en fase de operación existe un consumo del orden de 11 m3/MW-año para limpieza de paneles fotovoltaicos, lo que se provee en general por camiones aljibes a través de empresas autorizadas. Actualmente la región cuenta con 962MW en operación, pero la cantidad de proyectos en construcción y con RCA aprobada quintuplica los proyectos en operación. Por lo que en el mediano plazo la demanda regional para limpieza de paneles podría alcanzar ~50.000 m3/año.

I.4.5.3.1 Agricultura

Este apartado describe la actividad agrícola dentro de la cuenca del Salar de Atacama de acuerdo a las referencias Arrau EIRL. (2012), Arrau EIRL. (2014), Ayala, Cabrera y Asociados Ltda.-CNR. (2003), Sepúlveda (2015). Cabe destacar que, dada la escasez de recursos hídricos y a la salinidad de los suelos, es que la actividad silvoagropecuaria es poco gravitante en términos regionales (agrupada en la categoría Otros en la *Figura I-28*). Sin embargo, tiene una gran importancia para las comunidades de los valles y oasis del interior, para los cuales corresponde a una actividad de subsistencia y una forma de vida.

Respecto a la actividad agrícola de la región de Antofagasta, las comunas de San Pedro de Atacama y Calama son las que poseen una mayor cantidad de hectáreas regadas, gracias a su eficiencia de riego y también a otros factores en el desarrollo de la actividad agrícola, como el asentamiento de población (especialmente comunidades indígenas), la disponibilidad de recursos hídricos en cantidad y calidad, la capacidad de conducir los recursos hídricos por parte de los agricultores y la capacidad agrícola del suelo. La superficie regada para la comuna de San Pedro de Atacama en la Provincia de El Loa clasificada según cultivo se elabora a partir de información del INE (2007) y se presenta en la Tabla I-12.

a nivel regional. Por su parte los proyectos de Geotermia no consumen agua en la fase de operación, salvo por los requerimientos de aguas potable para sus trabajadores.

Tabla I-12: Superficie regada por grupo de cultivo y comuna

Provincia	Comuna	Cereales, leguminosas y tubérculos (há)	Industriales (há)	Hortalizas (há)	Flores (há)	Frutales y huertos caseros (há)	Viñas y parronales viníferos (há)	Plantas forrajeras (há)	Total (há)
El Loa	San Pedro de Atacama	56,12	0	123,02	0,09	135,3	6,0	750,65	1.071,2

Fuente: (INE, 2007)

El informe estadístico del Censo agropecuario contiene además la superficie regada por tipo de cultivo y por rubro, los cuales se presentan en la Tabla I-13.

Tabla I-13: Superficie regada por rubro y comuna

Grupo	Rubro	San Pedro de Atacama (há)
Cereales, leguminosas y tubérculos	Otras Chacras	0,0
	Otros cereales	0,0
	Cebada forrajera	0,3
	Papa	3,6
	Quínoa	7,3
	Trigo Candeal	0,0
	Trigo blanco	17,8
	Centeno (grano seco)	1,2
	Maíz (grano seco)	26,0
Industriales	Otras plantas medicinales permanentes cultivadas	0,0
	Otros industriales	0,0
Hortalizas	Acelga	0,0
	Ajo	10,2
	Albahaca	0,0
	Apio	0,0
	Betarraga	0,0
	Cebolla temprana	0,3
	Choclo	82,4
	Cilantro	0,0
	Coliflor	1,0
	Espinaca	0,0
	Haba	14,8
	Huerta casera	9,4
	Lechuga	1,0
	Otras hortalizas	2,7
	Perejil	0,0
	Rábano o Nabo	0,0
	Tomate consumo fresco	0,2
	Zanahoria	0,6
	Zapallo temprano y de guarda	0,5
Flores	Flores	0,1
Frutales y huertos caseros	Chirimoyo	0,0
	Ciruelo japonés	1,5
	Damasco	0,2
	Higuera	0,0
	Huerto casero	83,0
	Limonero	3,6
	Manzano rojo	1,0
	Manzano verde	3,6
	Membrillo	12,7
	Naranjo	3,9
	Níspero	0,0

Grupo	Rubro	San Pedro de Atacama (há)
	Olivo	1,6
	Otros frutales	4,8
	Palto	0,0
	Peral europeo	14,9
	Tuna	1,1
	Uva de mesa	3,6
Viñas y parronales viníferos	Tintas viníferas corrientes	4,2
	Blancas viníferas corrientes	1,6
	Blancas viníferas finas	0,2
Plantas Forrajeras	Plantas Forrajeras	750,7
Total		1.071,2

Fuente: (INE, 2007)

La demanda hídrica anual del sector agrícola producto de los cultivos descritos anteriormente para la cuenca del Salar de Atacama se estima en 33.537.341 m^3/año (Arrau EIRL. (2012)).

Además de estas localidades, existen otros productores agrícolas menores en la cuenca del Salar de Atacama, los cuales corresponden a los sectores de Río Grande, Toconao, Talabre, Camar, Socaire, Peine y Machuca. Sus superficies de riego se muestran en la Tabla I-14 y la Figura I-29.

Tabla I-14: Superficie de riego en la cuenca del Salar de Atacama.

Territorio/Localidad	Superficie Bajo Riego (Ha)
San Pedro De Atacama Más Ayllus	1.635
Río Grande	49
Toconao	92
Talabre	15
Camar	15
Socaire	220
Peine	28
Machuca	20

Fuente: ARCADIS, (2016).

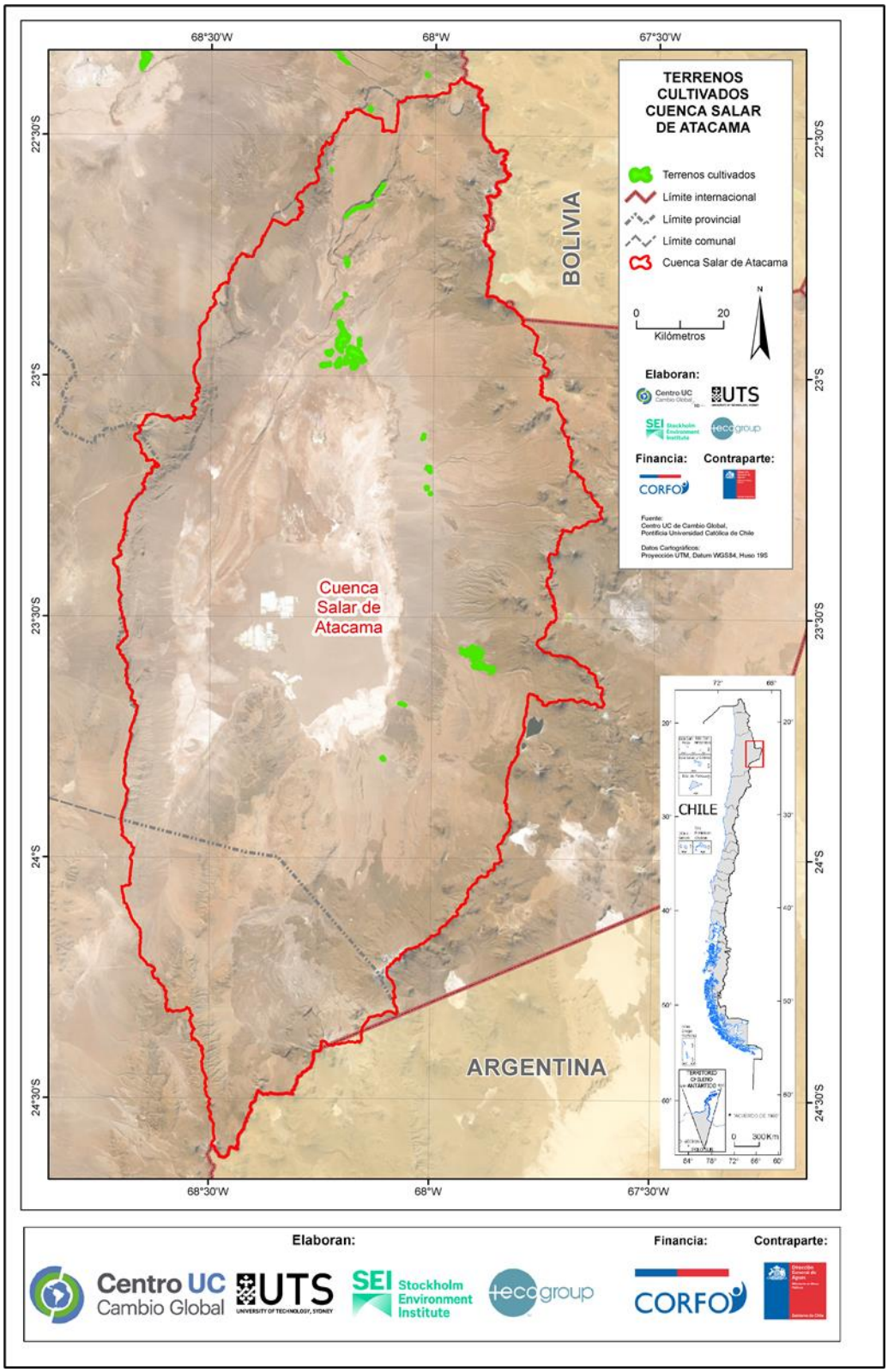


Figura I-29: Terrenos cultivados en la cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración propia a partir de información del MMA.

Respecto al ganado existente en la cuenca del Salar de Atacama, la zona no presenta importancia relativa en las existencias de dichos animales, ya que en la mayoría de las especies sólo se presentan pequeñas cantidades en el número de animales. Sin embargo, el Censo agropecuario del INE (2007) identifica un número menor de ganado, el cual se muestra en la Tabla I-15.

Tabla I-15: Existencia de ganado en explotaciones agropecuarias en la comuna de San Pedro de Atacama

Especie de ganado	N° de cabezas
Bovinos	126
Ovinos	5.560
Cerdos	446
Equinos (total)	906
Caballares	217
Mulares	46
Asnales	643
Caprinos	3.981
Camélidos (total)	3.200
Alpacas	45
Llamas	3.155
Conejos	2.550

Fuente: (INE, 2007).

I.4.5.3.2 Turismo

San Pedro de Atacama es el destino turístico más reconocido de la Región de Antofagasta (SERNATUR, 2014a), y uno de los más importantes a nivel nacional, debido al gran valor arqueológico, arquitectónico, cultural, ecológico, natural, geográfico y paisajístico de sus atractivos. Al clasificarlos entre "nacionales" e "internacionales" de acuerdo con el impacto económico y su visibilidad, tenemos los siguientes en la comuna de San Pedro de Atacama:

Tabla I-16: Atractivos Turísticos de jerarquía nacional e internacional en la comuna de San Pedro de Atacama.

N°	Nombre	Jerarquía	N°	Nombre	Jerarquía
1	Aldea de Tulor	Nacional	**18**	Radio Observatorio ALMA	Nacional
2	Campanario de Toconao	Nacional	**19**	Reserva Nacional Los Flamencos	Nacional
3	Canteras de Liparita	Nacional	**20**	Salar de Atacama	Internacional
4	Cordillera de la Sal	Nacional	**21**	Salar de Pujsa	Nacional
5	Iglesia de San Pedro de Atacama	Nacional	**22**	Salar de Tara	Internacional
6	Laguna Barros Negros	Nacional	**23**	Termas de Puritama	Nacional
7	Laguna de Chaxa	Nacional	**24**	Testigos de la Pacana	Nacional
8	Laguna de Tara	Nacional	**25**	Toconao	Nacional
9	Laguna Miñiques	Nacional	**26**	Valle de la Luna y parte de la Sierra de Orbate	Internacional
10	Laguna Miscanti	Nacional	**27**	Valle de la Muerte	Nacional
11	Laguna Tebenquiche	Nacional	**28**	Volcán Lascar	Nacional
12	Laguna Tuyajto y Piedras Rojas	Internacional	**29**	Volcán Licancabur	Internacional
13	Museo Arqueológico Reverendo Padre Gustavo Le Paige	Internacional	**30**	Volcán Putana	Nacional
14	Plaza de San Pedro de Atacama	Nacional	**31**	Valle del Arco Iris	Internacional
15	Pueblo de San Pedro de Atacama	Internacional	**32**	Petroglifos Yerbas Buenas	Nacional
16	Pukara de Quitor	Internacional	**33**	Cerro Toco	Nacional
17	Quebrada del Diablo	Nacional	**34**	Quebrada de Guatin	Nacional

Fuente: Plan de Acción Región de Antofagasta sector turismo 2014-2018 (SERNATUR, 2014a).

Para cuantificar la significativa actividad turística en la comuna que representan estos destinos, las estadísticas del Servicio Nacional de Turismo (a nivel de turismo formal) para los tres últimos años de medición (2015, 2016 y 2017) registran un promedio de 166.149 llegadas de visitantes a la comuna. En particular, la última Encuesta Mensual de Alojamiento Turístico

indica 506.259 pernoctaciones durante el año en la comuna, siendo el 28% de estos extranjeros, con una estadía media de 2,53 días. El informe reporta además una tasa de ocupación por turismo habitacional de 45,5% en plazas, tasa que aumentó a 46,2% en diciembre de 2019 (INE, 2020).

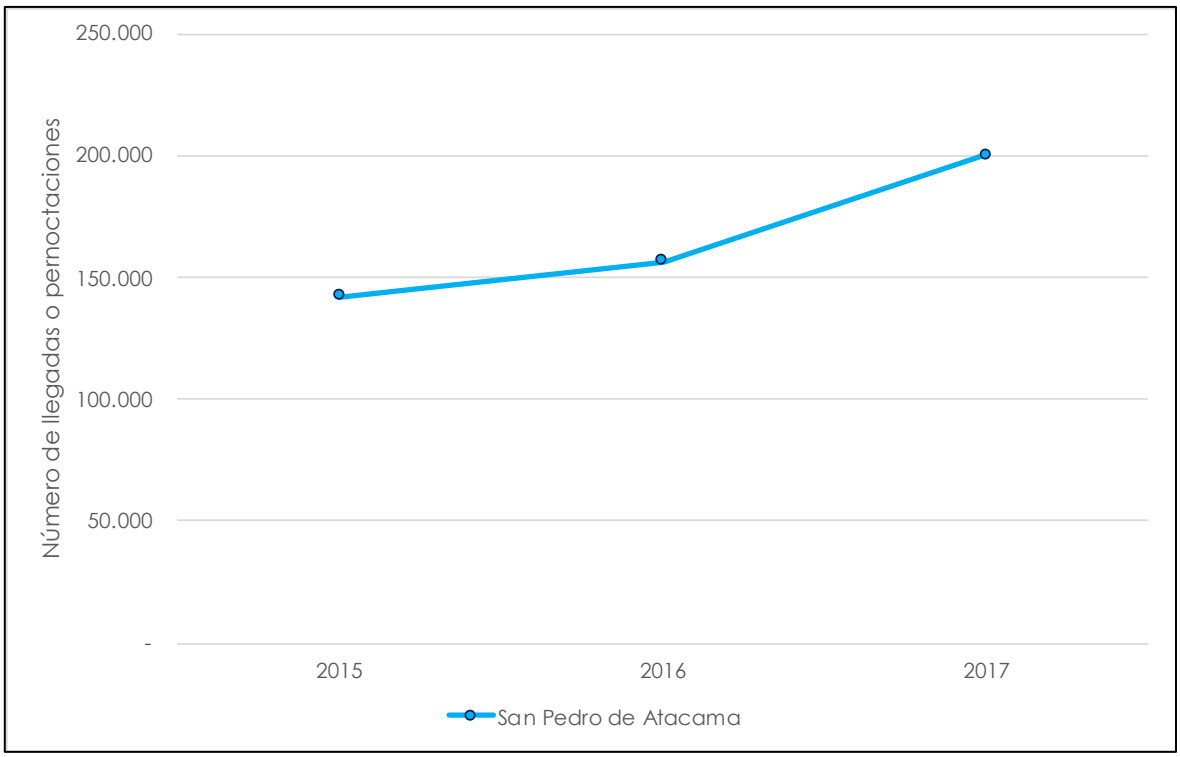


Figura I-30: *Llegadas de pasajeros (chilenos y extranjeros) a la comuna de San Pedro de Atacama.*
Fuente: Elaboración propia en base a Encuestas Mensuales de Alojamiento Turístico (INE, 2015, 2016, 2017).

Por otro lado, CONAF reporta un incremento en las visitas a la Reserva Nacional los Flamencos, principal destino turístico de la región y segundo destino turístico más importante del país (Sernatur, 2014a), de casi 4000% entre el 2001 y el 2018, lo cual significó aumentar desde 16.249 a 627.154 turistas (ver *Figura I-31*).

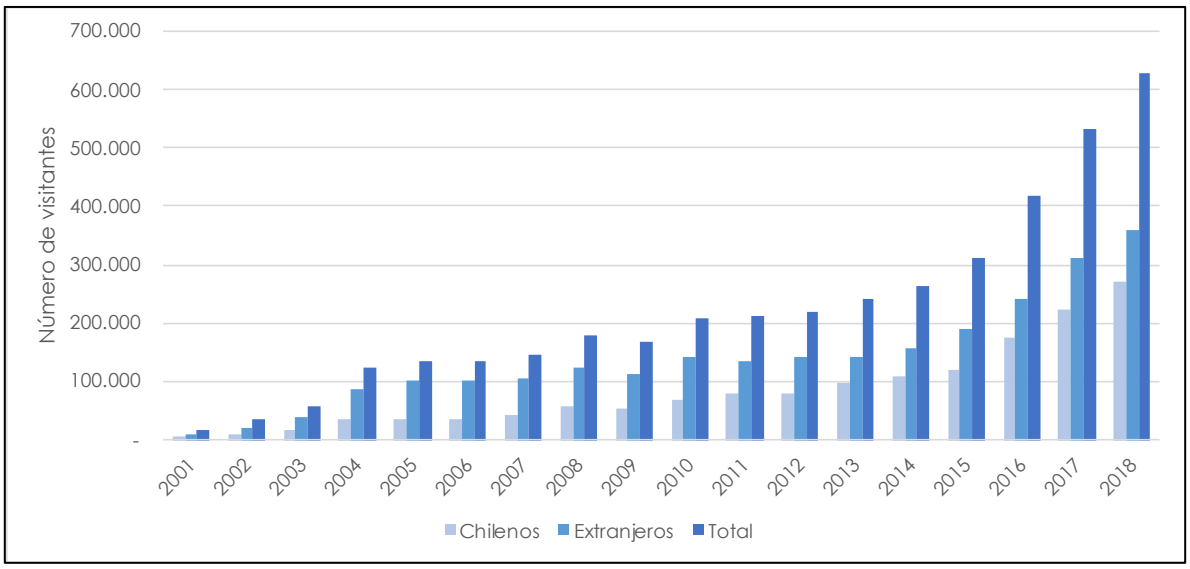


Figura I-31: Número de visitantes a Reserva Nacional Los Flamencos
Fuente: Elaboración propia en base a Estadísticas de visitación a SNASPE (CONAF, diferentes años).

I.4.5.3.3 Minería

La minería es la principal actividad económica de la Región de Antofagasta. A nivel de la comuna de San Pedro de Atacama, este sector económico también tiene una fuerte presencia, especialmente en relación a la actividad de minería no metálica, debido a las importantes reservas de litio y otros minerales como boro, potasio y magnesio existentes en el Salar de Atacama, y la desarrollada industria de minería no metálica que le sigue. Pese a no existir faenes de minería metálica en la cuenca del Salar de Atacama, si existen actividades relacionadas con extracciones de agua en el sector sur de la cuenca.

Para contextualizar la importancia de este sector económico, la Figura I-32 sintetiza las reservas mundiales de litio (económicamente rentables), las cuales alcanzaron 14 millones de toneladas al 2018 (USGS, 2019). De estas, Chile controla más de la mitad (57%), ubicadas en su mayoría en el Salar de Atacama, seguido de Australia (19%) y Argentina (14%). Acá, es importante notar que el núcleo del salar presenta las más altas concentraciones de litio del mundo, las cuales sumadas a las favorables condiciones climáticas de la región (las altas tasas de evaporación) y las altas concentraciones de subproductos para ser explotados (principalmente potasio), lo vuelven uno de los salares más relevantes en el mundo (COCHILCO, 2013).

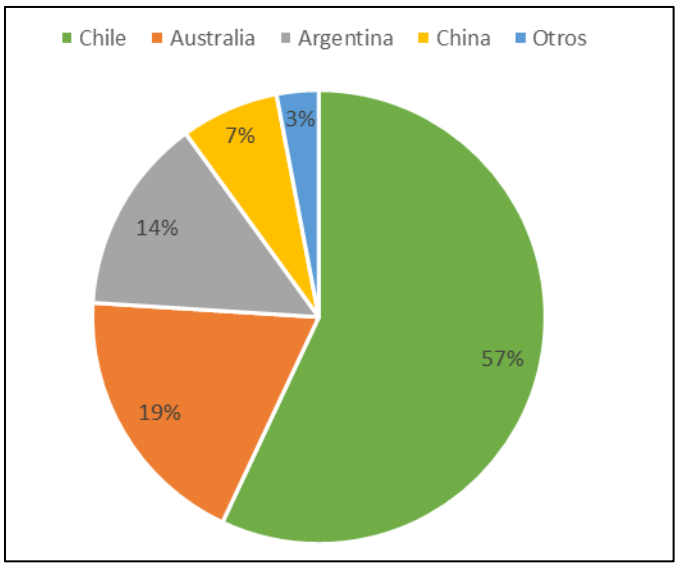


Figura I-32: Reservas de litio mundiales en toneladas al año 2018.
Fuente: Elaborado en base a información de la USGS (2019)

En cuanto a la demanda mundial de litio, este ha registrado un crecimiento significativo en los últimos 10 años, llegando a las 221.000 toneladas de Carbonato de Litio Equivalente (LCE) el 2017, lo que da cuenta de la importancia de este recurso en la industria y en la manufactura de baterías. (Cochilco, 2018). De mantenerse las tasas de crecimiento durante los próximos años, se espera que una demanda cercana a un 1.000.000 de toneladas de LCE para el 2025.

La explotación, producción y comercialización de productos que se extraen de la salmuera, como los compuestos de litio (carbonato de litio, hidróxido de litio y cloruro de litio), potasio (cloruro de potasio y sulfato de potasio), y boro (ácido bórico) en el Salar de Atacama, se realiza por las empresas Albemarle y SQM. Aunque Chile ha focalizado la producción nacional mayoritariamente en carbonato de litio, existe una producción anual menor de cloruro de litio e hidróxido de litio. En la Figura I-33 se muestra la evolución de la producción mundial de litio por país de origen, mientras que la Figura I-34 sintetiza la producción nacional. De estas figuras se aprecia que Chile tiene las mayores reservas identificadas del mundo, lo que no se traduce en términos de producción, siendo superada por Australia en los últimos años.

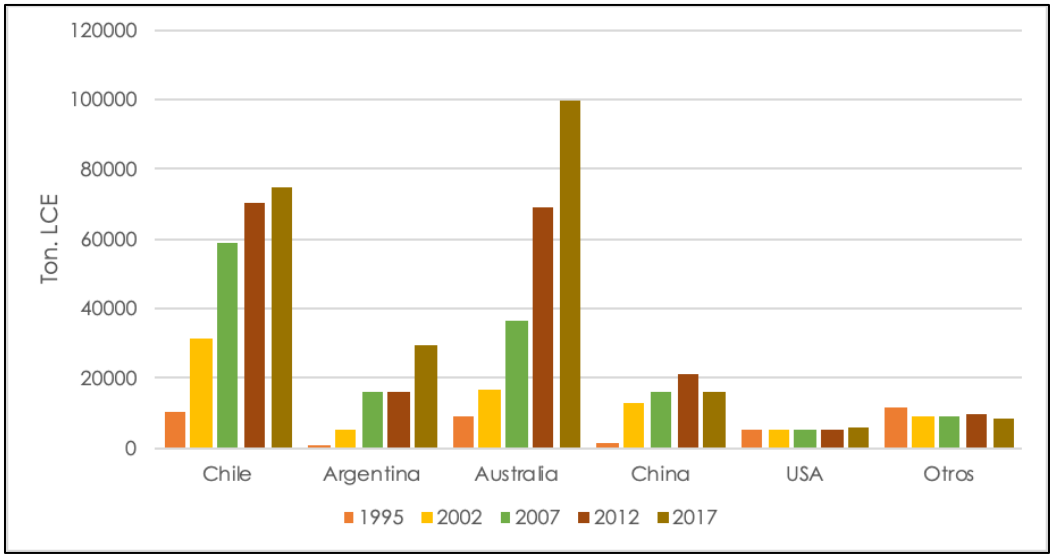


Figura I-33: Evolución de la producción mundial de litio.
Fuente: Elaborado en base a información de la USGS (1995, 2002, 2007, 2012, 2017).

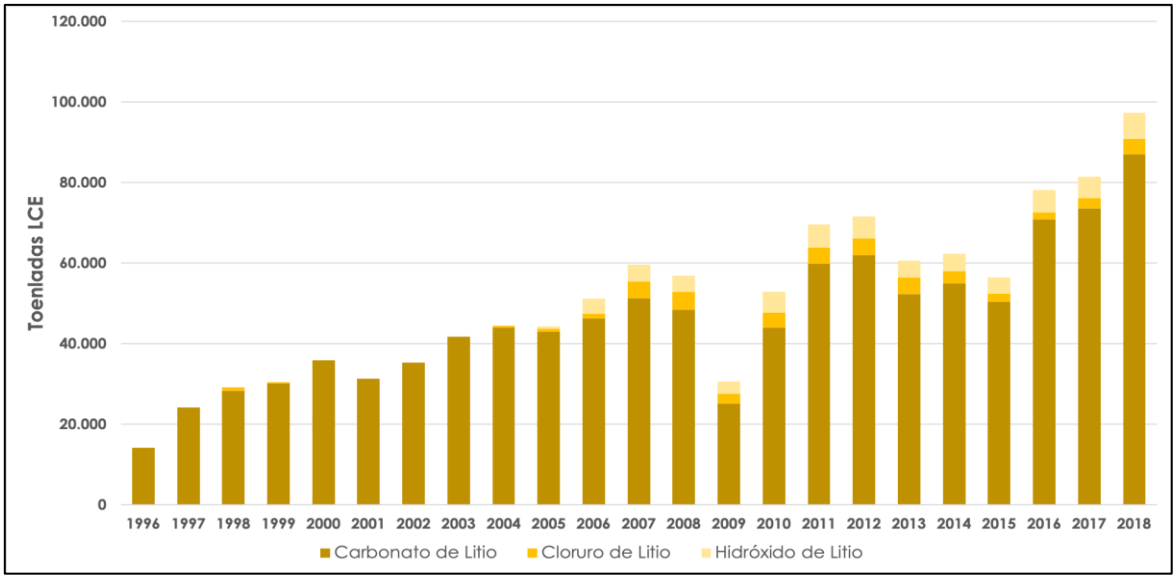


Figura I-34: Evolución de la producción nacional de litio.
Fuente: Elaborado en base al Anuario de la Minería de Chile de cada año publicado por SERNAGEOMIN.

I.4.6 Descripción de la gestión del recurso hídrico

En esta sección se describen los elementos críticos asociados a la gestión de recursos hídricos de la cuenca incluyendo actores relevantes que participan de esta gestión e instrumentos y herramientas de gestión de estos recursos y recursos complementarios. Se incluyen también dentro de la descripción de estas herramientas una revisión básica de los sistemas de monitoreo de los distintos medios (físico, biótico y humano) relevantes para la gestión de recursos hídricos.

I.4.6.1 Actores relevantes en la gestión de los recursos hídricos

De acuerdo con la "Guía de Elaboración de Planes" de la DIRPLAN (2011), las instituciones con competencia en la gestión del agua pueden clasificarse en: públicas, privadas, y de la comunidad (sociedad civil)[4]. Esta clasificación se utilizará para la caracterización de actores (instituciones) involucradas con la gestión del recurso hídrico (directa o indirectamente).

A nivel público, existen una serie de servicios especializados nacionales y sus equivalentes a nivel regional, relevantes para la gestión de recursos hídricos, todos los cuales se detallan en la *Tabla I-17*. A nivel de la cuenca, sin embargo, deben sumarse a esta lista aquellos organismos pertenecientes a la comuna de San Pedro de Atacama, como la Municipalidad de San Pedro de Atacama.

Tabla I-17: Instituciones públicas con rol relevante en la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Salar de Atacama.

Nivel Nacional	Nivel Regional
Poder Ejecutivo	Gobierno Regional de Antofagasta
Presidencia	Intendencia Regional
	Gobernación Provincial El Loa
Ministerio del Interior y Seguridad Pública	Dirección Regional Oficina Nacional de Emergencias, ONEMI
Ministerio de Economía	Dirección Regional de Servicio Nacional de Turismo, SERNATUR
Ministerio de Desarrollo Social	Dirección Regional Corporación Nacional de Desarrollo Indígena, CONADI
Ministerio de Obras Públicas	Dirección Regional Planeamiento del Ministerio de Obras Publicas
	Dirección Regional de Aguas
	Dirección Regional Obras Hidráulicas
Ministerio de Agricultura	Dirección Regional de la Corporación Nacional Forestal, CONAF
	Comisión Nacional de Riego (Oficina Regional), CNR
	Dirección Regional de Instituto de Desarrollo Agropecuario, INDAP
	Dirección Regional del Servicio Agrícola y Ganadero, SAG
Ministerio de Minería	Dirección Regional de Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN
Ministerio del Medio Ambiente	Secretaría Regional Ministerial del Medio Ambiente
	Dirección Regional del Servicio de Evaluación Ambiental

Fuente: Elaborado en base a CNR-Arrau, (2012).

A un nivel privado, es posible distinguir entre: (1) Organizaciones de Usuarios de Aguas, y (2) Empresas usuarias de recursos hídricos (*Tabla I-18*). Las primeras corresponden a organizaciones que se forman por dos o más personas que poseen derechos de

[4] Se describen de manera especial las comunidades indígenas

aprovechamiento en las aguas de un mismo canal, embalse, o aprovechan las aguas de un mismo acuífero o cauce natural. Mientras que las segundas corresponden a usuarios privados que hacen uso de sus aguas de acuerdo a sus derechos concedidos, ya sean permanentes o eventuales (CNR-Arrau, 2012).

Tabla I-18: Actores Privados con un rol relevante en la gestión de los recursos hídricos.

Actores Privados	
Organizaciones de Usuarios de Aguas	Juntas de Vigilancia
	Asociaciones de canalistas
	Comunidades de agua
Empresas Usuarias Privadas	Sector sanitario
	Organizaciones de regantes y agricultores

Fuente: CNR -Arrau, (2012).

A nivel de la cuenca del Salar de Atacama, no existen Juntas de Vigilancias ni asociaciones de canalistas constituidas formalmente. Solo se observan las comunidades de agua como forma de organización de usuarios de agua.

En la cuenca, la forma de organización principal de la población es a través de las comunidades indígenas, tales como la comunidad atacameña de Toconao, la comunidad atacameña de Talabre, la comunidad atacameña de Peine, la comunidad atacameña de Camar, la comunidad atacameña de Socaire y finalmente la asociación atacameña de Regantes y Agricultores de Aguas Blancas (entre otras). A través de ellas se gestionan los recursos hídricos y turnos de riego (CNR, 2017). Cabe destacar que también existen juntas de vecinos, organizaciones territoriales que vinculan en el territorio a las personas que no son indígenas.

Cuentan con la capacitación y el apoyo de CONADI e INDAP para aumentar la productividad y producción de sus recursos. El principal interés que posee las comunidades es el de mantener la actividad agrícola familiar, una actividad que es fundamental para conservar la tradición ancestral heredada.

Para el área de San Pedro de Atacama la forma de organización corresponde también a comunidades indígenas y asociaciones de regantes, donde la comunidad atacameña de Río Grande organiza a todas las comunidades indígenas del pueblo de San Pedro de Atacama, que corresponden a los Ayllus de Quitor, Condeduque, Yaye, Larache, Solcor, Checar, Sequitor, Coyo, Solor, Tulor, Better, Pononche y Cucuter.

La gestión de los caudales otorgados para la Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores de San Pedro de Atacama, para el caso del río San Pedro, fue organizada en 7 grupos, los cuales tienen una alta capacidad de propuestas para proyectos e iniciativas. En esta zona se presentan conflictos relativos a las actividades de los comuneros dedicados al turismo y por la postura que existe ante la ejecución de proyectos de regulación (CNR, 2017). Asimismo, para el caso del río Vilama, se identifica a la Asociación de Regantes y Agricultores del Río Vilama la cual administra y gestiona las aguas del río homónimo,

influyendo sobre los Ayllus de Guatin, Vilama, Poconche, Beter y Tulor. Aun cuando es posible identificar las fuentes hídricas e infraestructura (canales) asociada a ambas Asociaciones en estudio DGA-LAT (2018) sobre Diagnóstico Nacional sobre Organizaciones de Usuarios, las organizaciones antes descritas no se encuentran caracterizadas con mayor detalle (ej. N° de regantes, uso del recurso, etc). Por otro lado, a partir del registro de derechos de aprovechamiento de agua concedidos de acuerdo con el Catastro Público de Aguas, se identifican los siguientes usuarios de aguas superficiales y subterráneas pertenecientes a distintos sectores productivos. (*Tabla I-19* y Tabla I-20 respectivamente).

Tabla I-19: Usuarias dueños de derechos de agua superficiales en la cuenca del Salar de Atacama.

Código de Expediente	Titular	Caudal (l/s)
ND-0202-2744	Comunidad Atacameña Toconao	65,00
ND-0202-2741	Sendos	0,47
ND-0202-2743	Prelatura de Calama	20,00
ND-0202-2728	Albemarle	8,50
ND-0202-5065	Juan Acevedo Jamett	38,00
NR-0202-55	Junta Vecinos Toconao	8,00
NR-0202-468	Usuarios Agrícolas del Valle de Zapar	20,00
NR-0202-530	Lucila Menanteau	45,00
NR-0202-1284	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores de Toconao	10,00
NR-0202-1379	Comunidad Atacameña de Talabre	10,80
NR-0202-1379	Comunidad Atacameña de Talabre	12,70
NR-0202-1379	Comunidad Atacameña de Talabre	4,30
NR-0202-1379	Comunidad Atacameña de Talabre	18,50
NR-0202-1381	Asoc. Atacameña de Regantes y Agricultores de Aguas Blancas	110,00
NR-0202-1383	Comunidad Atacameña de Peine	18,60
NR-0202-1383	Comunidad Atacameña de Peine	1,70
NR-0202-1383	Comunidad Atacameña de Peine	43,00
NR-0202-1384	Asoc. Atacameña de Regantes y Agricultores de Toconce	60,00
NR-0202-1385	Comunidad Atacameña de Camar	3,20
NR-0202-1385	Comunidad Atacameña de Camar	10,40
NR-0202-1385	Comunidad Atacameña de Camar	2,70
NR-0202-1385	Comunidad Atacameña de Camar	3,40
NR-0202-1385	Comunidad Atacameña de Camar	6,90
NR-0202-1386	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores de Soncor	12,30
NR-0202-1388	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores de Celeste	4,00
NR-0202-1389	Comunidad Atacameña de Socaire	130,00
NR-0202-1389	Comunidad Atacameña de Socaire	5,00
NR-0202-1390	Comunidad Atacameña de Machuca	10,00

NR-0202-1390	Comunidad Atacameña de Machuca	3,80
NR-0202-1391	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores del Rio Vilama	180,00
NR-0202-1391	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores del Rio Vilama	21,00
NR-0202-1391	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores del Rio Vilama	10,00
NR-0202-1391	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores del Rio Vilama	10,00
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	870,00
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	125,00
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	17,00
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	10,00
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	99,00
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	10,00
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	10,00
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	8,00
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	3,00
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	3,00
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	2,00
NR-0202-1684	Explora S.A.	18,00
NR-0202-1980	Sotero Armella Mamani y Otros	5,70
NR-0203-5004	Comunidad Atacameña de Peine	15,40
NR-0202-5038	Asociación Indígena de Regantes y Agricultores Paso Jama	1,30
NR-0202-5045	Comunidad Atacameña de Peine	5,00
NR-0202-5048	Comunidad Atacameña de Peine	5,00

Fuente: Catastro Publico DGA (2019).

Tabla I-20: Usuarios dueños de derechos de aguas subterráneas en la cuenca del Salar de Atacama.

Código Expediente	Titular
ND-0202-728	Juana Ramos Leaño
NR-0202-1376	Comunidad Atacameña de Solor
ND-0202-1372	Explora S.A.
ND-0202-1595	Fisco, Dirección General de Obras Públicas M.O.P.
ND-0202-2212	Inversiones D'Etigni S.A.
ND-0202-2350	Inversiones D'Etigni S.A.
ND-0202-2382	Juan Carlos Riquelme
ND-0202-2410	Tomas Poblete Alay
ND-0202-2507	Inversiones Solcor Ltda.
ND-0202-2513	Valles del Sur S.A.
ND-0202-2542	Alto Atacama S.A.
ND-0202-2551	Cabo de Hornos Ltda.
ND-0202-2602	Ricardo Quiroz Nilo
ND-0202-2628	Kimal S.A.
ND-0202-2699	Walter Romang
ND-0202-2700	Walter Romang
ND-0202-2702	Asesorías e Inversiones Katari S.A.
ND-0202-2697	Ricardo Vilca Solis
ND-0202-2738	Stefen Welsch
ND-0202-2808	Terrantai Limitada
ND-0202-2840	Takha Takha Limitada
ND-0202-2845	Humberto Undargarin
ND-0202-5029	Inmobiliaria del Inca S.A.
ND-0202-5020	Antonio Ivanovic
ND-0202-5017	Inversiones Principado Ltda.
ND-0202-5036	Comité de Agua Potable San Pedro de Atacama
ND-0202-2735	SQM Salar S.A.
ND-0202-2727	Ejército de Chile
ND-0202-2362	Exploraciones San Pedro S.A.
ND-0202-2670	SQM Salar S.A.
ND-0202-2670	SQM Salar S.A.
ND-0202-2670	SQM Salar S.A.
ND-0202-2670	SQM Salar S.A.
ND-0202-1073	SQM Salar S.A.
ND-0202-2215	SQM Salar S.A.
ND-0202-1887	SQM Salar S.A.
ND-0202-1887	SQM Salar S.A.
ND-0202-2180	SQM Salar S.A.
ND-0202-2216	SQM Salar S.A.
ND-0202-2217	SQM Salar S.A.
ND-0202-5039	SQM Salar S.A.
ND-0202-1509	Albemarle
ND-0203-2677	Minera Escondida Limitada
ND-0203-2677	Minera Escondida Limitada

ND-0203-2677	Minera Escondida Limitada
ND-0203-509	Minera Escondida Limitada
ND-0203-509	Minera Escondida Limitada
ND-0203-509	Minera Escondida Limitada
ND-0203-509	Minera Escondida Limitada
ND-0203-509	Minera Escondida Limitada
ND-0203-596	Minera Escondida Limitada
ND-0203-597	Minera Escondida Limitada
ND-0203-597	Minera Escondida Limitada
ND-0203-614	Minera Escondida Limitada
ND-0203-615	Minera Escondida Limitada
ND-0203-615	Minera Escondida Limitada
ND-0203-615	Minera Escondida Limitada
ND-0203-652	Minera Escondida Limitada
ND-0203-652	Minera Escondida Limitada
ND-0203-653	Minera Escondida Limitada
ND-0203-653	Minera Escondida Limitada
ND-0203-653	Minera Escondida Limitada
ND-0203-653	Minera Escondida Limitada
ND-0203-653	Minera Escondida Limitada
ND-0203-653	Minera Escondida Limitada
ND-0203-653	Minera Escondida Limitada
ND-0203-654	Minera Escondida Limitada
ND-0203-654	Minera Escondida Limitada
ND-0203-800	Compañía Minera Zaldívar
ND-0203-800	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-842	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-842	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-842	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1055	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1055	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1055	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1055	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1055	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1055	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1125	Albemarle
ND-0203-1144	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1216	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1216	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1216	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1219	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1219	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-1219	Compañía Minera Zaldívar
ND-0203-1455	Minera Escondida Limitada
ND-0203-1455	Minera Escondida Limitada
ND-0203-1455	Minera Escondida Limitada
ND-0203-1455	Minera Escondida Limitada
ND-0203-1455	Minera Escondida Limitada

ND-0203-1455	Minera Escondida Limitada
ND-0203-1456	Minera Escondida Limitada
ND-0203-1456	Minera Escondida Limitada
ND-0203-1456	Minera Escondida Limitada
ND-0203-1456	Minera Escondida Limitada
ND-0203-1144	Compañía Minera Zaldívar
ND-0202-2744	Prelatura de Calama
ND-0202-1572	Minera Spence S.A.
ND-0202-1572	Minera Spence S.A.
ND-0202-1572	Minera Spence S.A.
ND-0202-1153	Compañía Minera Zaldívar
ND-0203-800	Minera Escondida Limitada
ND-0203-800	Minera Escondida Limitada
ND-0202-842	Minera Escondida Limitada
ND-0202-842	Minera Escondida Limitada
ND-0202-842	Minera Escondida Limitada
ND-0202-1055	Minera Escondida Limitada
ND-0202-1055	Minera Escondida Limitada
ND-0202-1055	Minera Escondida Limitada
ND-0202-1055	Minera Escondida Limitada
ND-0202-1055	Minera Escondida Limitada
ND-0202-1055	Minera Escondida Limitada
ND-0202-1216	Minera Escondida Limitada

Fuente: Catastro Publico DGA (2019).

Por último, a nivel de la sociedad civil, los actores que juegan un rol en la gestión del agua pueden clasificarse en: (1) los Comités de Agua Potable Rural (APR), (2) las Organizaciones Indígenas (comunidades indígenas, asambleas, asociaciones y consejos indígenas), y (3) Universidades y centros de investigación (ver *Tabla I-21*).

Tabla I-21: Actores de la comunidad con competencia relevante en la gestión de los recursos hídricos.

Actores de la Comunidad
Comités de Agua Potable Rural (APR)
Organizaciones Indígenas
Universidades y centros de estudio e investigación

Fuente: CNR -Arrau, (2012).

Respecto a los APR existen en la cuenca cinco localizaciones cuya fuente de suministro se base en este sistema: Toconao, Socaire, San Pedro de Atacama, Río Grande y Peine (ver ubicación en *Figura I-35*).

Tanto el pueblo de San Pedro de Atacama como el pueblo de Toconao se abastecen de agua potable a través del "Comité de Agua Potable Rural de San Pedro de Atacama" (CAPRA) y el "Comité de Agua Potable de Toconao" respectivamente. Aunque, estos organismos no están organizados a través de empresas sanitarias ni concesiones.

CAPRA opera a través de un sistema de osmosis inversa alimentado por 3 pozos que extraen aguas subterráneas en el sector del Ayllu de Vilama, aproximadamente a 3 km al NE de San Pedro de Atacama. El primer pozo de extracción de agua fue el pozo Vilama B-1, con un derecho de extracción de agua de 40 l/s. Posteriormente, en el año 2008 se autoriza a CAPRA el derecho a extracción de 40 l/s adicionales en el pozo Vilama-B2, pero en el mes de julio de 2015 se averió este último, por lo que CAPRA le solicitó a la DOH un nuevo pozo de extracción, Vilama B-3 con el mismo permiso de extracción que el anterior. El caudal de operación de CAPRA, entonces, se encuentra entre los 7 - 23 l/s durante el día, con un promedio de producción 15 l/s de agua potable desalada. Con ello, se abastece a una población cercana a los 5.800 habitantes, y más de 1.000.000 de litros de agua potable para los pueblos del interior: Talabre, Río Grande, Socaire y Toconao.

El Comité de APR de Toconao posee una planta de tratamiento de agua potable mediante la cual se realiza el proceso de remoción de arsénico, abasteciendo del recurso a 800 familias del poblado de Toconao (1.320 habitantes aproximadamente, a partir de 330 arranques). La fuente de suministro consiste en una aducción desde la Quebrada de Vilaco, la cual es abducida para ser filtrada, tratada y almacenada en estanques.

En cuanto al APR de la localidad de Rio Grande, este abastece a 90 habitantes a partir de 40 arranques. El APR de la localidad de Peine, por su lado, abastece a aproximadamente 20 habitantes mediante un estanque regulador de 100 m^3. Por último, el APR ubicado en la localidad de Socaire abastece a 372 habitantes con agua proveniente de una vertiente.

Cabe destacar que tanto CAPRA como el APR de Río Grande se encuentran en la subcuenca del río San Pedro, declarada en Agotamiento en 2016. Los otros 3 APR de la cuenca no se encuentran ni en zonas de prohibición, ni áreas de restricción ni en cuencas/subcuencas declaradas en agotamiento.

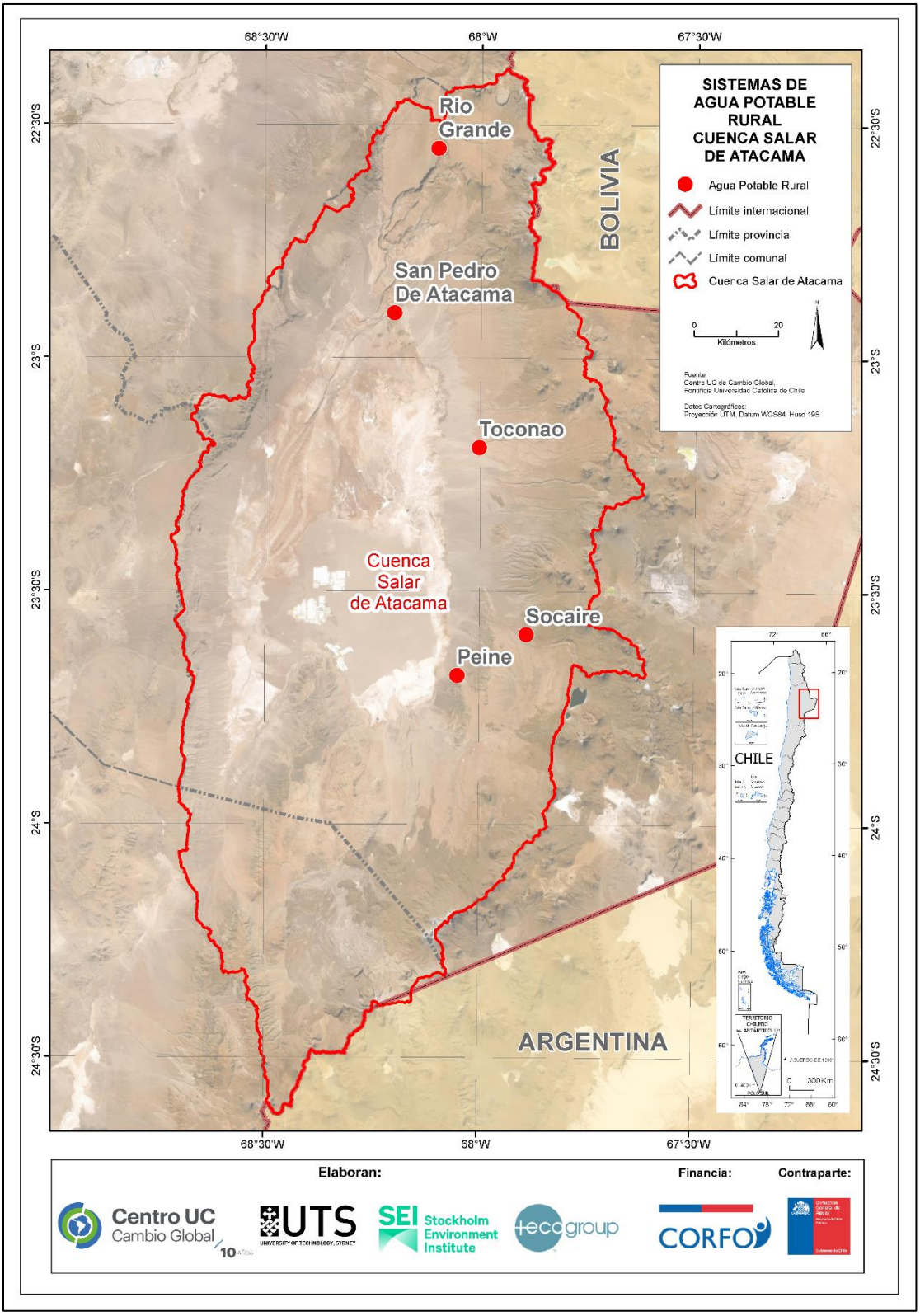


Figura I-35: *Ubicación de Comité APR en la cuenca del Salar de Atacama.*
Fuente: Elaboración propia en base a información DOH (MOP).

En cuanto a las organizaciones indígenas, y tal y como se mencionaba en el capítulo anterior, la mayor parte de la población de esta cuenca pertenece a la etnia Atacameña. En concreto, existen 21 comunidades indígenas. De estas, 18 están agrupadas a través del denominado Consejo de Pueblos Atacameños (CPA).

Por último, una serie de corporaciones, organismos no gubernamentales, universidades y centros de investigación participan del proceso de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Salar de Atacama. Entre estos se encuentran: Universidad de Antofagasta, Universidad Católica del Norte, Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), Centro de Investigación Tecnológica del Agua en el Desierto, entre otros.

I.4.6.2 Instrumentos y herramientas de gestión

El Estado cuenta con diversas herramientas en materia de políticas públicas, que tienen una relación directa o indirecta con la gestión de recursos hídricos. En una primera escala podemos considerar instrumentos de ordenamiento y planificación territorial de carácter normativo e indicativo, y a distintas escalas territoriales (nacional, regional, comunal, etc.). Estos se complementan, por lo general con las mismas escalas territoriales, con planes y estrategias de recursos hídricos. Adicionalmente existen instrumentos de gestión de recursos de recursos hídricos que no tiene relación con una gestión del territorio pero que son relevantes por ejemplo en términos de otorgamiento y restricción en el uso de derechos de aprovechamiento de aguas. Y finalmente tenemos un conjunto de instrumentos y herramientas de gestión de partes del territorio o de recursos complementarios a la gestión de los recursos hídricos.

Tomando en cuenta estas distintas categorías en esta sección, se describen distintos instrumentos y herramientas de gestión relevantes para la Cuenca del Salar de Atacama a nivel de: (1) planificación del territorio, (2) planificación de los recursos hídricos (incluida infraestructura asociada), (3) gestión del aprovechamiento de los recursos hídricos (4) gestión de áreas naturales, (5) gestión de territorios indígenas y (6) gestión de otros recursos de asociados a actividades productivas (ej. minería no metálica, agricultura, energía).

Es importante considerar que hay muchos de estos instrumentos que se entrelazan al considerar distintos objetivos en su diseño. Estos cruces serán debidamente descritos en el documento.

I.4.6.2.1 Instrumentos de Planificación Territorial

En esta sección se caracterizan los principales Instrumentos de Planificación Territorial (IPT) recientemente desarrollados a nivel regional y comunal relevantes para la Cuenca del Salar de Atacama.

Estrategia Regional de Desarrollo 2009-2020, Región de Antofagasta

La Estrategia Regional de Desarrollo es el instrumento de planificación para el territorio regional. Su construcción busca incorporar una perspectiva de largo plazo que sirva para

la asignación eficiente de inversiones y recursos públicos, para definir políticas, planes y programas que aporten al desarrollo de la región (GORE Antofagasta, 2009).

Este instrumento contiene un conjunto de lineamientos estratégicos que inciden significativamente sobre la comuna de San Pedro de Atacama. Estos se construyen sobre lo que se denomina "línea base regional", la cual se extrae de la evaluación crítica de los resultados de la Estrategia Regional del período anterior. En particular, se señala en este documento entre los principales desafíos para este territorio que: "Los habitantes de la Comuna de San Pedro de Atacama han manifestado su voluntad de asegurar la sustentabilidad de sus pueblos, Ayllus y el cuidado de la flora y fauna del territorio a través de la protección del recurso hídrico. Esto porque es la base sobre la cual pueden continuar siendo la comuna turística más importante de la Región y de Chile y porque es la base de la agricultura y el pastoreo, ocupaciones tradicionales de sus comunidades" (GORE Antofagasta, 2009).

A partir de una serie de "Condiciones para el Desarrollo" este instrumento propone además un conjunto de Lineamientos Estratégicos, Objetivos Generales y Líneas de Acción sobre temáticas de relevancia como el Desarrollo Territorial, Económico, Social, Medio Ambiental, y en Salud. Varios de estos lineamientos inciden de forma significativa sobre el territorio comunal de San Pedro de Atacama y la gestión de los recursos hídricos. Por ejemplo, el Lineamiento 3 "Región Sustentable", indica que busca: "Asegurar la sustentabilidad ambiental y territorial a través de un sistema regional de planificación de los recursos hídricos y energéticos y de protección de la biodiversidad, acorde con el marco geográfico, socioeconómico y cultural de la región de Antofagasta". Lineamiento cuyo principal Objetivo General consiste en: "Proteger el recurso hídrico a través de una eficiente administración, en concordancia con las condiciones regionales de extrema aridez y atendiendo a las presiones que se ejercen sobre su oferta limitada y poco conocida".

Este instrumento, por tanto, como guía a nivel regional y comunal, es central en el proceso de creación de herramientas de gestión sobre el territorio. Reconociendo que el recurso hídrico es la piedra angular para el desarrollo de la región, se vuelve fundamental integrar la visión estratégica regional en su gestión.

Reflejo de lo anterior fue el desarrollo de la Estrategia Regional de Innovación (ERI) para la Región de Antofagasta, creada bajo el alero de la Estrategia Regional de Desarrollo 2009-2020. Este instrumento busca que tanto el movimiento hacia la Minería del Siglo XXI como el movimiento hacia una Economía Diversificada, sean sostenibles sobre la base de la agregación y retención local de valor, y el uso y aprovechamiento sustentable de recursos hídricos y fuentes energéticas limpias (GORE Antofagasta, 2012).

Plan de Desarrollo Comunal San Pedro de Atacama

El Plan de Desarrollo Comunal (PLADECO) entrega los lineamientos para el desarrollo de una comuna en el corto y mediano plazo, constituyendo el marco orientador del accionar municipal. En este sentido, se entiende por Planificación Urbana Comunal aquella que promueve el desarrollo armónico del territorio comunal, en especial de sus centros

poblados, en concordancia con las metas regionales de desarrollo económico-social. Este instrumento de planificación propone construir una voluntad colectiva comunal para sostener un proceso de desarrollo para enfrentar los problemas y demandas más sentidas por la comunidad (CONAF, 2008).

En la cuenca solo tiene lugar el PLADECO de San Pedro de Atacama, que norma las áreas urbanas de las localidades de San Pedro de Atacama, Toconao y Peine. Este instrumento se encuentra vigente desde su publicación en el año 1998, según lo dispuesto en la Ley General de Urbanismo y Construcciones y la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, y en los artículos 20 y 36 de la Ley 19.175, siendo su última actualización en 2017 (Mapocho Consultores, 2017).

El PLADECO resume e integra las miradas sectoriales en torno a las perspectivas del desarrollo económico, territorial, social, en salud y en medio ambiente en la comuna, postulando para ello lineamientos, objetivos estratégicos (en el corto y mediano plazo) y potenciales proyectos, todo en línea con instrumentos regionales. Esta síntesis transversal a las actividades que ocurren en la cuenca es también una característica fundamental en el plan de gestión hídrica en la Cuenca del Salar de Atacama. Como tal, el PLADECO tiene el potencial de situarse como un catalizador de los esfuerzos de un plan integral de gestión de recursos hídricos en la cuenca.

Plan Regional de Antofagasta

El Plan Regional de Antofagasta (Gobierno de Chile, (2019)), consiste en una estrategia regional que tiene como objetivo el desarrollo socio-económico y territorial de la región de Antofagasta entre los años 2018 y 2022. La metodología de este Plan Regional consiste en realizar un diagnóstico de la Región de Antofagasta, con el motivo de detectar aquellas áreas prioritarias sobre las cuales se deben implementar iniciativas de desarrollo. Las líneas de acción más importantes que contempla el programa corresponden al crecimiento de la región, el desarrollo territorial, la seguridad ante desastres naturales y la cobertura en salud y educación.

Respecto al crecimiento de la región, se determina que el recurso hídrico juega un papel fundamental en la estrategia de desarrollo, por lo que se establece una estrategia hídrica de gestión y monitoreo, la cual considera implementar una red de monitoreo de recursos hídricos, para gestionar el recurso hídrico de los acuíferos con información certera sobre la cantidad y calidad de dichos cuerpos de agua. El inicio del plan de la estrategia de monitoreo se planificó durante el año 2019.

I.4.6.2.2 Instrumentos de Planificación de Recursos hídricos

Se incluyen en esta sección instrumentos de planificación que específicamente tratan aspectos relacionados de manera directa con los recursos hídricos. Dentro de los instrumentos de planificación, se cuenta con planes regionales que consideran estrategias generales para la mejora en la gestión de los recursos como también mejoras de la

infraestructura relacionada a la gestión del recurso hídrico (incluida la infraestructura especifica asociado al riego de cultivos).

Plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, Región de Antofagasta

Los problemas y conflictos vinculados al uso social del recurso hídrico, en particular en una región con una notoria estrechez de disponibilidad de agua como la Región de Antofagasta, pueden llegar a ser de gran complejidad. En este contexto, el Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos (PEGRH) es un instrumento de planificación indicativo fundamental. Al considerar los efectos agregados de las diversas intervenciones locales, el PEGRH contribuye a orientar las decisiones públicas y privadas, con el fin último de maximizar la función económica, social y ambiental del agua, en armonía con el medioambiente y con condiciones de equilibrio que permita la sustentabilidad dentro de una visión de corto y largo plazo, dotando a los actores de las herramientas y capacidades para abordar los desafíos que esto impone. A continuación, se describen las dos fases de generación del PEGRH: Diagnóstico y Formulación.

Diagnóstico plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, Región de Antofagasta (CNR-Arrau, 2012)

Este estudio constituye un insumo esencial del PEGRH, correspondiendo a la primera fase de diagnóstico. En concreto, esta fase consiste en un completo levantamiento y análisis de información, con lo cual se determinó el estado actual de los recursos hídricos, abarcando tanto la temática regional e institucional como la situación territorializada a nivel de sectores y cuencas.

En específico, este diagnóstico se desglosa en un grupo de objetivos específicos tendiente a conocer la realidad del recurso hídrico en una región caracterizada por una baja disponibilidad de agua, y desajustes notorios entre oferta y demanda. Además, dichos objetivos específicos buscan identificar los factores que limitan, desde la perspectiva del recurso hídrico, el desarrollo productivo regional; así como los factores relevantes que afectan el patrimonio ambiental o social regional. A continuación, se detalla cada uno de estos objetivos específicos junto a las conclusiones pertinentes para la cuenca del Salar de Atacama y, por tanto, para el Plan Integrado de Gestión Hídrica de esta cuenca.

(1) Hacer un diagnóstico respecto del conocimiento del recurso hídrico, del uso del agua y del estado de las fuentes.

Para cumplir este objetivo, el estudio realiza una revisión, actualización y sistematización de la información existente, utilizando diversas fuentes primarias y secundarias de información. Se detecta en este análisis la existencia de importantes vacíos de información que no permiten conocer, en su totalidad, el estado actual del recurso. Por ello, se plantea como deben abordarse dichos vacíos para una mejor comprensión y con ello una adecuada toma de decisiones y gestión del recurso.

(2a) Elaborar un diagnóstico de los aspectos de cantidad y calidad del recurso hídrico.

La disponibilidad de agua dulce en la cuenca es escasa para la cantidad de actividades antrópicas que la necesitan para sus procesos y para los asentamientos humanos presentes. Esta situación ha hecho rentable, en esta región, la producción de agua desalada, siendo una nueva fuente de agua, que hasta ahora parece verse solo limitada por su costo. En términos de calidad, los factores de la contaminación son tanto antropogénicos como naturales. En el caso de la cuenca del Salar de Atacama la información se encuentra dispersa, por lo cual es difícil concluir de ella de manera concreta, dado que no es posible determinar, por ejemplo, puntos de origen de una eventual contaminación. En ese escenario, se podría indicar que una potencial fuente de contaminación, con la poca información disponible, sería principalmente de carácter natural. En el caso de las aguas subterráneas, la información es escasa, por lo cual puede concluirse que para la cuenca del Salar de Atacama la información es insuficiente.

(2b) Elaborar un diagnóstico de la infraestructura y servicios relacionados con el recurso hídrico.

Se indica que es necesaria una mayor cobertura de agua potable rural, una mayor mantención y construcción de infraestructura de riego, y una mayor inversión en infraestructura de control de crecidas, principalmente en la zona altiplánica de la región, dado que en la zona costera se han estado realizando las acciones necesarias para su control. Es requerido realizar un diagnóstico acabado en terreno de la infraestructura de mayor tamaño, como es el caso de los tranques de relave y de riego existentes, para conocer con mayor detalle su estado actual dado el gran potencial de contaminación presente.

(2c) Elaborar un diagnóstico en materia ambiental.

El diagnóstico plantea que las principales problemáticas regionales se relacionan tanto con la situación de aridez determinada por la geografía y el clima, como con la presión existente sobre los recursos naturales, especialmente sobre el recurso hídrico, producto del aumento constante de las demandas de agua por parte de diversos usos, que conlleva impactos sobre los diferentes ecosistemas que sostiene el recurso hídrico. Los impactos ambientales de las actividades productivas en la región son importantes e históricos, con pasivos ambientales no catastrados y una deficiencia en la fiscalización de los actuales procesos productivos, principalmente minero, que es el que posee los principales conflictos con las comunidades locales.

En relación al estado actual de la conservación de la biodiversidad regional, se debe reconocer que se ha hecho un esfuerzo por ampliar las áreas de protección en la Región. Sin embargo, existen una serie de desafíos que deben ser abordados, como por ejemplo actualizar la Estrategia Regional de Conservación de la Biodiversidad, reforzar el resguardo de áreas necesarias de proteger, estudiar los requerimientos hídricos de los ecosistemas y establecer los caudales ecológicos respectivos.

(2d) Elaborar un diagnóstico funcional respecto del desempeño institucional (público y

privado) en materia de gestión en escenarios medios y en condiciones extremas (sequías o inundaciones).

El diagnóstico funcional muestra la existencia de una serie de deficiencias o limitantes del sistema que deben abordarse para poder realizar con éxito la gestión de los recursos hídricos a nivel regional. En este sentido, se observa un desconocimiento sobre el estado actual de los recursos hídricos en la región, deficiencias legales e institucionales, la limitada capacidad de las organizaciones, la limitada coordinación intra e intersectorial, los limitados mecanismos de comunicación y sistemas de información, y los conflictos territoriales y procesos de participación.

(3) Identificar los factores más relevantes que limitan, desde la perspectiva del recurso hídrico, el desarrollo productivo regional.

Los factores más relevantes identificados son la calidad y la cantidad del recurso hídrico, principalmente para la actividad agrícola y las formas de vida en zonas rurales, dado que la actividad minera y el abastecimiento de agua potable urbana, ante la escasez, han procedido al uso del agua de mar, desalada o en su estado natural (en este caso, readecuando sus sistemas productivos).

(4) Identificar los factores más relevantes que afectan el patrimonio ambiental o social dentro del territorio regional.

Entre los factores más relevantes que tienen un efecto en el patrimonio ambiental o social dentro del territorio regional, son las actividades de alto impacto, como por ejemplo la gran minería, donde la región cuenta con importantes pasivos ambientales y casos de contaminación de relevancia. El otro factor es el uso de los recursos hídricos, que condiciona el mantenimiento de los ecosistemas que son la base de la subsistencia tanto de las comunidades humanas como del ambiente.

(5) Identificar las capacidades y brechas institucionales, públicas y privadas, relacionadas con la gestión y manejo del recurso hídrico.

La identificación de capacidades y brechas institucionales, públicas y privadas, relacionadas con la gestión y manejo del recurso hídrico permite determinar 7 tipologías de brechas, entre ellas: (a) brechas legales, (b) brechas político-institucionales (Estado), (c) brechas organizacionales (Comunidad y Sector privado), (d) brechas de comunicación y en el acceso a la información, (e) brechas en los procesos de participación, (f) brechas de investigación y (g) brechas de Infraestructura.

Como conclusión general, el diagnóstico indica que se requiere abordar aspectos sumamente relevantes y que serán determinantes para la generación de confianzas y el éxito de iniciativas como el Plan Integrado de Gestión Hídrica:

- Incorporar, desde sus inicios, a todos los actores relevantes de la región, tanto sector público, privado, como comunidades locales, esto a través de procesos de

participación efectivos (en especial en el caso de las comunidades indígenas).
- La existencia de voluntad política para fortalecer las instituciones públicas regionales, en diversos aspectos, pero principalmente en fiscalización y seguimiento.

Plan Estratégico Para La Gestión De Los Recursos Hídricos, Región De Antofagasta (DGA-Arcadis, 2016).

Este estudio corresponde a la segunda fase del PEGRH para la Región de Antofagasta, y consiste en la formulación de dicho plan. Los objetivos del PEGRH se definieron considerando como marco estructural los lineamientos globales de recursos hídricos, establecidos por el concepto de Seguridad Hídrica, la cual se adaptó a la realidad nacional y regional utilizando la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos. Esta última establece 5 ejes de desarrollo que generan una ruta en materia de gestión de recursos hídricos con miras al año 2025. Siguiendo esta definición, se definió un objetivo general, y objetivos específicos agrupados según tres dimensiones fundamentales: social, ambiental y económica (las cuales se relacionan con los tres pilares fundamentales del proceso de Gestión Integrada de Recursos Hídricos: "equidad social, eficiencia económica y sustentabilidad del medio ambiente").

Tabla I-22: Objetivos Plan Estratégico Gestión de Recursos Hídricos Antofagasta.

Dimensión Objetivo PEGRH	Descripción
Social	**- Asegurar la cobertura de servicios básicos suficientes, seguros, asequibles y sustentables para el uso personal y doméstico en las localidades de la región.** **- Contribuir a proteger el patrimonio cultural, con énfasis en el patrimonio ancestral.** **- Otorgar un nivel de seguridad aceptable para la población ante eventos extremos asociados al agua, específicamente, inundaciones y aluviones.**
Ambiental	**Contribuir a la seguridad hídrica del medio ambiente considerando la conservación y restauración de ecosistemas asociados a ríos, lagunas, humedales y acuíferos.**
Económica	**Mejorar la seguridad hídrica, productividad y eficiencia en el uso del agua para las actividades económicas en todos los sectores usuarios.**

Fuente: DGA-Arcadis, (2016).

Plan Regional de Antofagasta

Como se mencionó anteriormente, este Plan Regional de Antofagasta (Gobierno de Chile, 2019) contempla una estrategia de gestión y monitoreo del recurso hídrico de la región, para lo cual se considera la instalación de equipos de medición y ejecución de programas de monitoreo de acuíferos.

Respecto a la seguridad ante desastres naturales, la estrategia del Plan Regional contempla

la construcción de obras de defensas aluvionales en la comuna de Antofagasta. Las obras se extenderán hasta el año 2022 con un monto de inversión de $ 40.600 millones de pesos.

Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021

El Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021(MOP 2012) corresponde a un instrumento de planificación sectorial territorializado y vinculante para los servicios del MOP, a un horizonte de 10 años. Su objetivo es contribuir eficaz y eficientemente al desarrollo sustentable de la Región de Antofagasta, mediante la satisfacción de la demanda de mediano plazo (2021) a través de la provisión de servicios de infraestructura y la gestión del Recurso Hídrico.

La estrategia propone una cartera de iniciativas de inversión, dentro de las cuales se encuentran la ampliación y mejora de la cobertura de Agua Potable Rural, la protección a la población de riesgos por aluviones o inundaciones y mejorar la infraestructura hidrométrica.

Tal como se mencionó en el Capítulo I.4.6.1 existen 5 localidades en la cuenca que se abastecen de agua mediante el sistema de Agua Potable Rural. La infraestructura de distribución del sistema de agua potable en la cuenca consiste de 1.741 arranques. La estrategia del plan regional de infraestructura respecto a estos sistemas consiste en la creación de 50 nuevos arranques en los servicios de Agua Potable Rural existentes.

Respecto a la infraestructura de abastecimiento de riego en la cuenca, se cuenta con los estanques Guachar (55.000 m^3) y Solor (11.000 m^3), los cuales regulan el riego en la cuenca del Río San Pedro, en una superficie de 160 y 44 há., respectivamente, para abastecer a las comunidades de San Pedro de Atacama.

La infraestructura de obras de cauces en la cuenca se ha desarrollado en San Pedro de Atacama y Río Grande, mediante el mejoramiento de cauces de río y la ejecución de defensas fluviales, las que contemplan sistema de gavionaje, movimientos de tierra para encauzamiento de ríos y sistemas de enrocados para la protección de riberas. El Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico propone la construcción de obras de control de crecidas en el Río San Pedro y la conservación de obras de defensas en cauces de la comuna de San Pedro de Atacama.

La red hidrométrica de la DGA es el conjunto de estaciones de medición que se tiene dentro de los sistemas hidrográficos de la región, y su infraestructura se detalla en el Capítulo I.4.6.3. En este sentido, el Plan Regional de Infraestructura contempla el mejoramiento y la ampliación de la infraestructura de la red hidrometeorológica de la DGA, junto con la ampliación red de medición de aguas subterráneas de la DGA.

Instrumentos de planificación del riego

En lo que respecta a instrumentos de planificación o estrategias regionales vinculada al riego y la agricultura, existe para la región de Antofagasta la "Estrategia Regional de

Desarrollo 2009 al 2020" (mencionada anteriormente). Esta estrategia, que si bien no menciona la temática de riego de manera explícita, en su Lineamiento N°2 sobre Desarrollo Económico Territorial, considera entre sus objetivos el "promover la consolidación del complejo productivo minero industrial y de servicios especializados orientado al desarrollo económico territorial y fortalecer la diversificación de la estructura económica en la región de Antofagasta", entre otros, mediante la diversificación de otras actividades como las asociadas al borde costero, el turismo, las energías y la agricultura en zonas áridas.

En línea con lo anterior, el año 2012 se presenta la "Estrategia Regional de Innovación 2012 2015". En su ámbito N°3 sobre Innovación para la Diversificación Económica Regional, se plantea una línea de acción para el fomento y apoyo público-privado al desarrollo de nuevos productos basados en el valor distintivo de la singularidad en el desierto de Atacama. Dentro de las iniciativas generales de este objetivo se considera el fomento al desarrollo de cultivos forzados con especial foco en el desarrollo hidropónico costero, el riego tecnificado y en las singularidades de los cultivos altiplánico. Esta estrategia destaca de manera transversal la idea de relevar el concepto de *Agricultura del Desierto* como idea a fortalecer por los distintos instrumentos de planificación.

Complementariamente, la CNR impulsó el año 2016 la iniciativa de "Estudio Básico – Diagnóstico para desarrollar el Plan de Gestión de Riego en la Región de Antofagasta" cuyo objetivo principal es la planificación a mediano plazo de las iniciativas de inversión en materia de riego en la región. Este estudio consideró los siguientes elementos:

- Elaborar un diagnóstico de la Región de Antofagasta, teniendo en cuenta la gestión del agua para riego y drenaje; la disponibilidad de infraestructura; los aspectos ambientales; los aspectos institucionales, entre otros que puedan surgir.
- Definir y desarrollar una imagen objetivo, respecto a la gestión del agua para riego y desarrollo agrícola en la cuenca hídrica considerada.
- Estimar las brechas entre la relación línea de base y la imagen objetivo o escenarios.
- Proponer un conjunto de iniciativas de inversión priorizadas, así como formular mejoras institucionales y/o, de gestión que favorezcan el desarrollo del riego y de la agricultura de la región.
- Validar el Plan de Gestión de Riego Regional (PGR) a nivel de usuarios/as, así como también a nivel de la Comisión Regional de Riego, de las mesas de agua y/u otras instancias regionales.
- Elaborar un Sistema de Información Geográfico (SIG) donde se visualice el catastro de los proyectos y estudios existentes, además de la cartera de iniciativas del plan.

Un aspecto importante a considerar es que, si bien este es un insumo importante para la elaboración de un plan regional, este estudio a la fecha no se encuentra reflejado en un instrumento oficial de planificación de la política pública regional asociada al riego.

I.4.6.2.3 Instrumentos y herramientas para la gestión del aprovechamiento de los recursos hídricos

Consideraciones de base

En esta sección se describe la información recopilada respecto a los instrumentos y herramientas de gestión del aprovechamiento de los recursos hídricos de agua fresca[5]. En particular se tratan en esta sección instrumentos que tiene relación con las condiciones que regulan la posibilidad de acceder y restringir el uso de derechos de aprovechamiento de agua (*DDA*) que emanan principalmente del Código de Aguas de 1981 (y sus reformas) e instrumentos complementarios. No se incluyen otros instrumentos complementarios que regulan el uso de recursos hídricos como la ley de sistemas de Agua Potable Rural o la Ley de Fomento del Riego.

Es importante tener en cuenta que al momento del cierre de la revisión de antecedentes para este informe existen una serie de proyectos de ley en trámite que tienen una relación directa con muchos de los aspectos que se tratan en esta sección relacionados con protección de algunos ecosistemas sensibles y restricción en el otorgamiento y ejercicio de derechos. Se incluyen en este sentido algunos aspectos que legalmente no están resueltos pero que es importante tener en cuenta en este levantamiento de antecedentes.

Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común en la cuenca del Salar de Atacama

Un componente crítico en la gestión de los derechos de aprovechamiento de agua en la cuenca del Salar de Atacama está asociado a la definición de los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común. El D.S. N° 203 del año 2013 define un Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) como un "Acuífero o parte de un acuífero cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión en forma independiente". En este manual se utilizará indistintamente las expresiones acuífero o sector hidrogeológico, para referirse a la unidad sobre la cual se organiza la Comunidad de Aguas Subterráneas (CAS), o sea su jurisdicción.

La DGA identifica cada SHAC de acuerdo a un nombre o una letra y un numeral como es este caso. Se cuenta con la serie de acuíferos estudiados por la DGA el año 2018 y delimitados en formato vectorial ESRI shp. Estos archivos se consideran representativos de la cuenca y del funcionamiento de la hidrología subterránea de la misma. La *Figura I-36* muestra la distribución de los SHACs definida por la DGA y una descripción de cada grupo de SHAC con características similares donde se detalla los antecedentes con los que se cuenta.

[5] No se incluyen en esta sección por lo tanto los instrumentos de gestión de los recursos de agua salada y/o salmuera

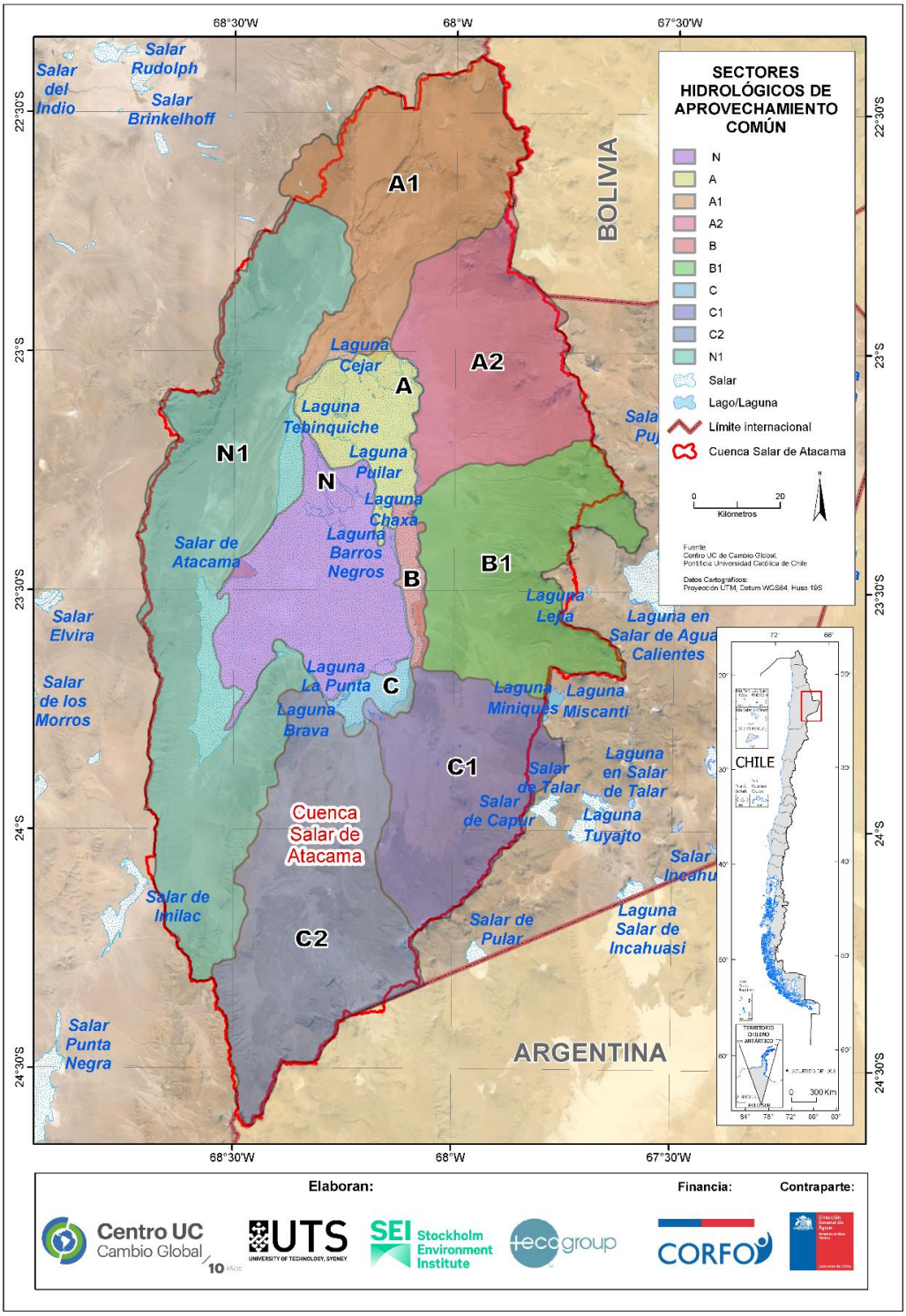


Figura I-36: Sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en la cuenca del Salar de Atacama según DGA.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Matálica-Amphos21, (2018)

- SHAC C2, C1 y C: En este sector se encuentra el acuífero detrítico de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT). En la zona de interface agua dulce-salobre y salina-salmuera (SHAC C) se ubican los sistemas de lagunas de La Punta-La Brava y Peine que constituyen ecosistemas frágiles sensibles a cambios en la altura del nivel de agua y calidad química.

- SHAC A, A1, A2, B1, B (Borde Este y norte del Salar de Atacama): Los SHAC A1, A2 y B1, limitan con el Borde Este y norte del Salar de Atacama por un lado y por el otro, con la cuenca hidrográfica, mientras que el SHAC A y B están constituidos por la zona Marginal del salar, donde se encuentra la traza de la cuña salina en superficie.

- SHAC N1: El SHAC N1 se encuentra en el borde oeste de la cuenca Salar de Atacama. Corresponde al área comprendida de la cordillera de Domeyko, Cordillera de la Sal, Llano de la Paciencia, parte del Cordón de Lila y el Salar de Atacama. Es el SHAC de mayor extensión en la cuenca.

- SHAC N: El SHAC N recibe las aguas de descarga del resto de los SHAC nombrados anteriormente. En el núcleo del Salar de Atacama se extrae salmuera por parte de las empresas SQM y RWD. El efecto del bombeo alcanza los bordes del núcleo, en las proximidades de la zona marginal, donde se encuentran las lagunas.

A continuación, se describen las herramientas que posee el estado para: 1) restringir la asignación de nuevo derechos de aprovechamiento de aguas; 2) restringir el ejercicio del uso de un derecho de aprovechamiento ya asignado.

Restricciones a la asignación de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas

Existen ciertas zonas del territorio chileno en donde la asignación de nuevos derechos de aprovechamiento de recursos hídricos para usos consuntivos y no consuntivos se encuentra restringido. Esto se debe a que son áreas en donde el recurso se ha declarado en escasez, se ha agotado, o donde se prohíbe la exploración y explotación, ya sea de aguas superficiales o subterráneas mediante vías legales. Se presentan a continuación algunas de estas categorías y la relevancia que tienen cada una de estas en el contexto de la cuenca del Salar de Atacama.

Zonas bajo protección oficial

En el país existen zonas en donde se protege la conservación del recurso hídrico debido a su importancia para los ecosistemas presentes.

Se considera una zona bajo protección oficial a cualquier porción de territorio, delimitada geográficamente y establecida mediante acto de autoridad pública, colocada bajo protección oficial con la finalidad de asegurar la diversidad biológica, tutelar la preservación de la naturaleza y conservar el patrimonio ambiental (D.S. N°95 de 2001 que modifica el reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental). Dicho de otra forma, las áreas bajo protección oficial pueden ser aquellas cuyo objeto de conservación

corresponde a espacios bajo uso y aprovechamiento de recursos, o que contengan elementos socioculturales de interés para la comunidad.

En este ámbito, la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) en el oficio N°43 del 28 de diciembre de 2004 diciembre informa del listado de áreas que son consideradas bajo protección oficial para efectos del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), las cual son:

1) Reserva Nacional
2) Parque Nacional
3) Reserva de regiones vírgenes
4) Monumento Natural
5) Santuario de la Naturaleza
6) Parques Marinos
7) Reservas Marinas
8) Monumentos Históricos
9) Zonas Típicas o pintorescas
10) Zonas de Interés Turístico
11) Zona de Conservación Histórica
12) Áreas de Preservación Ecológica
13) Sitios Ramsar
14) Acuíferos Regiones I, II y XV
15) Reservas Forestales
16) Bienes Nacionales protegidos
17) Áreas Marinas Costeras Protegidas
18) Espacios costero-marinos de pueblos originarios
19) Áreas de Prohibición de Caza
20) Lugares de interés Histórico/Científico
21) Áreas de Protección para la Conservación de la Riqueza Turística.
22) Áreas de desarrollo indígena (ADI)
23) Áreas de Manejo y Explotación de Recursos Bentónicos
24) Reserva de la Biósfera
25) Sitios del Patrimonio Mundial de la Humanidad
26) Zonas de Uso preferente Borde Costero
27) Área Preferencial para la Pesca Recreativa
28) Zonas o Áreas Especiales
29) Zonas Marinas Especialmente Sensibles
30) Zonas Santuario de la Convección Ballenera
31) Áreas de Protección de la Ley de Bosques y la Ley de Bosque Nativo
32) Zonas de Protección Costera

Dentro de estas zonas existen algunas bajo protección oficial del estado con fines ambientales y de protección de la naturaleza cuya discusión en extensión se desarrolla en el Capítulo I.4.6.2.4. Se describen en este apartado de manera especial algunas de estas zonas de protección oficial: vegas y bofedales. Estas son zonas bajo protección oficial que tienen mayor relación con la gestión de derechos de aprovechamiento de agua (ver su

presencia en la cuenca del Salar de Atacama en Figura I-37). Otras zonas de protección como las Áreas de Desarrollo Indígena (ADI) y las Zonas de Interés Turístico (ZOIT), entre otras, son tratadas en secciones posteriores.

Vegas y Bofedales:

Las vegas y bofedales corresponden a formaciones vegetales que se desarrollan en el suelo con contenido orgánico suficiente para su subsistencia. Presentan una condición hídrica de saturación permanente, lo que se traduce en una alta diversidad biológica y un mayor número de espacies vegetales respecto del entorno. En estas zonas habitan especies como la vicuña, el guanaco y las alpacas, por lo que representan un valioso lugar para la conservación.

Jurídicamente, las vegas y bofedales se encuentran protegidas por el código de aguas de 1981, modificado en 1992, con la inclusión de los artículos 58 y 63 que aseguran la protección y conservación de los humedales del altiplano de las regiones de Tarapacá y Antofagasta, estableciéndose la prohibición de explotar y explorar los recursos subterráneos que los alimentan. Esto se realizó debido a que los acuíferos son el sustento de las actividades agrícolas, ganaderas y de sobrevivencia de las comunidades andinas. Estos cambios en la legislación permitieron establecer medidas de protección de estos ecosistemas, además de valorizar el uso ancestral que las comunidades han hecho sobre ellos (D.F.L. 1.122 del Ministerio de Justicia).

A partir del año 1993 la DGA comenzó a realizar estudios para identificar y ubicar áreas de vegas y bofedales para delimitar sus acuíferos alimentadores. Esto llevó a que en 1996 se dictara la Resolución DGA N° 909, la cual realizó dicha delimitación. Lo anterior implica, que en dichas áreas no es posible autorizar exploraciones de aguas subterráneas ni constituir derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas si no se cuenta previamente con una evaluación de impacto ambiental aprobada. En el caso de la región de Antofagasta, se protegieron 167 humedales con una superficie asociada de 2,798 km^2, equivalentes al 2.22% de la superficie total de la región, los cuales, en el año 2003, aumentaron a 228 humedales que abarcan una superficie de 5.149 km^2, equivalentes ahora al 4.07% de la superficie total regional.

Acuíferos protegidos:

Si bien según su caracterización, los acuíferos protegidos pueden ingresar dentro de las categorías asociadas a vegas y bofedales, por conformar el sustento de éstos últimos, poseen una extensión más amplia debido a su carácter subterráneo. En ese sentido, se clasifican de forma independiente cuando se refieren a las regiones desde Tarapacá hasta Coquimbo debido a que esta última junto con la de Atacama fueron anexadas por modificación del artículo 63 del código de aguas.

En ese sentido, dentro de la cuenca del Salar de Atacama, existen 39 diferentes acuíferos establecidos como zonas de protección, de los cuales 15 tienen resolución del año 2006, mientras que el resto la tuvo en el año 2003. Existe una relación entre el tamaño del acuífero

con la cantidad de vegas que alimenta, siendo el acuífero más grande (1.100 Km^2) el que aporta caudal a 12 vegas del territorio. No obstante, existe un total de 83 acuíferos protegidos en la región de Antofagasta que se encuentran fuera de los límites de la cuenca. Los acuíferos protegidos que se encuentran al interior de la cuenca del Salar de Atacama representan un 32% de la cantidad total de acuíferos de la región, considerando que la cuenca del Salar de Atacama corresponde a un 13.5% del total de la superficie de la región de Antofagasta (Figura I-37).

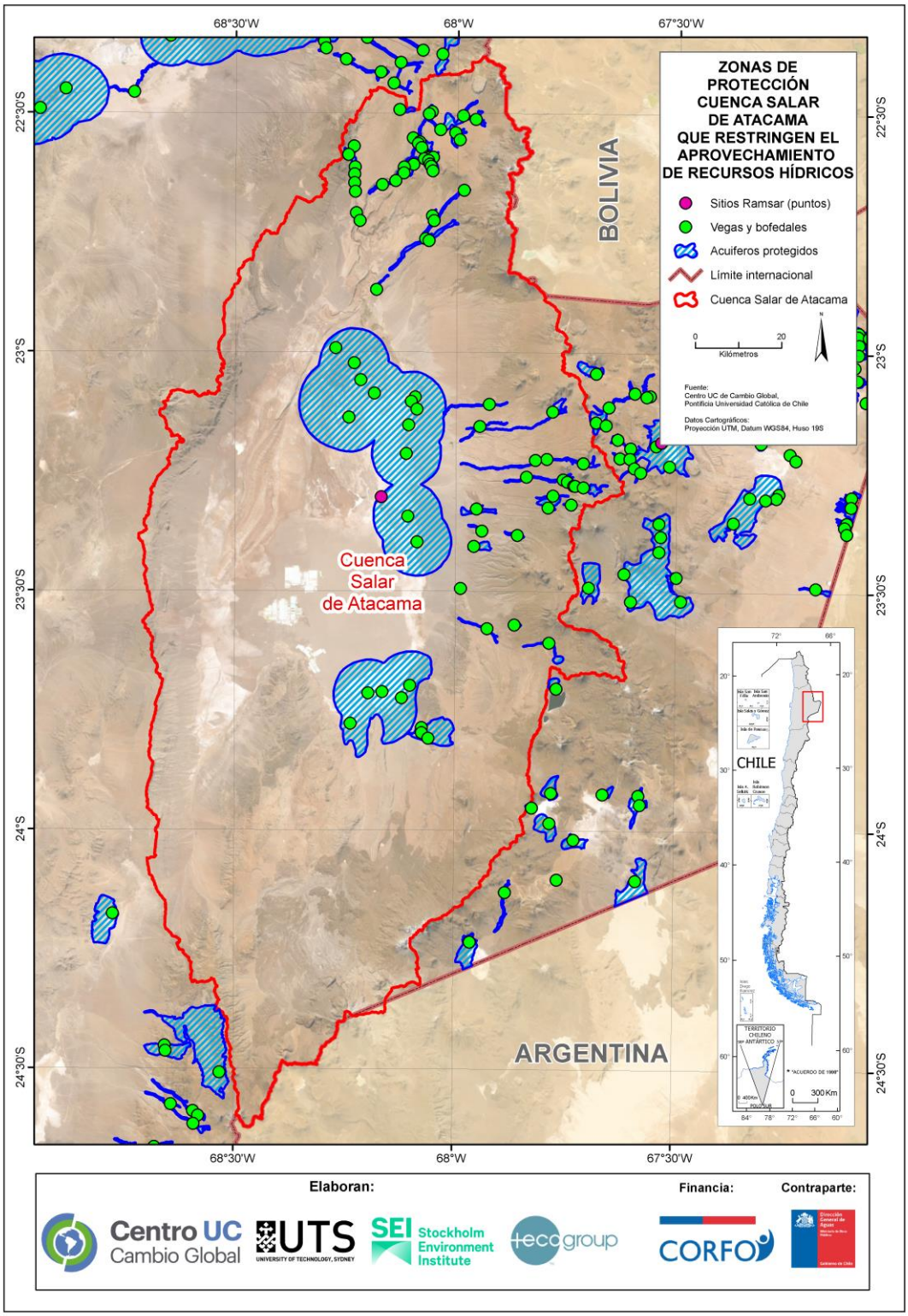


Figura I-37: Zonas de protección en la cuenca del Salar de Atacama que restringen el aprovechamiento de recursos hídricos.
Se incluyen las agrupaciones tales como vegas y bofedales y acuíferos protegidos.
Fuente: Elaboración propia a partir de información del MMA

Además de las zonas con protección oficial mencionadas y descritas anteriormente, existen sistemas cuya protección por parte del estado se encuentre en revisión actualmente. Tal es el caso de los glaciares.

Glaciares:

Los glaciares pese a ser considerados sistemas sensibles no tienen una ley de protección especial pese a que actualmente existen en discusión dos proyectos de ley que tienen como objetivo la protección directa de estos (Boletín del Congreso Nacional 11876-12[6]) e impedir la constitución de derechos de aprovechamiento de aguas sobre ellos (Boletín del Congreso Nacional N°11597-12[7]). Los glaciares corresponden a cuerpos de agua en forma de hielo, los cuales se consideran reservas importantes de agua. Se cuenta con aproximadamente 24.114 glaciares en Chile, los cuales cubren una superficie total de 23.641 km^2. El 88% de ellos se encuentra en la Zona Austral, el 7% en la Zona Sur, el 4% en la Zona Centro, mientras que el 1% restante se ubica en la Zona Norte, sin incluir estos cuerpos de agua menores a 0,01 km^2 (UGN-DGA (2019)). Dentro del 1% de los glaciares de la zona norte, aproximadamente 18 de estos glaciares se encuentran dentro de la cuenca del Salar de Atacama, cubriendo un área aproximada de 0,8 km^2. La Figura I-38 muestra el catastro de glaciares dentro de la cuenca del Salar de Atacama. Actualmente, el 86% de los glaciares en Chile se encuentra bajo protección por el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE). Respecto del 14% restante, pese a no pertenecer a una categoría especial de protección, el Reglamento del SEIA establece que el titular de un proyecto deberá presentar un Estudio de Impacto Ambiental si su proyecto o actividad se localiza próxima a glaciares, susceptibles de ser afectados (UGN-DGA (2019)).

6 https://www.camara.cl/legislacion/ProyectosDeLey/tramitacion.aspx?prmID=12397&prmBoletin=11876-12

7 https://www.camara.cl/legislacion/ProyectosDeLey/tramitacion.aspx?prmID=12114&prmBoletin=11597-12

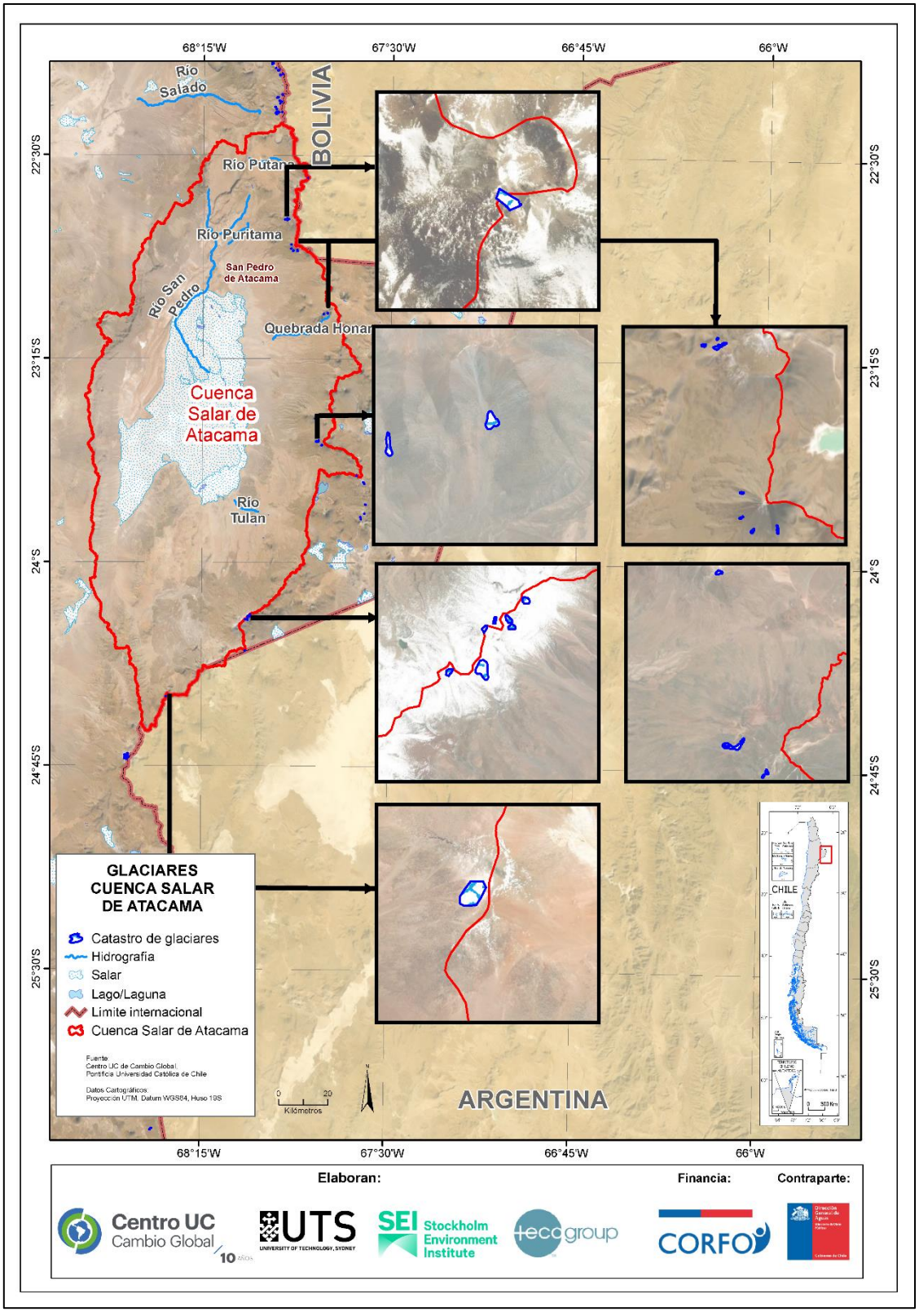


Figura I-38: *Distribución espacial de los glaciares reconocidos por la DGA en la cuenca del Salar de Atacama.*

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la DGA

Derechos de Agua otorgados

Los derechos de agua otorgados[8] representan un grado de protección, de acuerdo al artículo 61 del Código de Aguas, en el sentido de que se prohíbe la instalación de obras de extracción similares a la infraestructura existente para el ejercicio del derecho otorgado, con el fin de evitar la sobreexplotación del recurso.

Al respecto se cuenta con 5.988 l/s de derechos de agua otorgados de tipo superficial más subterráneo en la cuenca del Salar de Atacama, a diciembre de 2019 (Tabla I-23). El 64,7% del caudal total otorgado corresponde a derechos de agua subterránea, mientras que el 35,3% restante corresponde a agua superficial. Respecto a los usos de los derechos de agua otorgados, 3.633,7 l/s (60,7% del total de derechos) están asociados a la minería, mientras que 1.660,8 l/s (27,7% del total de derechos) están asociados a riego. Se debe considerar que no existe información de uso de un total de 114,3 l/s (1,9% del total de derechos). Sólo 3,2 l/s de derechos de agua otorgados son de tipo eventual y discontinuo, mientras que el resto del caudal catastrado en esta sección está asociado a un ejercicio permanente y continuo.

Tabla I-23. Derechos de agua concedidos en la cuenca del Salar de Atacama según uso de agua en términos de caudal y porcentaje respecto del total.

	Caudal l/s - (% del total)		
Uso de Agua	**Subterránea**	**Superficial**	**Total**
Uso Minero o Industrial	3.625,2 - (93,6%)	8,5 - (0,4%)	3.633,7- (60,7%)
Riego	4,4 - (0,1%)	1.656,4 - (78,3%)	1.660,8 - (27,7%)
Bebida/ Uso Doméstico/ Saneamiento	80 - (2,1%)	15,9 - (0,8%)	95,9 (1,6%)
Otros Usos	163,7 - (4,2%)	319,6 - (15,1%)	483,3 - (8,1%)
Blanco	-	114,3 - (5,4%)	114,3 - (1,9%)
Total	**3.873,3 - (64,7%)**	**2.114,7 - (35,3%)**	**5.988 - (100%)**

Fuente: Catastro público DGA (diciembre 2019).

Reservas de agua

La reforma del Código de Aguas del año 2005, introdujo la figura de reserva de caudal. El decreto de reserva es una facultad del presidente de la República (mediante decreto fundado y previo informe de la DGA, art 147 bis) que permite, a través de un decreto fundado, reservar el recurso para el abastecimiento de la población por no existir otros medios para obtener el agua, o bien, tratándose de solicitudes de derechos no consuntivos y por circunstancias excepcionales y de interés nacional. Para lo anterior, es posible disponer la denegación parcial de solicitudes de derechos de aprovechamiento en tramitación.

No existen reservas de caudales en la cuenca del Salar de Atacama, de modo que no se consideran en el presente análisis.

[8] Fuente: Información obtenida de la Dirección General de Aguas actualizado a diciembre de 2019.

Declaración de Zonas de agotamiento

Las declaraciones de zonas de agotamiento corresponden a un instrumento que posee la DGA para decretar la no disponibilidad del recurso hídrico para el otorgamiento de nuevos derechos de agua superficiales de ejercicio permanentes y de uso consuntivo (no afecta la disponibilidad de derechos eventuales y usos no consuntivos si existiera la disponibilidad). Respecto de su delimitación, la zona declarada en agotamiento corresponde a las cuencas y/o subcuencas que aportan caudal a cauce principal que las describe, vale decir, al río desde donde los derechos pueden ser otorgados. Dada que estas declaraciones son referentes a aguas superficiales, no aplica a los derechos que aguas subterráneas que pudiesen ser otorgados.

En ese sentido, dentro de la cuenca del Salar de Atacama, existen dos subcuencas declaradas en agotamiento definidas en las Resoluciones N° 197 del 24 de enero de 2000, N°44 del 13 de mayo de 2016 y N°3 del 12 de abril de 2017. Estas zonas se ubican al norte de la cuenca y corresponden a la subcuenca del Río San Pedro (y sus afluentes), declarada zona de agotamiento por la Resolución N°44, y la del rio Vilama (y sus afluentes) declarada en agotamiento por la Resolución N° 03. Por su parte, y colindando con el noroeste de la cuenca del Salar de Atacama, la cuenca del rio Loa y sus afluentes, fue declarada en agotamiento en la Resolución N° 197. La Figura I-39 muestra las zonas declaradas en agotamiento en la cuenca.

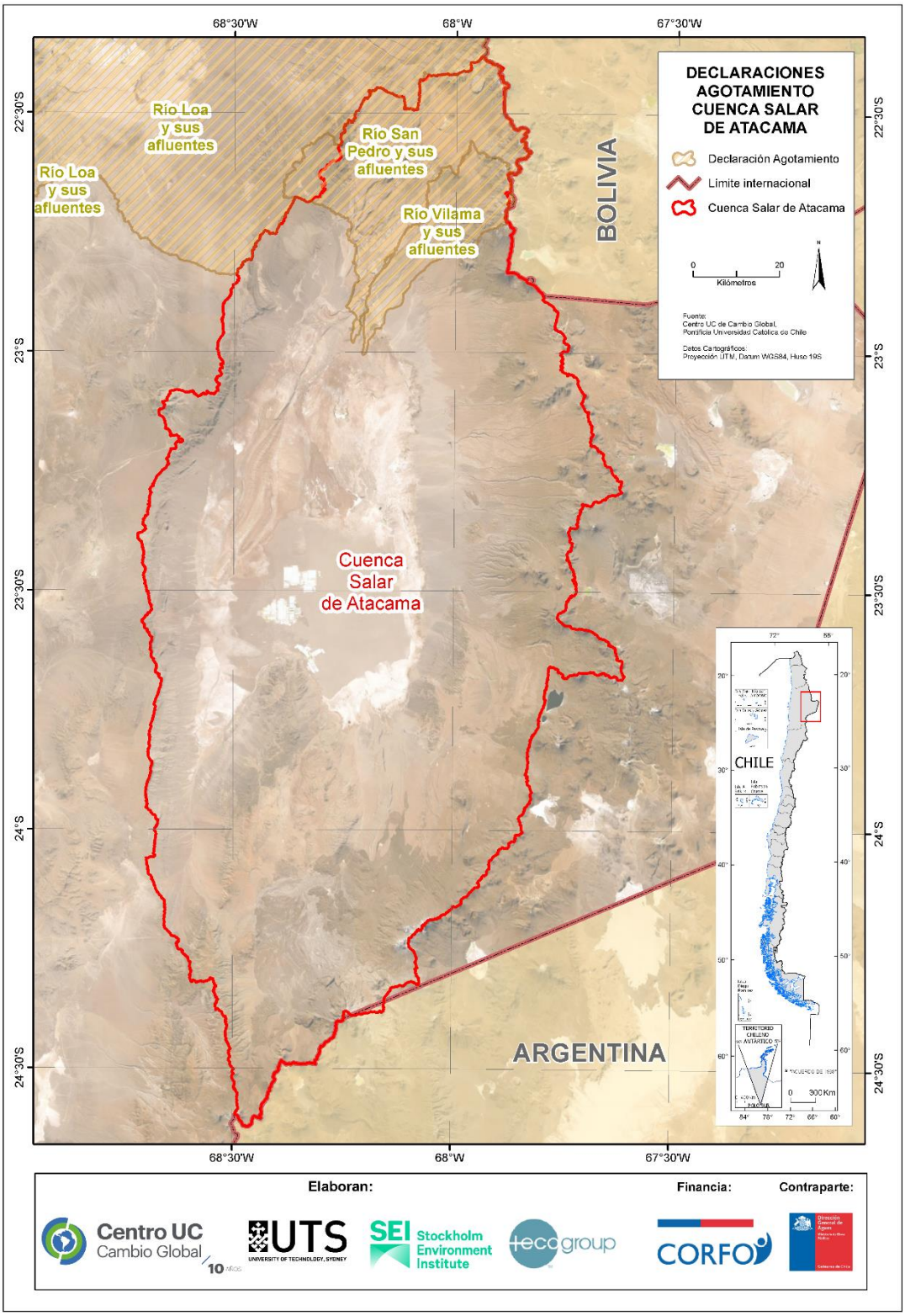


Figura I-39: Zonas con declaraciones de agotamiento en las subcuencas del Río San Pedro y Río Vilama de la cuenca del Salar de Atacama
Fuente: Elaboración propia a partir de información de la DGA

Zonas de restricción y prohibición

Dentro de la región de Antofagasta, lugar en donde se ubica la cuenca del Salar de Atacama, existen nueve SHAC limitados en su extracción de aguas subterráneas según resolución de la DGA, entre las cuales cinco están asociadas a áreas de restricción (definida como una zona en donde existe grave riesgo de descenso en los niveles de agua con el consiguiente perjuicio de los derechos establecidos en él) y cuatro que decretaron como zonas de prohibición (un mecanismo diseñado para proteger la sustentabilidad del acuífero).

En específico, las áreas de restricción declaradas buscan proteger los Sectores Hidrológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) en base a informes técnicos que reporten resultados que indiquen que se encuentra en peligro la sustentabilidad del acuífero, y que por lo tanto solo faculta a la DGA a otorgar derechos de aprovechamiento provisional.

Por otro lado, las zonas de prohibición si estipulan la denegación de otorgamiento de derechos de aprovechamiento, y que se decreta cuando la disponibilidad del recurso hídrico se halla completamente comprometida tanto en carácter provisional como definitivo.

El interior del Salar de Atacama cuenta con dos zonas de prohibición, entre las cuales se encuentra la zona C2 (ubicada al sur de la cuenca, véase Figura I-40), mientras que sólo una pequeña área del sector Puna de Atacama Sur se ubica al interior de la cuenca (al comparar la delimitación DARH-CIREN con aquella de áreas de restricción y zonas de prohibición elaborada por la DGA), por lo que se encuentra colindante. Otras zonas de prohibición adyacentes a la cuenca corresponden al sector de Salar de Punta Negra e Imilac hacia el suroeste y el sector de Sierra Gorda hacia el noroeste. El área de restricción de Salar de Elvira – Laguna seca se ubica hacia el oeste. La Tabla I-24 muestra lo expuesto junto con las fechas de toma de razón para aquellas áreas de restricción y zonas de prohibición, en donde al menos un sector se encuentre al interior de la región de Antofagasta).

Tabla I-24: Declaraciones de zonas de prohibición y áreas de restricción en la cuenca del Salar de Atacama y cuencas colindantes.

Región	Cuenca	Acuífero	Sector	Límite	Toma razón	En Salar Atacama
Antofagasta	Salar de Atacama	Salar de Atacama	C2	Zona de Prohibición	2015-07-14	SI
Antofagasta	Endorreica entre Fronterizas y Salar Atacama	Puna de Atacama Sur	Puna de Atacama Sur	Zona de Prohibición	2018-07-10	SI
Antofagasta	Endorreicas Salar de Atacama-Vertiente Pacífico	Salar de Elvira-Laguna Seca	Salar de Elvira - Laguna Seca	Área de Restricción	2012-05-28	NO
Antofagasta	Quebrada Caracoles	Sierra Gorda	Sierra Gorda	Zona de Prohibición	2002-01-07	NO
Antofagasta	Quebrada Caracoles	Salares Navidad y Mar Muerto	Salares Navidad y Mar Muerto	Área de Restricción	2018-07-04	NO
Antofagasta	Endorreicas Salar de Atacama-Vertiente Pacífico	Salar de Punta Negra e Imilac	Salar de Punta Negra e Imilac	Zona de Prohibición	2018-07-12	NO

Fuente: Elaboración propia

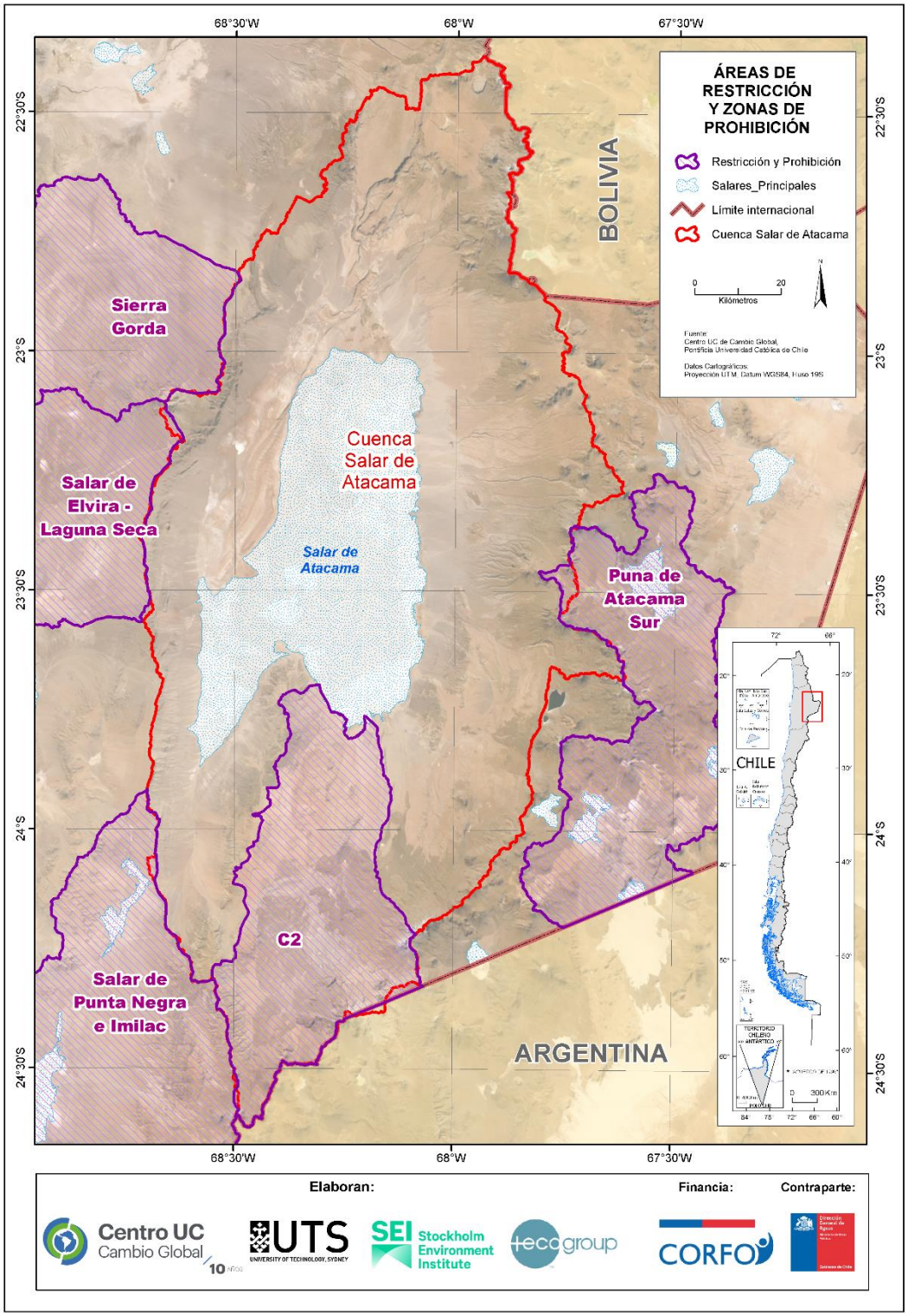


Figura I-40 Áreas de restricción y zonas de prohibición en la cuenca del Salar de Atacama
Fuente: Elaboración propia a partir de información de la DGA

Restricciones en el ejercicio de derechos de aprovechamiento de aguas

Adicionalmente a la restricción en la asignación de nuevos derechos de aprovechamiento de agua existen una serie de instrumentos de gestión que pueden limitar el ejercicio de derechos de aprovechamiento de aguas ya otorgados. Se describen las principales categorías con la relevancia que tienen actualmente en la gestión de Recursos Hídricos en la Cuenca del Salar de Atacama.

Decretos de escasez

El artículo 314 inciso 1° del Código de Aguas, dispone que el presidente de la República, a petición o con informe de la Dirección General de Aguas, podrá, en épocas de extraordinaria sequía, declarar zonas de escasez por períodos máximos de seis meses, no prorrogables. En esos períodos, la DGA dispone de atribuciones que permiten flexibilizar la administración del agua e intervenir directamente para atender necesidades derivadas de las sequías para reducir al mínimo los daños generales producidos, pudiendo llegar a suspender las atribuciones de las Juntas de Vigilancia y los seccionamientos de las corrientes naturales que estén comprendidas dentro de ella (Spoerer, 2016). Además, la DGA puede autorizar extracciones tanto superficiales como subterráneas desde cualquier punto, sin necesidad de constituir DAA y sin la limitación de caudal ecológico mínimo. Este tipo de instrumento no ha sido utilizado en la cuenca del Salar de Atacama[9].

Planes de Alerta Temprana

Como parte del acto administrativo en cuya virtud se constituye el derecho de aprovechamiento de agua (Artículo 149 del CA) se deben incluir especificaciones técnicas relacionadas con la naturaleza especial del respectivo derecho y las modalidades que lo afecten, con el objetivo de conservar el medio ambiente o proteger derechos de terceros. En este contexto el Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos[10] indica que en la asignación de derechos provisionales en áreas de restricción bajo ciertas circunstancias[11] la DGA puede exigir un Plan de Alerta Temprana (PAT), en aquellos casos cuya evaluación y características particulares justifiquen la conveniencia de establecer un mejor control y seguimiento del estado del acuífero y su condición de explotación. En la cuenca del Salar de Atacama existen una serie de derechos de aguas subterráneas que se han otorgado con un PAT tal como se presenta en la *Tabla I-25*.

---

[9] https://dga.mop.gob.cl/administracionrecursoshidricos/decretosZonasEscasez/Paginas/default.aspx

[10] Aprobado mediante resolución DGA N° 3.504, de 17 de diciembre de 2008, modificado por la resolución DGA (exenta) N° 2.455, de 10 de agosto de 2011. https://dga.mop.gob.cl/legistlacionynormas/normas/Reglamentos/proced_darh.pdf

[11] Para aquellos sectores en los cuales no sea aplicable la metodología estándar, debido a las características particulares del sector, o bien no exista un SHAC.

Tabla I-25: Planes de Alerta Temprana asociados al otorgamiento de derechos de agua existentes en la cuenca del Salar de Atacama.

Nombre PAT	Resolución DGA	Usuario
Plan de Alerta Temprana para el acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, II Región, Antofagasta	Resolución DGA Ex. N°1972/2001	CMZ y Minera Escondida Ltda.
Plan De Alerta Temprana Para El Condicionamiento Del Ejercicio De Derechos De Aprovechamiento De Aguas Subterráneas Otorgados Y A Otorgar Sobre El Salar De Atacama Sector A2, En La Comuna De San Pedro De Atacama, Región De Antofagasta (PAT EPSA 2018)	Resolución DGA Ex. N°3529/2018	Exploraciones San Pedro S.A.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de la DGA

Reducción temporal del ejercicio de derechos de aprovechamiento

En el Código de Aguas se establece la potestad que tiene la DGA para establecer una reducción temporal el en ejercicio de derechos de aprovechamiento, a prorrata de ellos. En enero de 2018 fue publicada la Ley N° 21.064 que modifica el Código de Aguas en materia de fiscalización y sanciones. En particular se trata en esta modificación limitaciones respecto de la explotación de derechos. De esta manera se modifica el artículo 62 del Código de Aguas indicando que la reducción temporal puede ser declarada de oficio por la DGA. Antes de la reforma de enero de 2018 solo procedía ante la petición de uno o más afectados. Los parámetros que son considerados para ejercer esta reducción temporal se establecen en el Art. 29 del DS 203 de 2013 que fija las normas de exploración y explotación de Aguas subterráneas). Este tipo de instrumento no ha sido ejercido en la cuenca del Salar de Atacama.

SEIA y limitación del ejercicio de derechos asociado a Resolución de Calificación Ambiental

El Sistema de Evaluación de Impacto Medio Ambiental (SEIA), es uno de los instrumentos de gestión ambiental contenido en la ley 19300. Este instrumento permite introducir la dimensión ambiental en el diseño y la ejecución de los proyectos y actividades que se realizan en el país; a través de él se evalúa y certifica que las iniciativas, tanto del sector público como del sector privado, se encuentran en condiciones de cumplir con los requisitos ambientales que les son aplicables[12]. Si luego de la revisión acabada del proyecto, este se ajusta a la normativa ambiental vigente y no presenta inconvenientes para la comunidad, la autoridad administrativa otorgará una Resolución de Calificación Ambiental (RCA en adelante), que, en algunos casos, puede estar sujeta al cumplimiento de ciertas condiciones, que tiendan a minimizar los impactos medio ambientales, derivados del desarrollo del proyecto (Spoerer, 2016). En el establecimiento de esta RCA puede limitarse el ejercicio del derecho de aprovechamiento de agua si esto fuese necesario para reducir los impactos ambientales del proyecto evaluado (Riestra, 2007). Cabe destacar que

[12] https://www.sea.gob.cl/sea/que-es-seia

de manera independiente a los Planes de Alerta Temprana asociados al otorgamiento de derechos de agua, existen Planes de Contingencia y Planes de Alerta Temprana asociados a los EIA aprobados de los usuarios de agua de la cuenca. Estos planes se presentan en la Tabla I-26.

Tabla I-26 Planes de Alerta Temprana asociados a los EIA aprobados en la cuenca del Salar de Atacama

Nombre PAT/PC	Proyecto	Usuario
Plan de Alerta Temprana Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (PAT MNT)	Lixiviación de Óxidos de Cobre y Aumento de la Capacidad de Tratamiento de Mineral Sulfurado	Minera Escondida Ltda. y CMZ
PAT Sector de Alerta Núcleo	Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama	Albemarle (ex Rockwood Litio)
PAT Sector de Alerta Acuífero	Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama	Albemarle (ex Rockwood Litio)
PAT Sector de Alerta Norte	Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama	Albemarle (ex Rockwood Litio)
PC para el sector de Soncor	Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama	SQM
PC para el sector de Aguas de Quelana	Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama	SQM
PC para el sector de Zona de Vegetación Hidromorfa, Sistema Vegetación Borde Est	Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama	SQM
PC para el sector de Zona de Vegetación Brea-Atriplex, Sistema Vegetación Borde Est	Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama	SQM
PC para el sector de Zona de Alerta Temprana, Sistema Vegetación Borde Est	Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama	SQM
Plan de Contingencia Provisorio para el Sistema Peine	Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama	SQM

Fuente: Elaboración propia a partir de información del SEA y la SMA

Decretos de escasez

El artículo 314 inciso 1° del Código de Aguas, dispone que el presidente de la República, a petición o con informe de la Dirección General de Aguas, podrá, en épocas de extraordinaria sequía, declarar zonas de escasez por períodos máximos de seis meses, no prorrogables. En esos períodos, la DGA dispone de atribuciones que permiten flexibilizar la administración del agua e intervenir directamente para atender necesidades derivadas de las sequías para reducir al mínimo los daños generales producidos, pudiendo llegar a suspender las atribuciones de las Juntas de Vigilancia y los seccionamientos de las corrientes naturales que estén comprendidas dentro de ella (Spoerer, 2016). Además, la DGA puede

autorizar extracciones tanto superficiales como subterráneas desde cualquier punto, sin necesidad de constituir DAA y sin la limitación de caudal ecológico mínimo.

Reducción temporal del ejercicio de derechos de aprovechamiento (art. 62 CA)

En enero de 2018 fue publicada la Ley N° 21.064 que modifica el Código de Aguas en materia de fiscalización y sanciones. En particular se trata en esta modificación limitaciones respecto de la explotación de derechos. De esta manera se modifica el artículo 62 del Código de Aguas indicando que la reducción temporal puede ser declarada de oficio por la Dirección General de Aguas (DGA). Antes de la reforma de enero de 2018 solo procedía ante la petición de uno o más afectados.

Normas de Calidad y de Emisión

El otro tipo de instrumentos que se derivan de la Ley de Bases del Ambiente tiene relación con las Normas de Calidad y Normas de Emisión. Estas normas, fijan los parámetros que se deben considerar, por aquellos titulares de derechos de agua que producto de su uso, las contaminan. Además, en el SEIA, la autoridad con competencia ambiental debe tomar en cuenta estas normas de calidad y emisión para determinar si los proyectos se ajustan a la normativa ambiental, y de no hacerlo, exigir planes de compensación y mitigación para que se ajusten a ellas. La superación de Normas de Calidad (en particular son relevantes las Normas Secundarias) pueden derivar en un Plan de Descontaminación que limite el ejercicio de derechos de agua.

No existen Normas Secundarias de Calidad de Aguas en estudio o tramitación en la Cuenca del Salar de Atacama por lo que este tipo de instrumentos no es aplicable al momento de realizar este levantamiento de información[13].

I.4.6.2.4 Instrumentos y herramientas para la gestión de áreas naturales[14]

En esta sección se presenta información que describe los instrumentos y herramientas de gestión de áreas naturales. En particular se detallan aspectos de aquellos instrumentos que garantizan la protección de los ecosistemas presentes en el Salar de Atacama.

Según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN por sus siglas en inglés), las áreas de protección corresponden a "un espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y gestionado, mediante medios legales u otros tipos de medios eficaces para conseguir la conservación a largo plazo de la naturaleza y de sus servicios ecosistémicos y sus valores culturales asociados". Por su parte, en Chile, la definición de áreas de protección se describe en el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (D.S. 40 del año 2013), como aquellas "porciones de territorio, delimitadas geográficamente y establecidas mediante un acto administrativo de autoridad

[13] http://planesynormas.mma.gob.cl/login/index.php (revisado el 14 de Junio de 2020).

[14] Los acuíferos que alimentan vegas y bofedales también son instrumentos para la gestión de áreas naturales (ver 3.6.2.3.1).

competente, colocadas bajo protección oficial con la finalidad de asegurar la diversidad biológica, tutelar la preservación de la naturaleza o conservar el patrimonio ambiental". La normativa que rige en estas áreas es responsabilidad del Comité Nacional de Áreas Protegidas (aprobado mediante resolución exenta N°83 del Ministerio del Medio Ambiente), quienes se encargan de desarrollar y fortalecer el marco político, normativo e instrumental para la gestión de sus recursos y el cumplimiento de los compromisos de conservación nacionales e internacionales.[15]

Conforme a la normativa regulatoria aplicable, el Ministerio del Medio ambiente establece diversas clasificaciones de áreas protegidas, dentro de las cuales se distinguen: Parque Nacional, Reserva Nacional, Reserva Forestal, Monumento Natural, Reserva Región Virgen, Área Marina Costera Protegida, Parque Marino, Reserva Marina y Santuario de la Naturaleza.

Otras categorías para designar áreas bajo protección ambiental corresponden a: Sitios Ramsar, Reserva de la Biosfera, Bien Nacional Protegido[16], Paisaje de Conservación, Sitio Prioritario para la Conservación. Se describen a continuación aquellos instrumentos en estas categorías presentes en la cuenta del Salar de Atacama.

Sitios Ramsar

Los "Sitios Ramsar" o Humedales de Importancia Internacional, corresponde a aquellos ecosistemas reconocidos y designados por los gobiernos internacionales que son Partes Contratantes en la Convención de Ramsar de 1971y forman la mayor red mundial de "áreas protegidas" de tipo humedal. Estos sitios Ramsar corresponden a humedales para los cuales se desea conservar tanto sus recursos, como su flora y fauna, así como para el uso de esto en forma racional. En el mundo se encuentran protegidos 1.923 humedales, de los cuales 14 se ubican en Chile, en donde 9 de éstos se encuentran incluidos dentro del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE).

Dentro de la cuenca del Salar de Atacama, se ubica el Sitio Ramsar Sistema Hidrológico de Soncor. Adicionalmente, dentro de la región de Antofagasta y fuera de la cuenca del Salar de Atacama, se ubican los sitios Ramsar Salar de Pujsa y Salar de Tara, dentro de la comuna de San Pedro de Atacama, y el sitio Ramsar Salar de Aguas Calientes IV, en la comuna de Antofagasta. A continuación, se describe el Sistema Hidrológico de Soncor.

Sistema Hidrológico de Soncor

El Sistema hidrológico de Soncor fue reconocido como sitio RAMSAR el 2 de diciembre de 1996 (según el D.S. 771/81 del Ministerio de Relaciones Exteriores), y es administrado por la Corporación Nacional Forestal, CONAF. Se encuentra incluido en el Plan de Gestión Participativa de la Reserva por estar dentro de la Reserva Nacional Los Flamencos

[15] http://areasprotegidas.mma.gob.cl/reglamentos-y-guias/

[16] La Laguna Lejia corresponde a un bien nacional protegido, pero está fuera de los límites de la Cuenca del Salar de Atacama establecidos para este trabajo.

(CONAMA, 2003). El sistema tiene una elevación media es de 2300 m.s.n.m. y su área de protección que comprende 67.133,05 ha (Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, (2017a)).

Está formado por tres lagunas someras Puilar, Chaxa (37 ha), Barros Negros (103 ha) (Dorador et al., 2018), clasificadas como salobres y permanentes de no más de 1,5 m de profundidad. Las lagunas están interconectadas superficial y subsuperficialmente y se emplazan sobre una capa costrosa formada por la acumulación constante de cristales de cloruro y sulfuro que origina la excesiva evaporación en el salar (GCF Ingenieros, 2010). Las Lagunas Chaxa y Barros Negros son alimentadas por aguas superficiales que forman el Canal Burro Muerto (1 ha) que corre desde el norte.

Las lagunas albergan componentes micro faunísticos y microalgales, fuente alimentaria de importantes especies de avifauna migratoria como las tres especies de flamencos, chorlos y playeros. Este lugar conforma el centro reproductivo más importante a nivel mundial de estas especies de flamencos: *Phoenicopterus chilensis*, *Phoenicoparrus jamesi* y *Phoenicoparrus andinus*. En la Figura I-41 se presenta la disposición geográfica de los sitios Ramsar. La superficie total del sitio Ramsar Sistema Hidrológico de Soncor del Salar de Atacama es de 67.133 (há) (Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, 2017a).

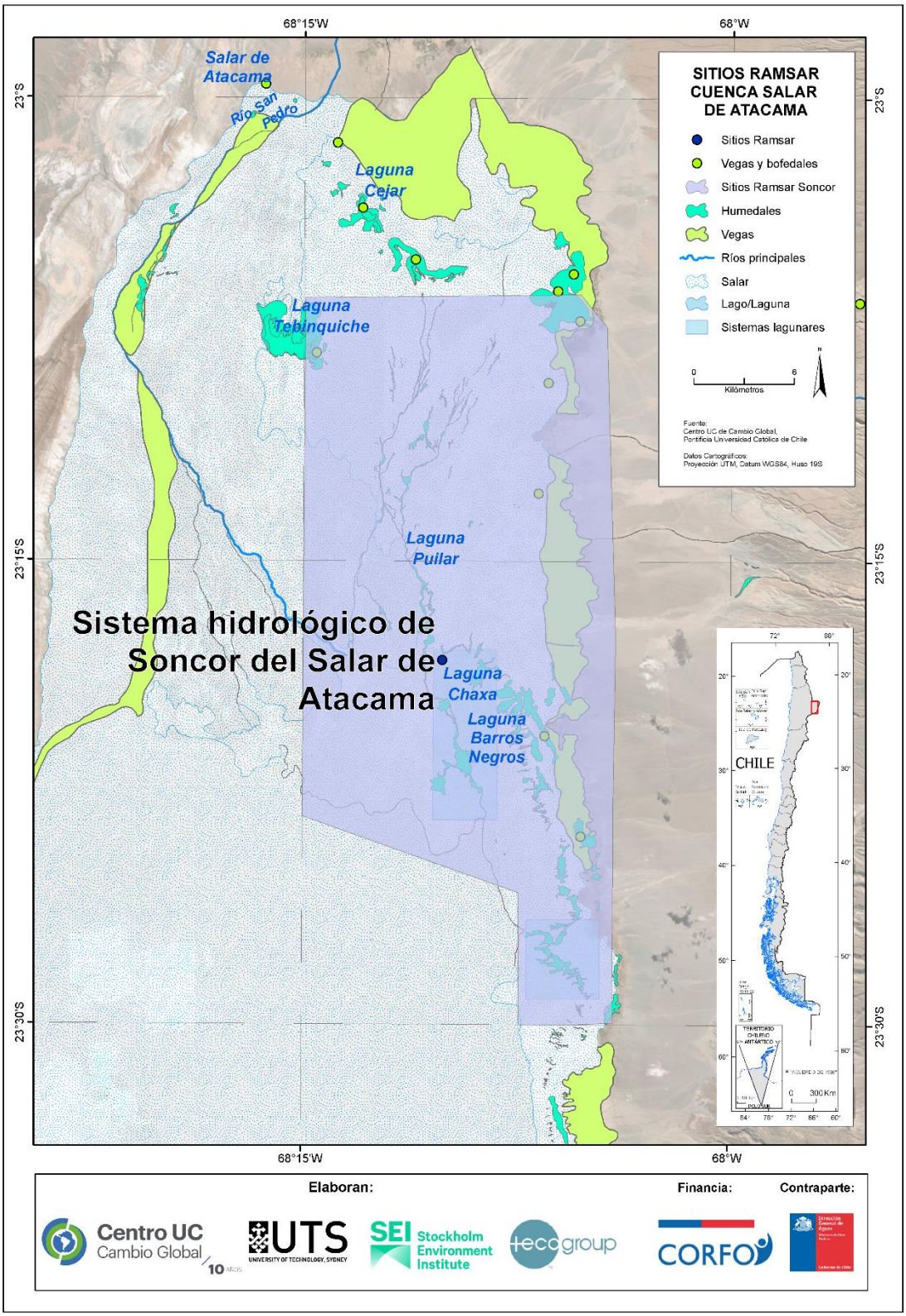


Figura I-41 *Sitios Ramsar de la Cuenca del Salar de Atacama.*
Fuente: Elaboración propia a partir de información del MMA

Reserva Nacional

Están establecidas en el D.S. N° 531, de 1967, del Ministerio de Relaciones Exteriores y en la Ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Por consiguiente, tiene una consagración jurídica formal. Desde la Ley N° 20.417 (2010), el Ministerio de Medio Ambiente ejerce la supervigilancia del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNAPE). Actualmente están administradas por la Corporación Nacional Forestal (CONAF), dependiente del Ministerio de Agricultura, y bajo el manejo del SNAPE. La categoría busca proteger la flora y la fauna, bajo vigilancia oficial, para permitir la conservación u utilización de sus recursos. Posee clase IV de clasificación IUCN.

A diferencia de los Parques Nacionales, en donde los recursos naturales que en ellos existen no pueden ser utilizados con fines económicos, los recursos naturales presentes en las Reservas Nacionales pueden ser utilizados de forma sustentable.

Reserva Nacional Los Flamencos:

Área bajo Protección Oficial perteneciente al Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas por el Estado (SNASPE), administrada por CONAF (Corporación Nacional Forestal) y vigente desde el 17 de octubre de 1990 (Decreto Supremo n° 50 del Ministerio de Agricultura) (Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, 2017a).

Ubicada administrativamente en la comuna de San Pedro de Atacama, la Reserva está dividida en siete sectores: Salar de Tara, Salar de Aguas Calientes y Salar de Pujsa, ubicados en el Altiplano; Lagunas Miscanti, Miñiques, Valle de La Luna, Aguas de Quelana y Tambillo, en el sector del Salar de Atacama (CONAF, 2008, Villablanca & Ibarra, 2013). Dentro de los límites de la reserva se encuentra el Sistema Hidrológico de Soncor que además posee la categoría de sitio RAMSAR (Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK (2017a)).

De los sectores mencionados, Aguas de Quelana, Tambillo y Sistema Hidrológico de Soncor están dentro de los límites establecidos para los propósitos del presente trabajo. El sector de Aguas de Quelana corresponde a un área de superficies inundadas estacionalmente y de pequeña extensión que se ubica al sur del Sistema Hidrológico de Soncor. El sector de Tambillo se caracteriza por la existencia de un bosque de 370 ha de tamarugos (Prosopis tamarugo), sin la presencia de cursos de agua superficiales permanentes (Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, 2017a).

En toda su extensión, la reserva alberga a las 3 especies de flamencos descritas anteriormente, brindándoles condiciones de reproducción, anidación y refugio ideales. Estas especies se encuentran protegidas (CONAF 2015). En este lugar el flamenco andino o parina grande (*Phoenicoparrus andinus*) presenta sus mayores agregaciones en los periodos de verano e invierno. En este último periodo el salar se convierte en el principal sitio de resguardo invernal de la zona para dicho flamenco, y de igual forma para las otras dos especies (flamenco de James y flamenco chileno). Estas condiciones únicas se ven favorecidas por la sostenida oferta trófica de microalgas y microinvertebrados disponible para los flamencos, tanto en cantidad como en diversidad. La delimitación de estas

reservas nacionales se aprecia en la Figura I-42.

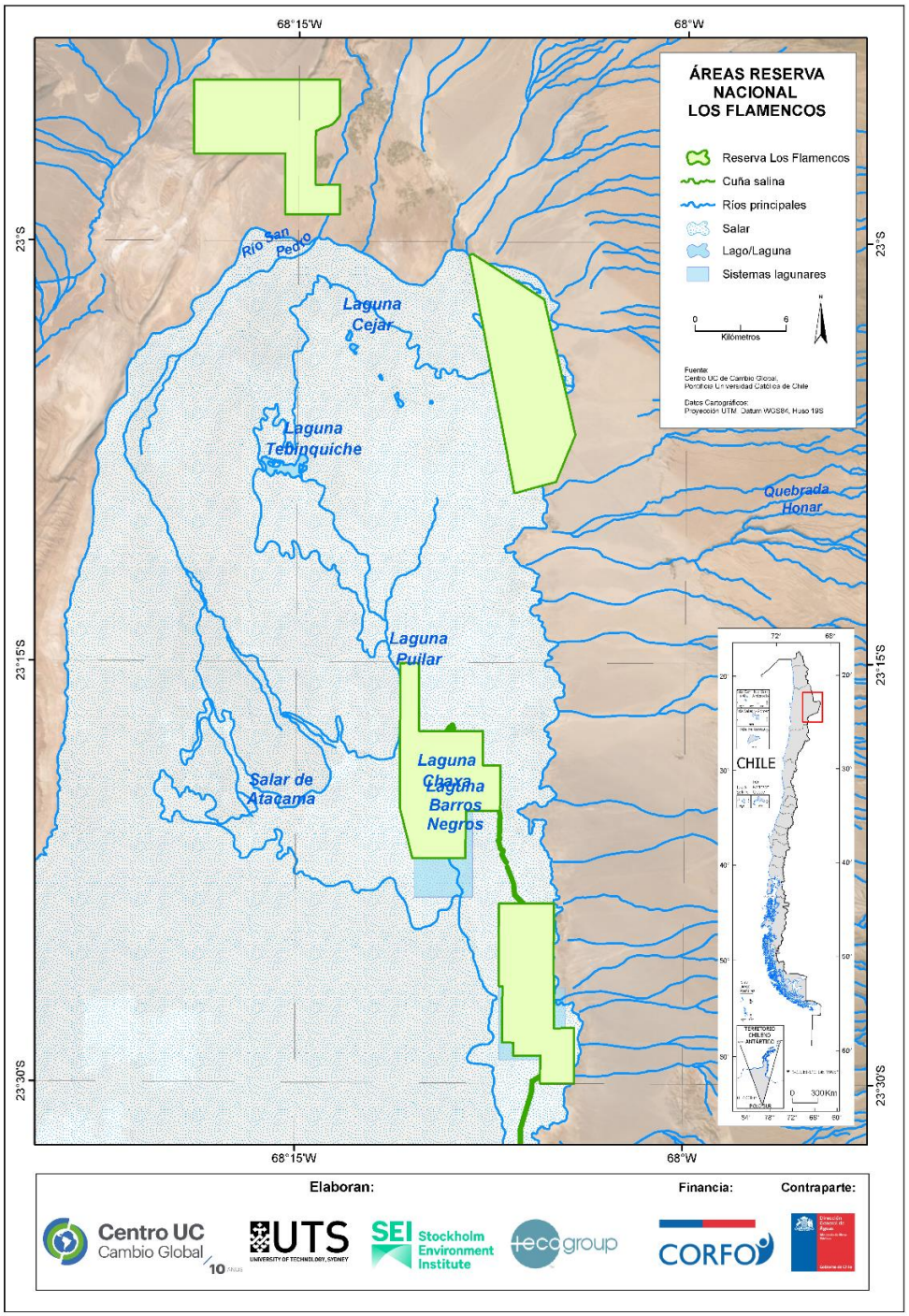


Figura I-42 *Distribución espacial de Reservas Nacionales de Los Flamencos en la cuenca del Salar de Atacama.*
Fuente: Elaboración propia a partir de información del MMA

Santuario de la Naturaleza:

Se encuentran establecidos en la Ley N°17.288 de 1970 sobre Monumentos Nacionales. También tiene consagración legal desde la ley N° 20.417 (2010) del Ministerio de Medio Ambiente. Corresponde a sitios terrestres o marinos cuya conservación es de interés para la ciencia y el Estado, dado que ofrecen formaciones naturales de especial atención para distintos tipos de estudios científicos. Poseen categoría UICN III y IV, la cual hace referencia a la conservación mediante manejo activo de especies y hábitats.

Santuario de la Naturaleza Valle de la Luna:

Este Santuario fue creado bajo Dto. 37/1982 del Ministerio de Educación Pública y sus características geomorfológicas y paisajistas del área le otorgan la calidad de interés científico y turístico. Es un sector bastante desprovisto de vegetación y fauna. Algunas de las especies de plantas que se pueden observar son especímenes de *Pluchea absinthioides* (brea), *Atriplex atacamensis* (cachiyuyos) y *Distichlis spicata* (grama salada). Las especies de mamíferos que habitan la zona son: zorro *Pseudalopex culpaeus* (culpeo), *Phyllotys darwini* (ratón orejudo), *Thylamys pallidior* (yaca de la puna) y *Agriornis albicauda* (mero de la puna). Se evidencian además ejemplares aislados de la lagartija del norte (*Liolaemus* sp.).

Santuario de la Naturaleza Laguna Tebenquiche:

Recientemente declarado dentro de esta categoría en mayo del 2019 (Decreto n° 95). En el humedal altoandino Laguna Tebenquiche se busca reservar los hábitats de flora y fauna (principalmente avifauna) y los distintos ecosistemas microbianos de microorganismos extremófilos presentes en la laguna.

Las bacterias que predominan este sistema corresponden a las *Firmicutas*, *Acetothermia*, *Chloroflexia* y P*lanctomicetos* (Farías, M. et al. (2017)), las cuales habitan en formaciones de tapetes microbianos y domos de yeso (Farías (2018)).

Sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad:

Los sitios prioritarios corresponden a espacios geográficos terrestres, de aguas continentales, costeros o marinos, de alto valor para la conservación, identificados por su aporte a la representatividad ecosistémica, su singularidad ecológica o por constituir el hábitat de especies amenazadas. Por lo tanto, su conservación es prioritaria en el marco de la Estrategia Nacional de Biodiversidad. A la fecha existen 64 Sitios Prioritarios a nivel nacional, cuya denominación incluso tiene efectos para el sistema de evaluación de impacto ambiental.

Desde el punto de vista de su base legal, los sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad se enmarcan en la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente (Artículo 11, letra d). No obstante, los sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad nacen al bajo el alero de los comités Regionales de Biodiversidad,

coordinados en los años 2001 y 2002 por la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).

Dentro de esta categoría está el Salar de Atacama en toda su extensión y los Ayllus de San Pedro de Atacama.

Ayllus de San Pedro de Atacama[17]*:*

Corresponden a la red de parcelas que históricamente se ubican en la ciudad de San Pedro de Atacama. Con su categoría de protección se busca salvaguardar áreas de importancia en la Puna seca de los Andes centrales (Plataforma de Búsqueda en Áreas Protegidas, MMA (2020)).

Sistemas hidrológicos sin protección: (Sistema de La Punta-La Brava y Sistema Lagunar de Peine)

Si bien estos sistemas hidrológicos carecen de protección gubernamental, estudios como el de Rockwood Lithium-SGA, (2015) y Farías et al., (2017), muestran una gran biodiversidad presente en ellos tanto a nivel de macrobiota como de microbiota. Estos sistemas lagunares corresponden a cuerpos de menor extensión, comparados con aquellos del sistema de Soncor, y su origen se debe al afloramiento de aguas subterráneas ligados también a la interacción con la cuña salina ubicada al este (Cornellá et al., 2009).

Especies protegidas

Las especies bajo protección ambiental tanto de flora como de fauna en la Región de Antofagasta, provincia del Loa se describen a continuación.

Flora: *Distichlis spicata* (grama salada), *Pluchea absinthioides* (brea), *Atriplex atacamensis* (cachiyuyo), *Juncus balticus* (junco) y *Ephedra breana* (pingo–pingo). Fuente: (CONAF (2015)).

Fauna: *Phoenicoparrus andinus* (parina grande), *Phoenicoparrus jamesi* (flamenco de James o parina chica), *Phoenicopterus chilensis* (flamenco chileno), *Larus serranus* (gaviota andina), *Chloephaga melanoptera* (piuquén), *Rhea pennata* (suri), *Lycalopex culpaeus* (zorro culpeo). Fuente: (CONAF (2015)).

I.4.6.2.5 Instrumentos y herramientas para la gestión de territorios indígenas

En cuanto a las herramientas para la gestión de territorios indígenas, la Ley N° 19.253 (Ley Indígena) reconoce y define a las Áreas de Desarrollo Indígena (ADI) como "espacios territoriales en donde los organismos de la administración del Estado focalizarán su acción en beneficio del desarrollo armónico de los indígenas y sus comunidades" (Art. 26). Bajo esta definición, encontramos en la cuenca del Salar de Atacama solo una ADI formada,

[17] http://bdrnap.mma.gob.cl/buscador-rnap/#/busqueda?p=1255

denominada Atacama La Grande.

El 10 de marzo de 1997 se declara como ADI al Área de Atacama la Grande (*Figura I-26*), ubicada en la comuna Rural de San Pedro de Atacama (y dentro de un Área Silvestre Protegida), comprendida en la cuenca del Salar de Atacama y el Altiplano Andino de la II Región de Antofagasta. Esta se funda en un territorio de 23.400 km^2 (18.5% de la superficie regional) y con una población total atacameña de 2.500 personas (95% de la población total de esta ADI). Consta de 17 comunidades indígenas localizadas de forma dispersa dentro del territorio del ADI. En dicho territorio, el pueblo de San Pedro de Atacama presenta la mayor extensión y, a la vez, concentra la mayor cantidad de población que habita en la comuna (Toconao es el segundo pueblo en el orden de extensión y cantidad de población). Además, está constituido por diferentes Ayllus que se ubican a su alrededor.

Tabla I-27: Comunidades Indígenas en ADI Atacama La Grande.

Comunidad Indígena Atacameña
Machuca
Río Grande
Quitor
Coyo
San Pedro de Atacama
Solor
Camar
Socaire
Talabre
Peine
Toconao
Sequitor
Larache
Catarpe
Solcor
Cucuter
Yaye

Fuente: Proyecto Áreas de Desarrollo Indígena del Norte de Chile (CONADI, 2014).

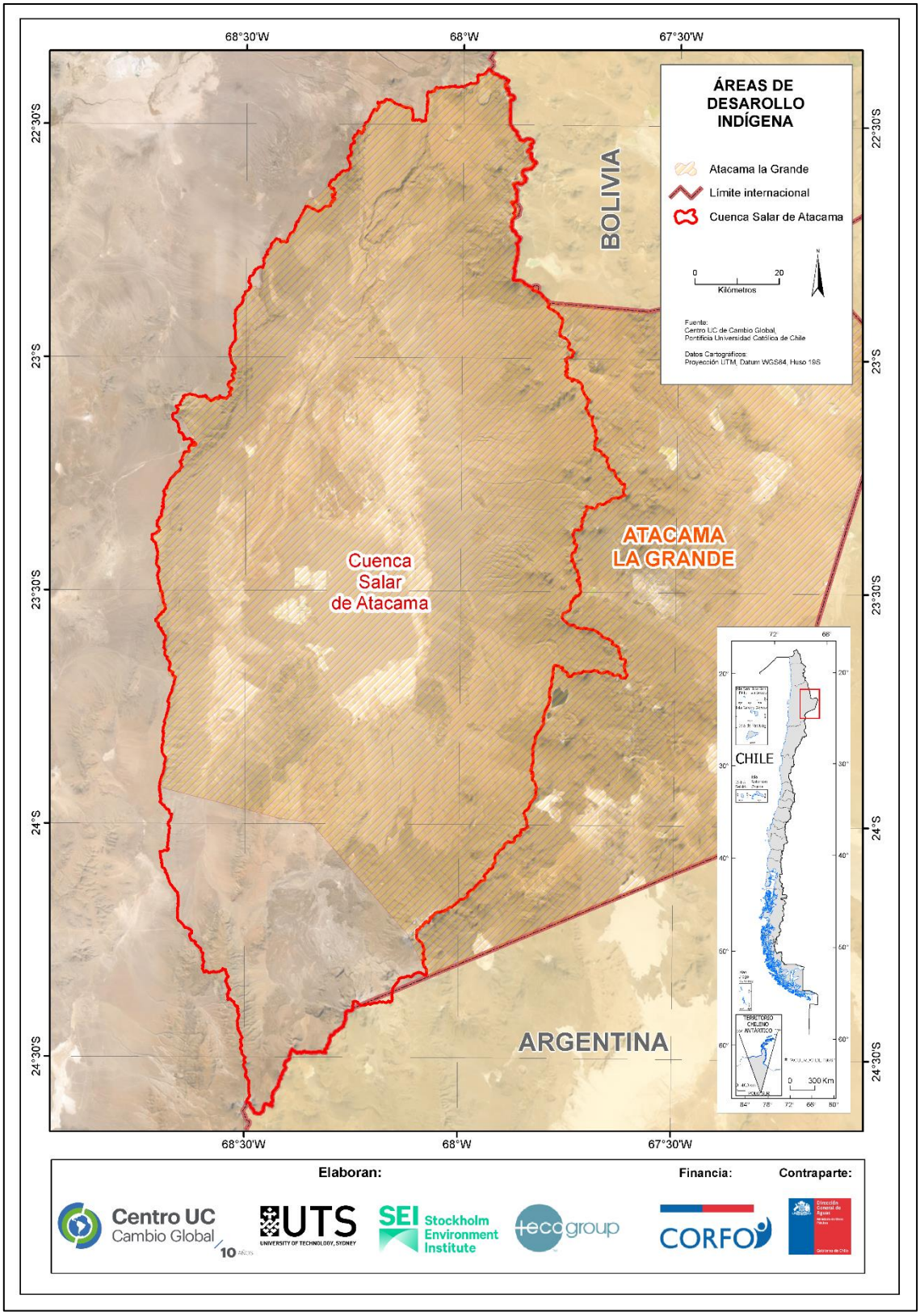


Figura I-43 Ubicación geoespacial del Área de Desarrollo Indígena Atacama La Grande.
Fuente: Elaboración propia a partir del INE, (2007).

De acuerdo con (CONADI, 2016), en esta ADI la población permanente es de 4.969 personas, de las cuales el 59% es indígena. En relación a la distribución espacial, para el año 2002, la población de la comuna es eminentemente rural y se encuentra distribuida en 8 localidades, dispuestas en torno al recurso hídrico en diversas cuencas de la hoya hidrográfica del Salar de Atacama. La localidad de San Pedro de Atacama concentraba el 63.7% de la población. El 36,3% de la población restante se distribuye en los pueblos de Toconao, Peine, Socaire, Rio Grande, Talabre, Camar y Machuca.

En cuanto a la economía, las tres principales actividades económicas que desarrolla la población indígena en esta ADI están vinculadas a la agricultura (y ganadería), el turismo y la minería. Por otro lado, dada la importancia de los recursos hídricos como base para dicha producción agrícola, su gestión recae en asociaciones de regantes que administra las afluentes que alimentan a cada una de las comunidades del sector a través de sistema de inundaciones distribuido por canales de regadío, y que han sido modernizados progresivamente a partir de los años 60.

I.4.6.2.6 Otros instrumentos para la gestión del uso del territorio y sus recursos

Finalmente se presentan en esta sección una serie de instrumentos de gestión de recursos que tienen un valor económico y que son complementarios a la gestión de los recursos hídricos.

Zona de Interés Turístico (ZOIT)

De acuerdo a la Ley del Turismo (Ley 20.423/2010), son Zonas de Interés Turístico "los territorios comunales, intercomunales o determinadas áreas dentro de éstos, que tengan condiciones especiales para la atracción turística y que requieran medidas de conservación y una planificación integrada para promover las inversiones del sector privado" (Art. 13). Adicionalmente, la Ley señala que "las Zonas de Interés Turístico tendrán carácter prioritario para la ejecución de programas y proyectos públicos de fomento al desarrollo de esta actividad, como asimismo para la asignación de recursos destinados a obras de infraestructura y equipamiento necesarios" (Art. 17) (SERNATUR, 2016).

En este contexto, se declara como ZOIT al área de *San Pedro de Atacama – Cuenca Geotérmica el Tatio*, protegida por Decreto Supremo mediante Resolución Exenta N° 775 el 1 de agosto de 2002 (SERNATUR, 2002). Esta ZOIT se justifica en los siguientes considerandos (Resolución Exenta N° 775):

- Que el área de San Pedro de Atacama es uno de los principales Productos Turísticos que posee la Oferta de Turismo en Chile, lo cual se ha reflejado en la imagen con que el país promueve la actividad turística.
- Que la comuna de San Pedro de Atacama sólo cuenta con un instrumento de planificación que regula el uso del territorio, únicamente en las áreas urbanas de esa comuna, además de Toconao y Peine.
- Que todos los estudios existentes sobre el territorio referido identifican tanto en sus áreas urbanas como rurales, zonas de valor arqueológico, arquitectónico,

ecológico y paisajístico, las cuales requieren ser preservadas y que constituyen un potencial de recurso significativo de relevante importancia para la actividad turística.

- Que el área señalada dispone de condiciones de accesibilidad actual y potencial.

Su delimitación, presentada en la Figura I-44, está conformada por un polígono que tiene como límite norte la cumbre del Cerro Hojalas o Piedras Grandes. Por el sur la cumbre del Cerro Pingo - Pingo, localizado a unos 15 Km del límite sur del Salar de Atacama. Por el este cubre al Salar de Atacama y los poblados de San Pedro de Atacama, Puritama, Toconao, Camar, Socaire y las lagunas Minñiques y Miscanti. Por el oeste su límite se extiende hasta el final de la comuna de San Pedro de Atacama.



Figura I-44: Zona de Interés Turístico declarada en la cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración propia a partir de información del MMA

Gestión del Litio

El marco jurídico que rige la exploración y explotación del litio en Chile depende de la fecha de inscripción de las pertenencias mineras; antes o después de 1979, año en el que el litio es declarado de interés nacional no concesible.

Bajo este régimen post año 1979, el litio puede ser explotado a través de los siguientes mecanismos:

- Por concesiones administrativas;
- Por contratos especiales de operación (CEOL), y
- Por el Estado o por sus empresas.

Para este último, la comercialización del litio y acopio debe ser autorizado por la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CChEN).

El Estado tiene pertenencias mineras anteriores a 1979 en los salares del desierto de Atacama. A través de CORFO tiene entregada en explotación de largo plazo 2 grandes áreas de pertenencias mineras en el Salar de Atacama. A través de Codelco que tiene pertenencias mineras en los salares de Pedernales y Maricunga y también a través de Enami en Salar de Aguilar[18]. Mayores detalles del proceso en el que se ha definido este marco legal en particular respecto de las concesiones en el Salar de Atacama se describe a continuación.

En el año 1977, Corfo constituyó 59.820 pertenencias mineras en el Salar de Atacama denominadas OMA. Dos años después (1979), el Decreto 2886 declara al litio como un "Recurso de Interés Nacional" y "No Concesible", quedando reservado para el Estado su extracción y comercialización. CORFO, al poseer concesiones históricas inscritas antes de la promulgación de este decreto (i.e., exentas de la no concesibilidad), queda autorizada para arrendar, explorar y explotar el litio en dichas pertenencias mineras. Posteriormente, en 1982 el litio es declarado como "Material Estratégico" para Chile.

En este contexto normativo, se han venido desarrollando 2 proyectos centrados en la producción y comercialización de compuestos de potasio, boro, litio y sodio, así como de sustancias minerales económicamente recuperables desde las salmueras ubicadas en las pertenencias mineras de propiedad de CORFO que se encuentren constituidos dentro de los límites de la comuna de San Pedro de Atacama.

Estas pertenencias mineras son explotadas en virtud de contratos firmados entre CORFO y los operadores en el salar: SQM Salar S.A. y Albemarle Limitada. Dichos acuerdos, ambos con naturalezas distintas, otorgan el derecho a explotarlas de forma exclusiva y excluyente, en base a determinadas cuotas y plazos, aprobados por la Comisión Nacional de Energía Nuclear, y regulados ambientalmente por el Sistema de Evaluación de impacto Ambiental a través de un estricto apego a las Resoluciones de Calificación Ambiental vigentes.

[18] http://www.minmineria.gob.cl/actual-marco-legal-del-litio/

CORFO, por tanto, mantiene un vínculo jurídico-contractual de largo plazo con las dos empresas que operan actualmente en el salar. A continuación, se presenta una línea de tiempo, para cada una de estas empresas, respecto de sus contratos[19] [20] [21]:

Albemarle Ltda.

- **1975**: Firma del Convenio Básico entre CORFO y la entonces Foote Mineral Company para explotar el litio en el Salar de Atacama (modificado en 1987, 1989 y 2016).
- **1980**: Nace Sociedad Chilena de Litio, y CORFO aporta en dominio las pertenencias mineras. El contrato establece una cuota de 200.000 toneladas métricas de litio metálico equivalente (LME) hasta 2023, renovables por periodos de 5 años (Acuerdo 801/1980).
- **1989**: CORFO sale de la Sociedad, vendiendo su participación.
- **2016**: CORFO, y el entonces Rockwood Litio Limitada (actual Albemarle Ltda), subscriben una modificación del Convenio Básico para autorizar una cuota adicional de producción y comercialización de productos de litio hasta el año 2043 por 262.132 toneladas de LME + 34.776 Tons LME para planta de Hidróxido de Litio (Acuerdo 2206/2016).

SQM Salar S.A.

- **1983**: CORFO llama a Licitación Pública del Proyecto de Sales Potásicas y Ácido Bórico en el Salar de Atacama.
- **1986**: Constitución de la Sociedad Minera Salar de Atacama Limitada (Minsal, Ltda., actual SQM Salar S.A.). Firma del Contrato de Proyecto y el Contrato de Arrendamiento. Este último entrega el derecho de explotación de una cantidad determinada de las OMA.
- **1992 y 1993**: Empresas Amax, Amsalar y Molymet venden, ceden y transfieren sus derechos a SQM Potasio S.A (SQMK), quedando CORFO y SQMK como únicos socios de Minsal Ltda. Se suscriben nuevos contratos de Arriendo y de Proyecto (dejando sin efecto el anterior), por 16.384 pertenencias mineras (cuota inicial de 180.100 mil toneladas de LME hasta el 2030).
- **1995**: CORFO vende su participación en Minsal.
- **2006**: Se aprueba la RCA N°226/2006 del proyecto "EIA Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama". SQM Salar aumenta los caudales de explotación según nueva regla operacional en base a reinyecciones.
- **2018**: Modificación contrato de Arriendo y de Proyecto, tras proceso de arbitraje y demandas interpuestas por CORFO. Se añaden 349.553 toneladas de LME adicionales hasta el 31 de diciembre de 2030, plazo que se encuentra establecido en los contratos originales y que no fue modificado.

[19] Presentación Comisión de Minería y Energía en la Cámara de Diputados, 13 de junio de 2018, por Sebastián Sichel.
[20] Modificación de Contratos del Estado de Chile con Albemarle y SQM durante el actual gobierno de la presidenta Michelle Bachelet.
[21] Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina (2019). Marco Normativo del Litio Chileno. Disponible en: https://www.ocmal.org/wp-content/uploads/2019/06/LITIO-BOLETÍN-VERSION-FINAL-1.pdf

El proceso de producción de compuestos de litio (y otros productos/subproductos obtenidos de la salmuera) por ambos operadores es similar, y consiste en el bombeo y procesamiento de las salmueras a través de distintas piscinas de evaporación solar, para posteriormente llevar el litio concentrado al 6% a las plantas químicas que se encuentran en Antofagasta y generar los procesos de transformación química, que permiten finalmente llegar a los productos de carbonato de litio, hidróxido de litio y cloruro de litio que se comercializan a nivel global.

Información de sus reglas de explotación en base a las RCA se entrega en Etapa II de este proyecto.

Gestión del riego (Ley de Fomento al Riego – Nº 18.450)

La Comisión Nacional de Riego tiene la misión de administrar la Ley N°18.450, a través de un sistema de concursos con el objetivo de bonificar las obras de riego, presentadas por agricultores/as con el fin de contribuir a su desarrollo y bienestar y a incrementar y mejorar la superficie regada del país usando eficientemente el recurso hídrico.

Por intermedio de la Comisión Nacional de Riego (CNR), esta Ley bonifica el costo de estudios, construcción y rehabilitación de obras de riego o drenaje y las inversiones en equipos y elementos de riego mecánico o de generación, siempre que se ejecuten para incrementar el área de riego, mejorar el abastecimiento de agua en superficies regadas en forma deficitaria, mejorar la calidad y la eficiencia de la aplicación del agua de riego o habilitar suelos agrícolas de mal drenaje y, en general, toda obra de puesta en riego u otros usos asociados directamente a las obras de riego bonificadas, habilitación y conexión, cuyos proyectos sean seleccionados y aprobados en la forma que se establece en esta ley. Pueden postular a este beneficio Organizaciones de usuarios del agua, constituidas y en proceso de constitución; Personas naturales, que exploten un predio agrícola y Personas jurídicas, cuyo objetivo sea la explotación agrícola.

En la región de Antofagasta, y durante el año 2019, el instrumento benefició a distintos tipos de usuarios agrícolas por un total cercano a los $ 1.350 Millones de pesos, lo que significa un aumento de casi $ 1.000 millones adicionales respecto a lo bonificado el año 2010, según la siguiente distribución:

Tabla I-28: Bonificación pagada por la Ley 18.450 de Fomento al Riego y Drenaje en la Región de Antofagasta para los años 2010 y 2019.

Bonificación pagada por año	2010		2019	
	Total (MM$)	Mujer Beneficiaria	Total (MM$)	Mujer Beneficiaria
Organización pequeños regantes	242,1	-	542,5	-
Pequeño Empresario Agrícola	57,9	77%	93,2	88%
Pequeño Productor Agrícola INDAP	43,9	44%	716.3,	21%
Total	**343,9**		**1.352**	

Fuente: Portal de datos, Comisión Nacional de Riego. https://datos.cnr.gob.cl/

I.4.6.3 Monitoreo de apoyo a la gestión

La gestión adecuada de los recursos hídricos y otros componentes de un sistema socioecológico requieren de un adecuado monitoreo del estado de las variables críticas que componen dicho sistema. Con monitoreos adecuados se puede comprender el funcionamiento del sistema y evaluar los efectos que tienen intervenciones de manera directa o indirecta a través de la ejecución de políticas públicas, planes, incentivos y regulaciones. Dado ese rol se ha considerado importante destacar los sistemas de monitoreo que actualmente están en operación en la cuenca del Salar de Atacama. En esta sección se describe de manera básica las características de estos sistemas de monitoreo siguiendo la estructura en la cual se presentó la descripción de la cuenca, es decir, considerando el medio físico, biótico y humano.

I.4.6.3.1 Monitoreo del medio físico

El monitoreo del medio físico en la cuenca del Salar de Atacama se realiza tanto por organismos del Estado como por empresas particulares. Los datos disponibles públicamente de los sistemas de seguimiento de organismos públicos y de particulares se describen en esta sección.

Monitoreo de variables hidrometeorológicas e hidrogeológicas

Respecto al monitoreo de variables hidrometeorológicas en la cuenca del Salar de Atacama realizado por la DGA, la DMC y el INIA, se cuenta con 12 estaciones con registros de fluviometría, 12 estaciones con registros meteorológicos (temperaturas extremas, precipitación, viento, evaporación y humedad relativa). Tres estaciones DGA han medido nivel de pozo (DGA) y 7 estaciones poseen mediciones de calidad del agua (parámetros diversos), dentro de los cuales destacan la conductividad eléctrica, concentración de cloruros e isótopos. Su importancia radica en que dichos compuestos permiten inferir el origen de las aguas subterráneas y su dirección. Dichas estaciones se muestran en la *Tabla I-29*. En esta sección se describe el monitoreo de variables hidrometeorológicas e

hidrogeológicas. En las siguientes secciones se describe el monitoreo de variables de calidad de aguas.

Tabla I-29: Estaciones hidrometeorológicas y de calidad de aguas de la DGA en la cuenca del Salar de Atacama.

Tipo	Nombre	Estado
Fluviométricas	Canal Vilama en Vilama	Vigente
	Canal Cuno en Socaire	Vigente
	Canal Tilomonte Antes Represa	Vigente
	Quebrada de Jerez	Vigente
	Quebrada de Talabre en Tumbre	Vigente
	Quebrada de Camar - Vertiente 1	Vigente
	Quebrada de Camar - Vertiente 2	Vigente
	Vertiente Peine en Peine	Vigente
	Río San Pedro en Cuchabrachi	Vigente
	Río Vilama en Vilama	Suspendidas
	Canal Aguas Blancas	Suspendidas
	Canal Tulan en Tilomonte	Suspendidas
Meteorológicas	Camar	Vigente
	Socaire	Vigente
	Peine	Vigente
	Talabre	Vigente
	San Pedro de Atacama	Vigente
	Río Grande	Vigente
	Toconao Retén	Suspendidas
	Toconao Experimental	Suspendidas
	Monturaqui	Suspendidas
	Guatin	Vigente
	San Pedro de Atacama (INIA)	Vigente
	Socaire (INIA)	Vigente
	Toconao (INIA)	Vigente
Niveles Pozo	Alana N"1	Vigente
	Mullay N"1	Vigente
	Socaire N"5	Suspendidas
Calidad de aguas	Río Puritama en Huatin (Ca)	Suspendidas
	Canal Aguas Blancas	Vigente
	Canal Vilama en Vilama	Vigente
	Canal Cuno en Socaire	Vigente
	Canal Tilomonte Antes Represa	Vigente
	Río Puripica en Huatin (Ca)	Vigente
	Río San Pedro en Cuchabrachi	Vigente

Fuente: Red hidrométrica la DGA BNASIGIRH, (2019)

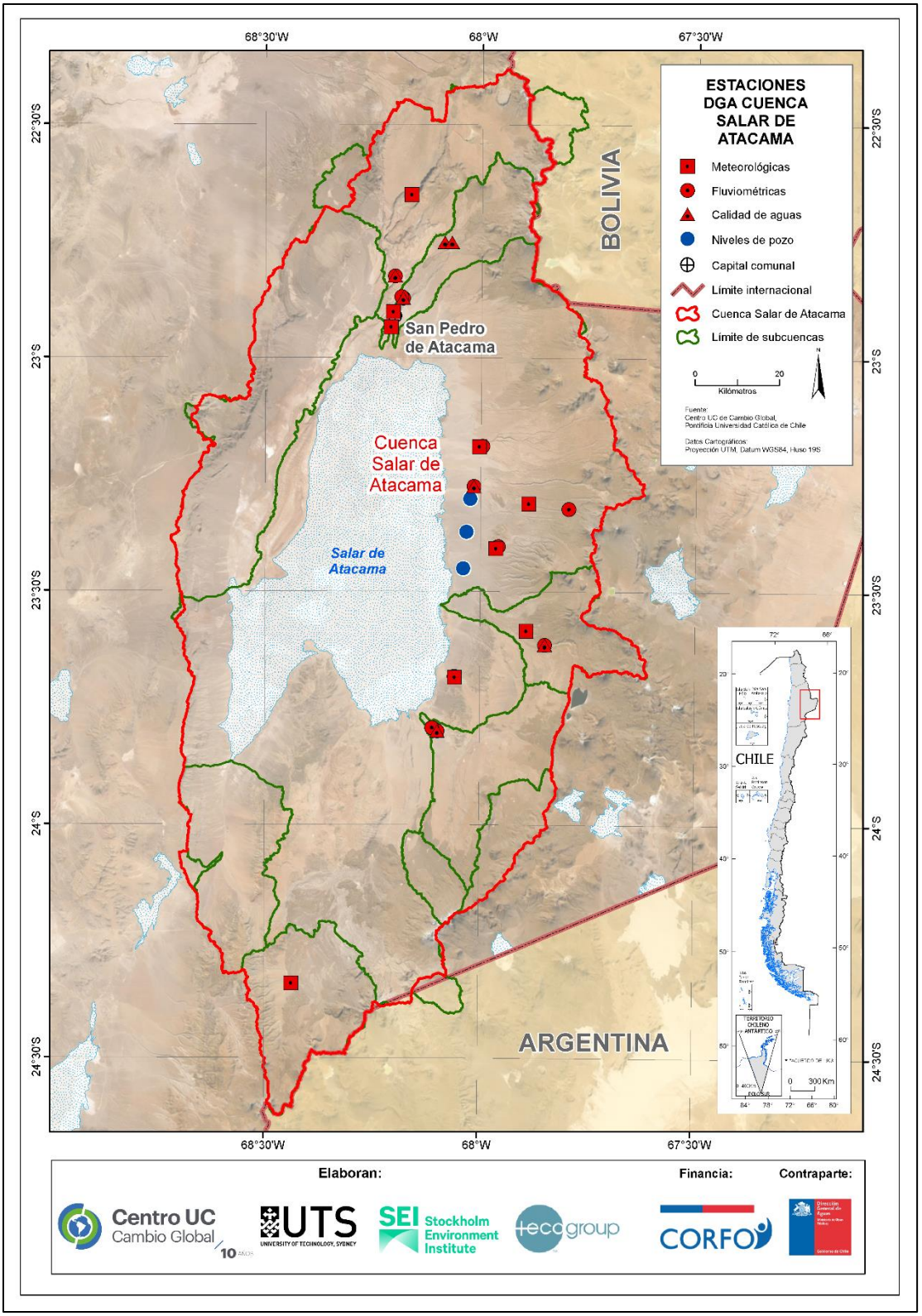


Figura I-45: Localización espacial de los distintos tipos de estaciones DGA distribuidas en la cuenca.

Fuente: Elaboración propia a partir de DGA BNASIGIRH, (2019).

A nivel de completitud de registros de las estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA, se seleccionaron aquellas estaciones que tuviesen más de un 30% de registros para el periodo 1988-2016 (este periodo se selecciona ya que corresponde al período común entre la mayoría de las estaciones). El criterio establece calidad del 100% si es que el número de días con registro es equivalente o mayor al valor obtenido cuando se pondera el periodo definido Ω (que puede ser 30 días en el caso de análisis mensual o 365 para análisis a escala anual) con un escalar β (que oscila entre 0 y 1), de lo contrario la calidad de la serie para el periodo definido es el número efectivo de días dividido por el producto descrito y expresado en porcentaje. De esta forma se tiene que:

$$Calidad = \begin{cases} 100\%\ si\ días \geq \Omega * \beta\ [Registro\ completo] \\ (\frac{días}{\Omega * \beta}) * 100\%\ si\ días < \Omega * \beta\ [Registro\ incompleto] \end{cases}$$ Ecuación 1

En este caso Ω = 365 y β = 0,8. Vale decir se considera año completo con 365 y calidad 100% si es que existen al menos 365*0,8 = 292 días con registros (continuos o discontinuos). La Figura I-46 muestra lo expuesto para las principales estaciones meteorológicas y fluviométricas de la cuenca.

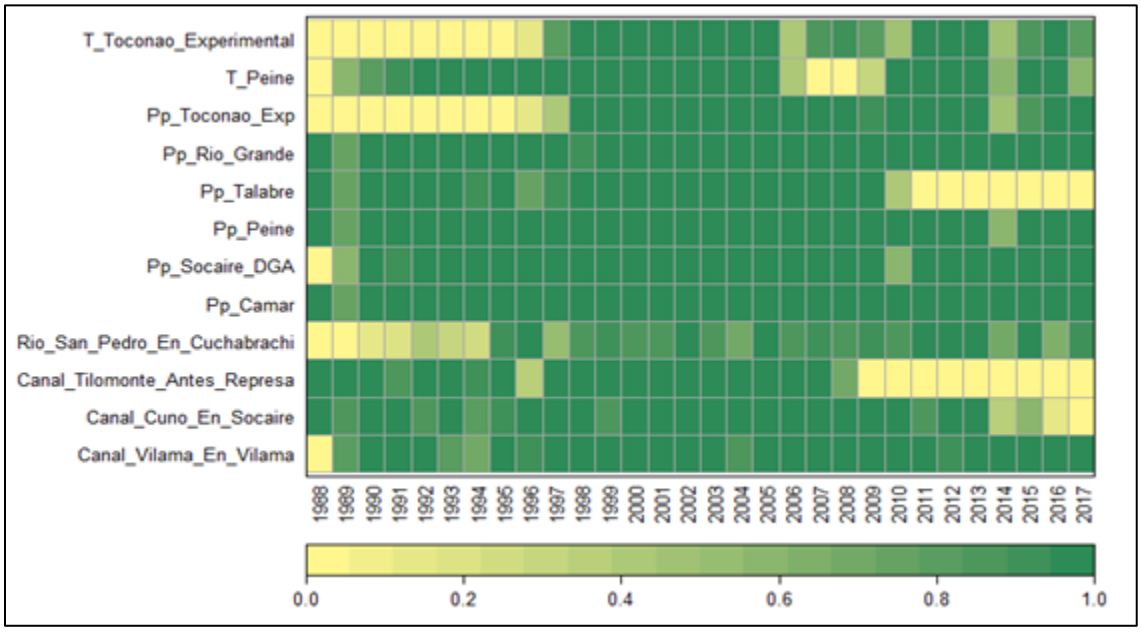


Figura I-46 Información de estaciones meteorológicas y fluviométricas ubicadas en la cuenca. Aquellas con el prefijo "T" corresponden a temperatura, aquellas con prefijo "Pp" a precipitación, y aquellas sin prefijo denotan a las que miden caudal. Fuente: DGA BNASIGIRH (2019).

Respecto a la distribución de las estaciones, estas se ubican principalmente al este de la cuenca y del salar, en zonas cercanas a los asentamientos humanos (poblados) y distribuidas en varias subcuencas de la zona, como se ilustra en la Figura I-3.

Cabe destacar que, además de los registros oficiales de las estaciones de la DGA, existen datos públicos dispuestos en los estudios de impacto ambiental de las empresas Albemarle,

Minera Escondida Ltda., SQM y CMZ por el Servicio de Evaluación Ambiental y en los expedientes de los seguimientos ambientales asociados a las RCA publicados por la Superintendencia del Medio Ambiente, entre otros estudios. Estos reportes y planes de seguimiento presentan registros que complementan la información recopilada y expuesta anteriormente y corresponden a mediciones de variables hidrometeorológicas, fluviométricas, monitoreo de calidad de aguas y niveles piezométricos. La descripción de los EIA y RCA correspondientes se presenta a continuación.

1. **Albemarle (ex Rockwood Litio, ex Sociedad Chilena del Litio).** Esta compañía es titular de una serie de proyectos y Resoluciones de Calificación Ambiental, dentro de las cuales destacan la RCA N°092/2000, del 31 de Mayo de 2000, que aprobó el proyecto "Construcción de Pozas de Evaporación Solar", la RCA N°3132/2006, del 28 de noviembre de 2006, que aprobó el proyecto "Modificación al Proyecto Construcción de Pozas de Evaporación Solar", la RCA N°403/2013 del proyecto "Secador Planta Potasa Rockwood Litio Limitada" y la RCA N°021/2016 del 20 de enero de 2016 que aprobó el EIA del proyecto "Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama". Este último proyecto se encuentra operativo y modifica la RCA 092/2000.

   La compañía ha presentado informes trimestrales entre el año 2000 y 2019 de 29 puntos de observación en el núcleo del salar y 2 puntos correspondientes a los pozos de bombeo de agua industrial producto de las RCA N°092/2000 y N°3132/2006. La firma extendió la red de monitoreo a partir de su EIA de 2015, contando con 109 puntos de medición, dentro de los cuales se encuentran 36 piezómetros, 25 piezómetros someros, 8 multipiezómetros, 4 secciones de aforo, 4 limnímetros, 12 puntos de agua superficial, 2 puntos de bombeo de agua industrial, 1 zanja y 1 estación meteorológica. El Anexo I de la Adenda 5 del mismo EIA (Rockwood Lithium-SGA (2015)) presenta alrededor de 100 de puntos de agua que Albemarle ha monitoreado, mientras que los registros de antecedentes incorporados en el mismo documento (Rockwood Lithium-SGA (2015)) constatan más de 50 puntos adicionales. Dicho estudio presenta además resultados de pruebas de bombeo realizadas entre 1976 y 2014. Adicionalmente se presenta la proyección en superficie de la interfase salina a partir del monitoreo de perfiles de conductividad eléctrica e información geofísica existente.

   La compañía reporta el monitoreo de variables meteorológicas, caudales de agua subterránea, aforos superficiales, calidad del agua y niveles piezométricos, dentro de los cuales se encuentran 5 pozos de monitoreo definidos como de alerta temprana, producto de la RCA N°21/2016. Este seguimiento se ha reportado a la SMA trimestralmente entre los años 2016 y 2019.

2. **SQM Salar S.A.** La firma posee proyectos aprobados y Resoluciones de Calificación Ambiental, dentro de los cuales se encuentran la RCA N° 226/2006 del EIA "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama" y la RCA N° 1/2011 del proyecto "Aumento de Capacidad de Procesamiento de Carnalita de Potasio". Producto del Plan de Seguimiento del EIA, se ha presentado el monitoreo semestral

entre 2006 y 2019 de 225 puntos de monitoreo hidrogeológico, dentro de los cuales se consideran 196 pozos de observación, 5 pozos de bombeo de agua dulce, 18 reglillas para la medición de niveles de agua superficial, 4 estaciones de aforo superficiales y 2 estaciones meteorológicas. La distribución de estos sistemas de monitoreo se presenta en la *Figura I-48*. El plan se seguimiento de este proyecto contempla además el monitoreo de la cuña salina mediante 9 pozos profundos de observación de nivel piezométrico y calidad de aguas, 3 en cada sistema de lagunas (Soncor, Aguas de Quelana y Peine). Estos puntos de monitoreo fueron presentados en los informes de SQM-CSIC (2017) y en SQM-CSIC (2019), contemplados en el plan de seguimiento de la RCA N° 226/2006.

El informe de SQM-CSIC (2017) presenta más de 440 puntos de monitoreo de nivel piezométrico, entre los cuales se encuentran los puntos de monitoreo efectuados dentro del Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) comprometido en el RCA 226/2006 mencionado anteriormente. Cabe mencionar que el informe SQM-CSIC (2018) presenta más de 24 puntos con mediciones de nivel piezométrico adicionales, los cuales cuentan con registros entre 1989 y 2019.

El EIA "Cambios y mejoras en la operación minera en Salar de Atacama". SQM Salar S.A. y sus adendas presentan registros de monitoreo de niveles piezométricos, caudales subterráneos y variables meteorológicas entre 1974 y 2005. En particular, la Adenda III del EIA establece los pozos de monitoreo del Plan de Seguimiento Ambiental (PSA) de los sistemas lagunares colindantes con el Salar de Atacama, de la cuña salina y del núcleo del salar, así como sus coordenadas y la frecuencia de monitoreo. Se presentan además resultados de pruebas de bombeo realizadas en 2001 y 2002 e información adicional de puntos de monitoreo de estaciones meteorológicas de propiedad de SQM, cuyos registros se encuentran entre 1990 y 2015 (*Figura I-51*).

Producto de la RCA N°1/2011 la empresa ha reportado trimestralmente entre el 2012 y 2019 la reinyección directa de salmuera al Salar de Atacama.

El informe de SQM-CSIC (2018), el cual fue dispuesto por la SMA en el expediente sancionatorio F-041-2016, presenta información de monitoreo de precipitación, evaporación, niveles piezométricos, niveles de lagunas, registros de hidroquímica, isotopía y aforos provenientes del monitoreo tanto de la DGA como de SQM. Los registros de variables climáticas comprenden valores diarios entre 1963 y 2017, mientras que los niveles se presentan entre 2000 y 2018. Los aforos comprenden valores diarios entre los años 2001 y 2018.

Producto del mismo expediente, la empresa SQM puso a disposición de la SMA la base de datos de monitoreos de niveles de aguas superficiales y subterráneas, a escala diaria, entre los años 1994 y 2016. De la misma forma, se presentan los registros de CONAF del monitoreo de niveles de lagunas con frecuencia mensual entre los años 1998 y 2016.

3. **Minera Escondida Ltda.** La minera posee una RCA N° 01/1997 del proyecto "Lixiviación Óxidos de Cobre y Aumento de la Capacidad de Tratamiento de Mineral Sulfurado", a partir del cual la compañía ha presentado a la SMA monitoreos de niveles piezométricos, variables meteorológicas y calidad del agua con frecuencia mensual entre 1997 y 2019. La compañía cuenta con un "Plan de Alerta Temprana para el Acuífero Monturaqui- Negrillar-Tilopozo" asociado a la Resolución DGA Ex. N°1972 del 23 de julio de 2001, mediante la cual se aprobó el "Plan de alerta temprana para el acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, II Región, Antofagasta" (PAT-MNT) y su modificación, la Resolución Exenta N° 0184/2003, a partir de la cual se elimina el registro fotográfico como parte del monitoreo de calidad visual en el corredor Escondida - Monturaqui y se aprueban los cambios en el diseño del monitoreo de los sistemas del Salar de Atacama. Se reduce el número de estaciones de medición de nivel por laguna a tres en cada una, con una frecuencia de monitoreo semestral. Se monitorea radiación solar, precipitaciones, velocidad del viento, humedad relativa y temperatura del sector de Tilopozo mediante la estación meteorológica del mismo nombre.

   El plan de alerta temprana (Minera Escondida Ltda.-Golder (2016)) contempla la evaluación de extracción de agua en el acuífero de Monturaqui, la cual considera las extracciones de 6 pozos de explotación de CMZ en el sector de Negrillar y 24 pozos de explotación de Minera Escondida Ltda. en la zona de Monturaqui. El monitoreo de niveles de aguas subterráneas contempla 142 puntos de observación (tanto vigentes como inactivos), los cuales son reportados a la SMA. Dentro de estos puntos de monitoreo, 3 pozos de observación de nivel se ubican en la zona de la interfaz salina contigua al sector de Monturaqui. El último reporte asociado a la RCA N° 01/1997, que contiene el informe del plan de alerta temprana, presenta valores de monitoreo de niveles piezométricos del acuífero Monturaqui entre 1993 y 2019.

   La información pública disponible del monitoreo de Minera Escondida Ltda. incluye el catastro levantado en el EIA "Proyecto Monturaqui", el cual presenta registros de variables climáticas que van de a 3 a 15 años con información. El Anexo IV.1 de este EIA (Minera Escondida Ltda.-Golder (2017)) presenta 126 puntos de monitoreo, cuyos registros más actuales son de finales del año 2015, con muestreos trimestrales en el sector Monturaqui y bianuales en el Sector Tilopozo. En total se consideran 1.864 muestras para la caracterización de las aguas subterráneas. La adenda del mismo EIA de Minera Escondida Ltda.-Golder (2017) presenta 50 puntos de monitoreo de nivel adicionales pertenecientes a CMZ y Minera Escondida Ltda. Se presentan además resultados de pruebas de bombeo realizadas entre 1990 y 1991 y mediciones de evaporación registradas entre 2008 y 2015. Cabe mencionar que este EIA reporta el seguimiento de la cuña salina mediante 9 pozos de monitoreo con registros desde los años 90, además de realizar la evaluación de 125 perfiles de distintas técnicas geofísicas en el área circundante al proyecto y medir perfiles de conductividad eléctrica con el mismo fin. Al igual que el EIA de Rockwood Lithium-SGA (2015) se presenta la ubicación en superficie de la interfaz salina.

   Actualmente la empresa se encuentra tramitando el respectivo EIA denominado

Proyecto Monturaqui, asociado a prolongar la extracción de agua dulce en el sector de Monturaqui y que incluye un plan de alerta temprana.

4. **CMZ (Compañía Minera Zaldívar).** La compañía minera posee diversos proyectos aprobados y Resoluciones de Calificación Ambiental en la cuenca, entre los cuales se encuentran la RCA 574/1993 del proyecto "Zaldívar", el cual junto a las resoluciones DGA 294/94 y 295/94 tiene como finalidad detectar variaciones en la disponibilidad de agua tanto subterránea como superficial, del acuífero Monturaqui (Sector Negrillar) y las vertientes y lagunas del sector sur de Salar de Atacama mediante el monitoreo de 10 niveles piezométricos y 7 niveles limnimétricos, respectivamente, los cuales se encuentran descritos en el EIA Proyecto Zaldivar (CMZ- Steffen, Robertson and Kirsten, Inc. (1993)). El proyecto se modificó mediante el EIA "Modificaciones Faena Minera Zaldívar" resuelto con la RCA 047/2010, mediante la cual se continúa el seguimiento de los niveles piezométricos y limnimétricos expuestos anteriormente de manera mensual incluyendo el año 2019.

   El EIA "Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar" de CMZ-GCF (2018), actualmente en proceso de aprobación, presenta más de 50 puntos de monitoreo de nivel piezométrico en el sector de Negrillar de la cuenca del Salar de Atacama.

5. **Sociedad Legal Minera NX UNO de Peine.** Esta empresa presentó el EIA del proyecto "Planta de Producción de Sales de Potasio, SLM NX Uno de Peine", el cual presenta registros de 17 pozos de monitoreo propios en las adendas de dicho estudio. El monitoreo es presentado en las adendas del proyecto y comprende el registro de niveles piezométricos del Salar de Atacama a escala mensual entre los años 1997 y 2011. Actualmente en proceso de evaluación.

Cabe mencionar que también se cuenta con información de puntos de monitoreo de otros informes, artículos e investigaciones, por ejemplo, el de DGA-ICASS (2014), en donde se realiza una recopilación y revisión de antecedentes, levantamiento de información hidrológica e hidrogeológica, así como la instalación de 10 estaciones de monitoreo en el año 2014. Cada estación de monitoreo incluye un lisímetro, un pluviómetro, un sensor de temperatura y un piezómetro. El informe incluye resultados de pruebas de bombeo realizadas en 1977 y 1999.

El EIA de Compañía Minera RioChilex-EDRA (1999) agrega a los antecedentes mencionados pruebas de bombeo de 8 pozos realizadas en el año 1997, un punto de monitoreo de nivel superficial de la laguna La Punta de propiedad de CMZ, y el monitoreo de puntos de calidad del agua realizado el año 1997. Se incluyen además los resultados de pruebas de bombeo realizados entre 1996 y 1998.

El reporte de Exploraciones San Pedro S.A. (EPSA)-Gestionare (2018) incorpora a los antecedentes mencionados 6 puntos de nivel piezométrico subterráneo, 3 puntos de control de nivel superficial y 2 lisímetros con mediciones correspondientes al año 2017.

La disposición geográfica de los registros de niveles piezométricos de los instrumentos de

monitoreo expuestos anteriormente se presenta desde la Figura I-47 a la Figura I-51. En general, estas mediciones corresponden a los puntos de monitoreo con información completa de registro de niveles, incluyendo registros desde el año 1986. Los datos provienen principalmente al monitoreo comprometido por la RCA 226/2006 y a los registros presentados en los EIA y sus respectivos seguimientos ambientales reportados en la SMA asociados a las RCA de SQM, Albemarle (ex Rockwood Lithium), Minera Escondida Ltda. y CMZ, entre otros particulares. Esta información consiste en:

1. Mediciones de nivel piezométrico de 830 pozos diferentes, registrados entre 1985 hasta el 2016 (Figura I-47).

2. Pruebas de bombeo de 250 pozos para determinar parámetros hidráulicos.

3. Registros de evaporación de suelo de 68 estaciones particulares entre 1988 y 2015 (Figura I-51).

4. 13 estaciones pluviométricas de SQM con registros entre 1971 y 2019 (Figura I-51).

5. Registros de profundidad de pozo en 1.227 puntos diferentes.

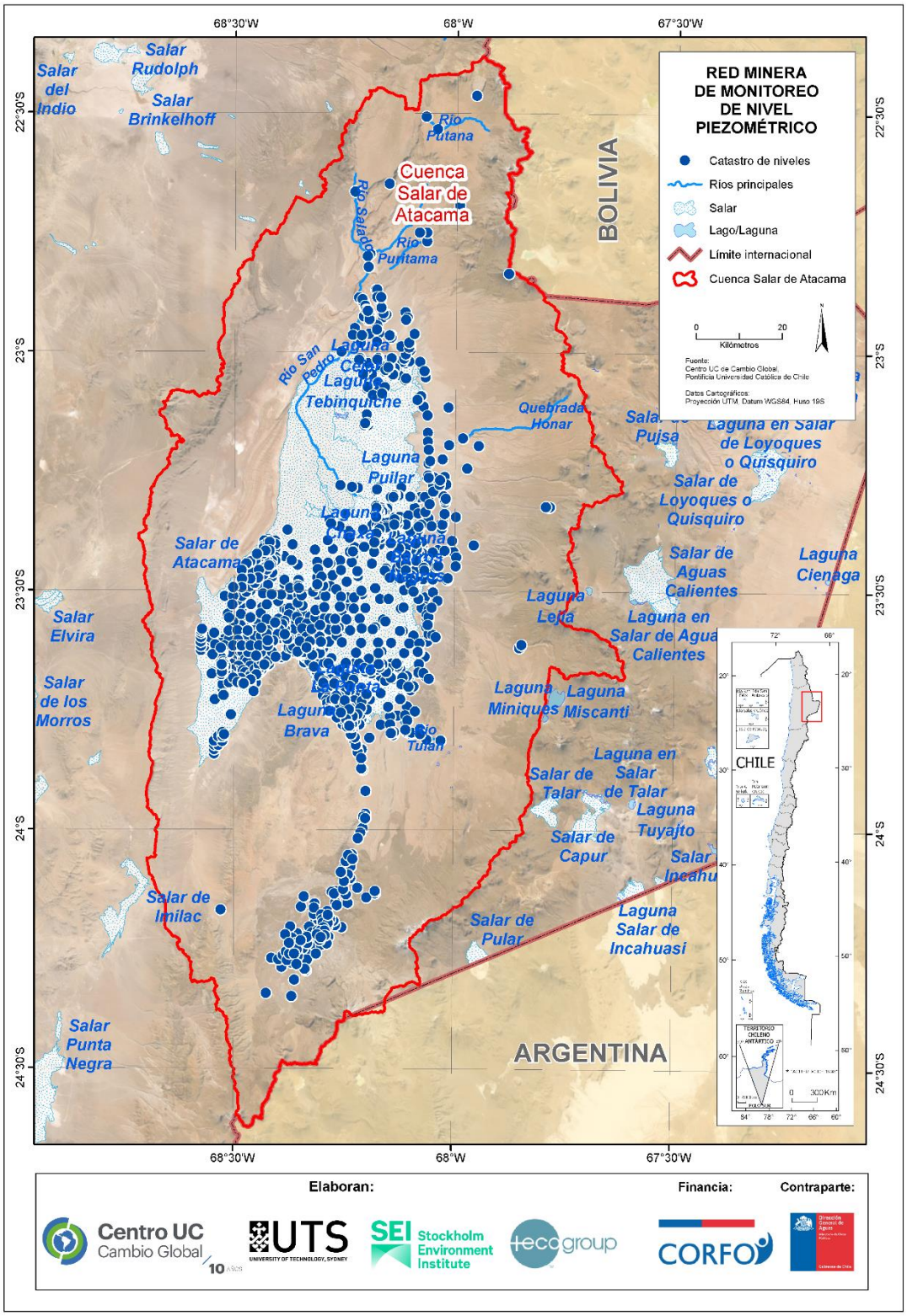


Figura I-47: Puntos de la red de monitoreo de nivel piezométrico de propiedad minera. Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21, (2018), SMA y el SEA.

La Figura I-48 muestra la distribución de puntos de monitoreo de niveles piezométricos de agua subterránea, en base a los cuales se realizarán los análisis de tendencia de niveles que serán presentados en el Informe de la Etapa II de Diagnostico de este proyecto. Estos pozos fueron presentados en SQM-CSIC (2017) y SQM-CSIC (2019). Las zonas que contienen estos puntos de monitoreo se enumeran a continuación.

1. **Zona marginal, sureste del salar**: los pozos que registran la evolución de niveles de esta zona consisten en: GD-03, L10-2, L10-6, L10-7 y L10-10 (Figura I-48).

2. **Núcleo del salar**: los pozos ubicados en esta región del Salar de Atacama corresponden al 2018, 1001 y SOPM-12C (Figura I-48). Los niveles de estos pozos muestran un descenso desde el año 1996 hasta la actualidad de alrededor de 90 cm.

3. **Zona marginal centro y norte:** los pozos de medición de esta zona se encuentran en las proximidades de la laguna Aguas de Quelana (*Figura I-17*), en las inmediaciones de la laguna Chaxa y en Barros Negros.

4. **Zona borde este (Pozo Mullay, Allana y Camar):** los pozos de medición están ubicados en las inmediaciones del Pozo Mullay-1 (Figura I-48) e incluye los pozos de monitoreo L1-1, L-15, L7-2 y L1-2.

5. **Núcleo del Salar de Atacama, área de extracción:** los pozos de monitoreo se encuentran en el sector occidental del núcleo del salar.

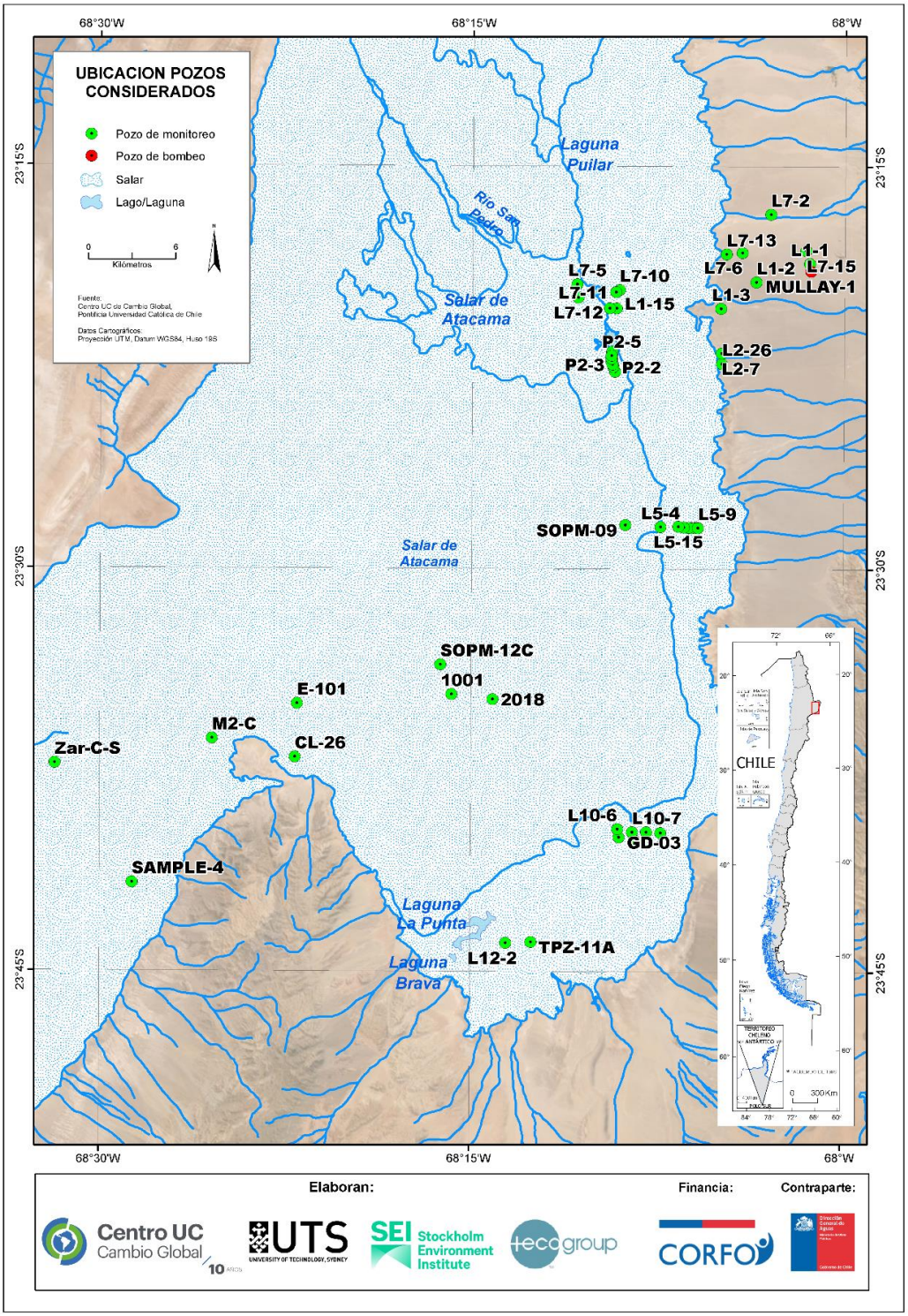


Figura I-48: Ubicación de los pozos considerados en la evolución temporal del nivel de agua.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21(2018).

Cabe mencionar que se cuentan con puntos de control subterráneo y superficial con menor cobertura temporal que los puntos mencionados anteriormente, las cuales corresponden a información de propiedad de Minera Escondida Ltda., SQM, Albemarle y Fock (Rockwood Lithium-SGA (2015)) dispuesta públicamente. Estos últimos se presentan desde la *Figura I-49* a la Figura I-50.

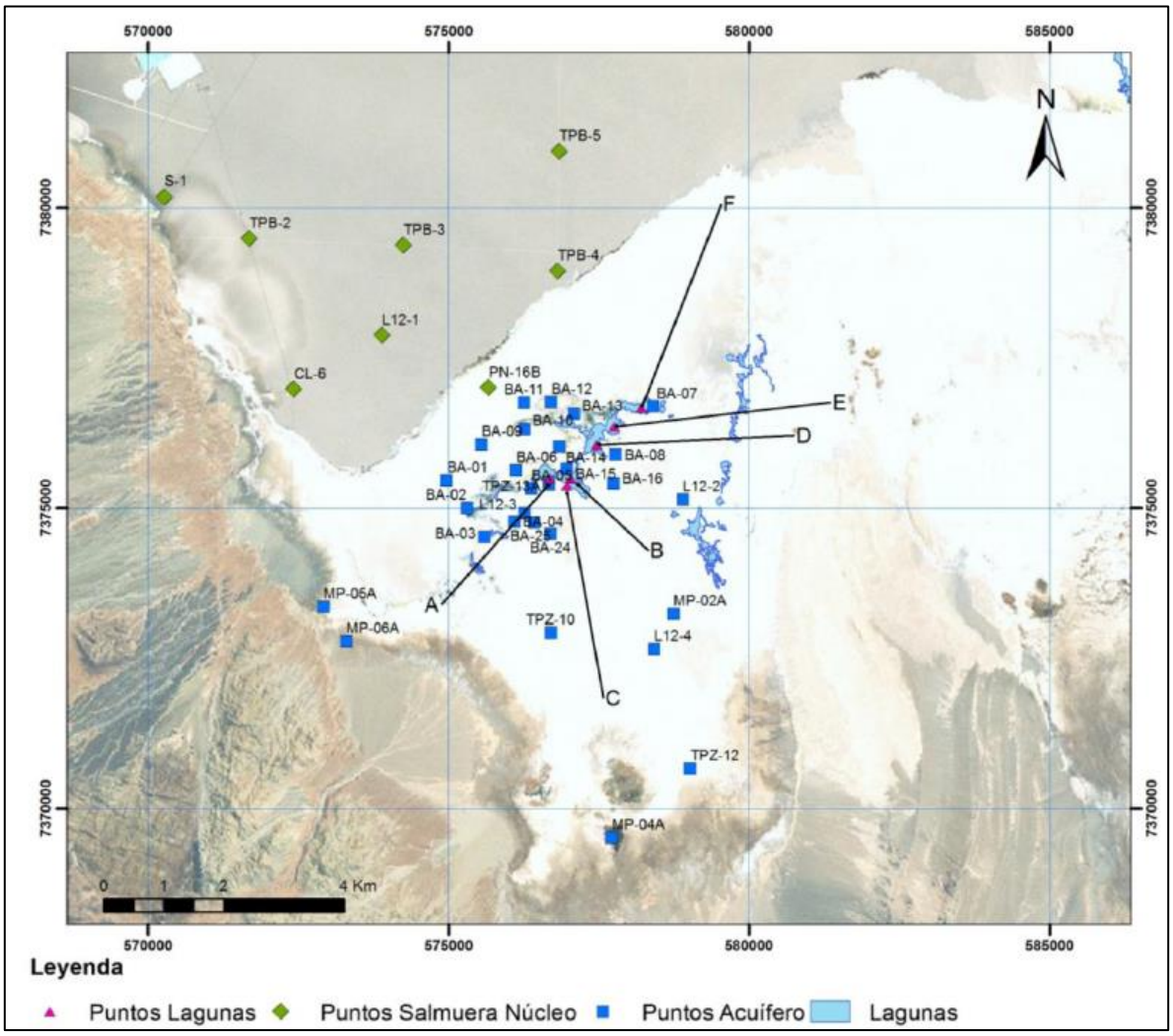


Figura I-49 Puntos de control de nivel piezométrico junto con medición de nivel de lagunas en el sistema de lagunas La Punta y La brava.
Fuente: Rockwood Lithium-SGA (2015)

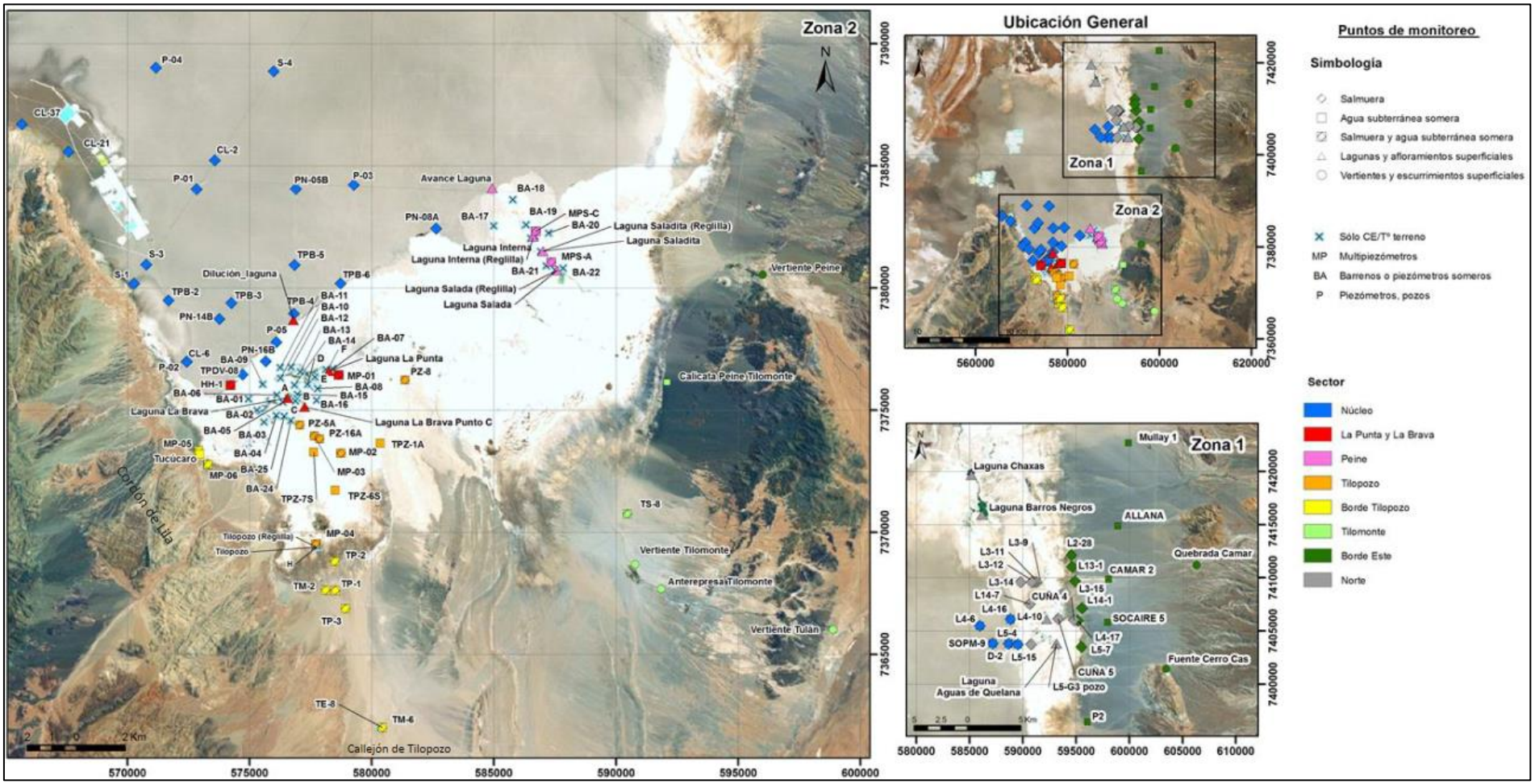


Figura I-50 Puntos de control de nivel piezométrico junto con medición de nivel de lagunas Chaxas y Barros Negros del sistema Soncor, Aguas de Quelana, La Punta y La Brava.
Fuente: Rockwood Lithium-SGA, (2015)

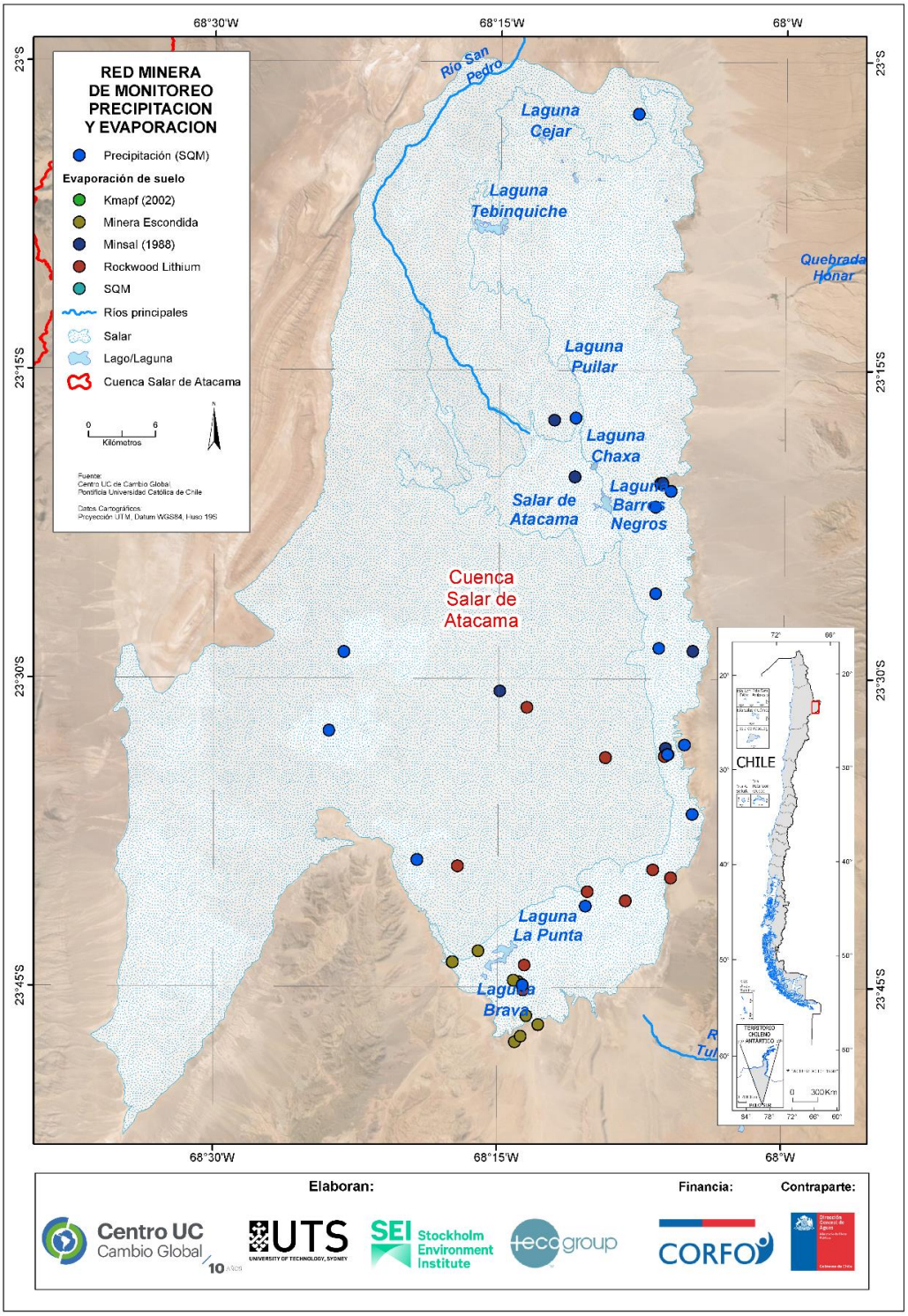


Figura I-51: Puntos de la red de monitoreo de evaporación y precipitación de propiedad minera

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21, (2018), SMA y SEA

Monitoreo de la calidad de aguas superficiales

La cuenca en estudio cuenta con un total de 1.255 puntos de monitoreo de calidad de aguas de tipo superficial, entre estaciones de medición de organismos públicos e información pública dispuesta por el SEA y SMA de estaciones de propiedad privada, cuyas fuentes se han descrito en este capítulo. Estas variables se han registrado entre 1947 y 2019. Estos controles se pueden clasificar según el tipo de fuente de acuerdo a los siguientes cuerpos de agua superficiales:

1. Superficial: La cuenca del Salar de Atacama cuenta con 1.255 puntos de monitoreo superficial, entre los cuales se pueden distinguir los siguientes cuerpos de agua superficial:

    a. Río/Estero: Existen 403 focos de monitoreo de calidad de agua en ríos/esteros.

    b. Laguna/Lago: Se identifican 218 puntos de monitoreo de calidad del agua en cuerpos lacustres y lagunas.

2. Manantial/Vertiente: Se identificaron 32 puntos de monitoreo de agua superficial en los siguientes cuerpos de agua:

    a. Manantial: Se tienen 27 puntos de control de calidad en agua en manantiales.

    b. Manantial termal: Se cuentan con 5 puntos de monitoreo de calidad de aguas en manantiales termales.

3. Humedal: Se cuenta con 1 punto de monitoreo de calidad de agua superficial en humedales.

En la *Figura I-52* se presenta la distribución espacial de la red de monitoreo de calidad de aguas en la cuenca del Salar de Atacama.

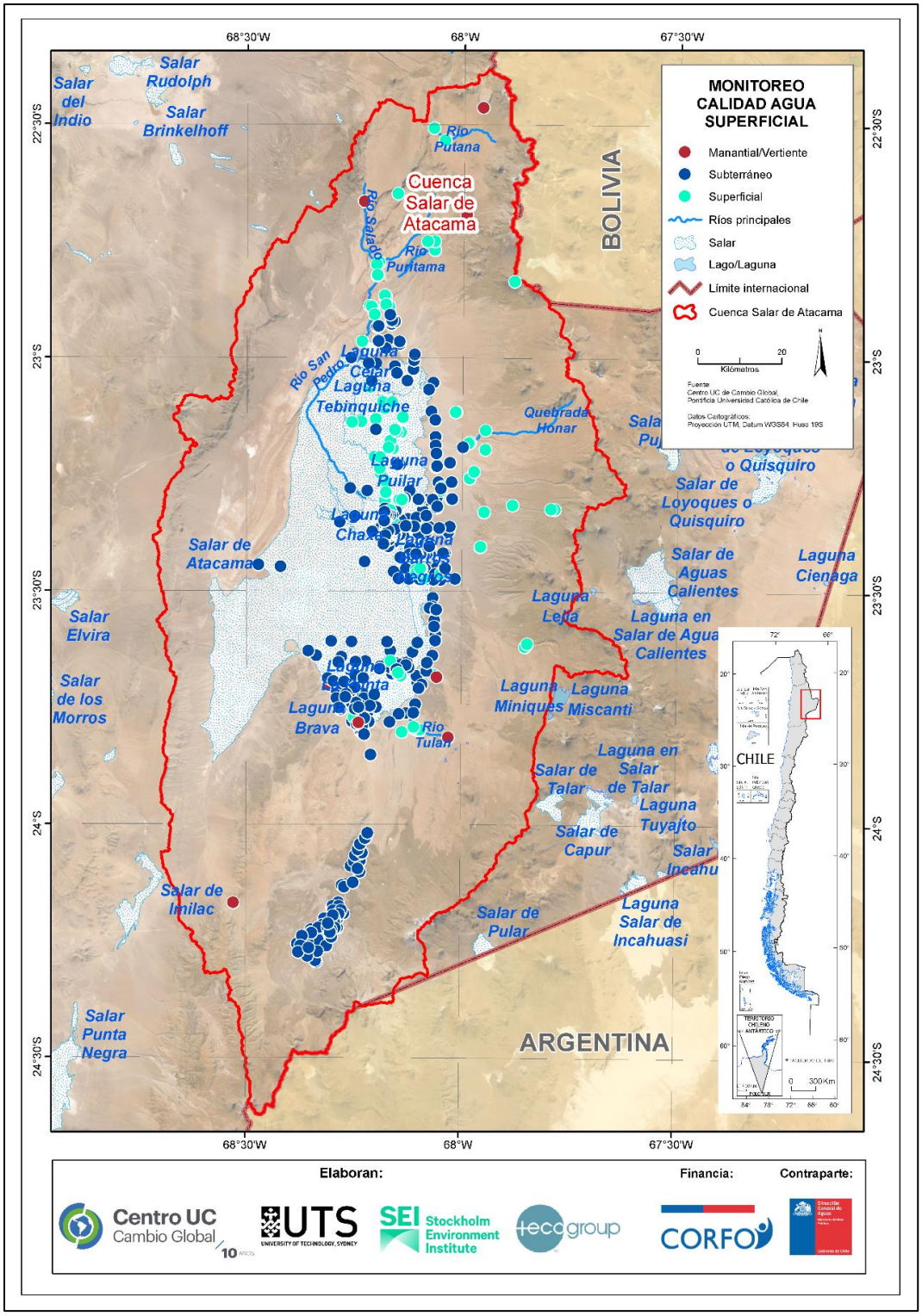


Figura I-52: Puntos de monitoreo de la calidad de agua superficial en la cuenca del Salar de Atacama.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), SMA y SEA.

Monitoreo de calidad de aguas subterráneas

La cuenca en estudio cuenta con un total de 3.390 puntos de monitoreo de calidad de aguas de tipo subterráneo, incluyendo registros de organismos públicos (*Tabla I-29*) e información pública de instrumentos de propiedad privada, los cuales fueron mencionados en este capítulo.

Respecto a la base de datos de monitoreo de hidroquímica e isótopos de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), la cual se obtuvo a partir de la mayoría de las fuentes información pública descritas en este capítulo, se cuenta con registros de 902 puntos y 5.043 analíticas, de los cuales validan 502 y 1.174, respectivamente. Esta información está disponible desde el año1947 hasta 2016. Cada uno de estos registros cuenta con las coordenadas proyectadas en UTM WGS 1984, la elevación respectiva del punto de la muestra proyectada en el modelo de elevación digital (DEM), y el tipo de fuente según el cuerpo de agua al que corresponde. En la mayoría de los casos estos datos están ingresados a escala diaria.

Hidroquímica

Dentro de la base de datos de Comité de Minería No Metálica-Amphos21(2018), la cual se obtuvo a partir de la mayoría de las fuentes información pública descritas en este capítulo, se distinguen las siguientes variables fisicoquímicas: Temperatura en terreno y laboratorio (°C), Potencial óxido-reducción (mV), pH en terreno y laboratorio, Conductividad eléctrica (µs/cm), Salinidad (mg/L), Sólidos Totales (mg/L), Total de sólidos disueltos (mg/L), Total de sólidos en suspensión (mg/L), Densidad en terreno y laboratorio (g/mL), Alcalinidad total (mg/L) y (meq/l), Alcalinidad bicarbonato (mg/L), Alcalinidad carbonato (mg/L), Dureza (Ca, Mg) (mg/L), Dureza (no carbonatos) (mg/L), entre 131 variables hidroquímicas.

En la *Figura I-53* se presenta un mapa de la calidad de la información filtrada de la base de datos, el cual se traduce a un indicador entre 0 y 1 según la metodología descrita anteriormente. El criterio establece calidad del 100% si es que el número de días con registro es equivalente o mayor al valor obtenido cuando se pondera el periodo definido Ω (que puede ser 30 días en el caso de análisis mensual o 365 para análisis a escala anual) con un escalar β (que oscila entre 0 y 1), de lo contrario la calidad de la serie para el periodo definido es el número efectivo de días dividido por el producto descrito y expresado en %. De esta forma se tiene que:

$$Calidad = \begin{cases} 100\% \; si \; días \geq \Omega * \beta \; [Registro \; completo] \\ (\frac{días}{\Omega * \beta}) * 100\% \; si \; días < \Omega * \beta \; [Registro \; incompleto] \end{cases}$$ Ecuación 2

En este caso Ω = 365 y β = 0,8. Vale decir se considera año completo con 365 y calidad 100% si es que existen al menos 365*0,8 = 292 días con registros (continuos o discontinuos).

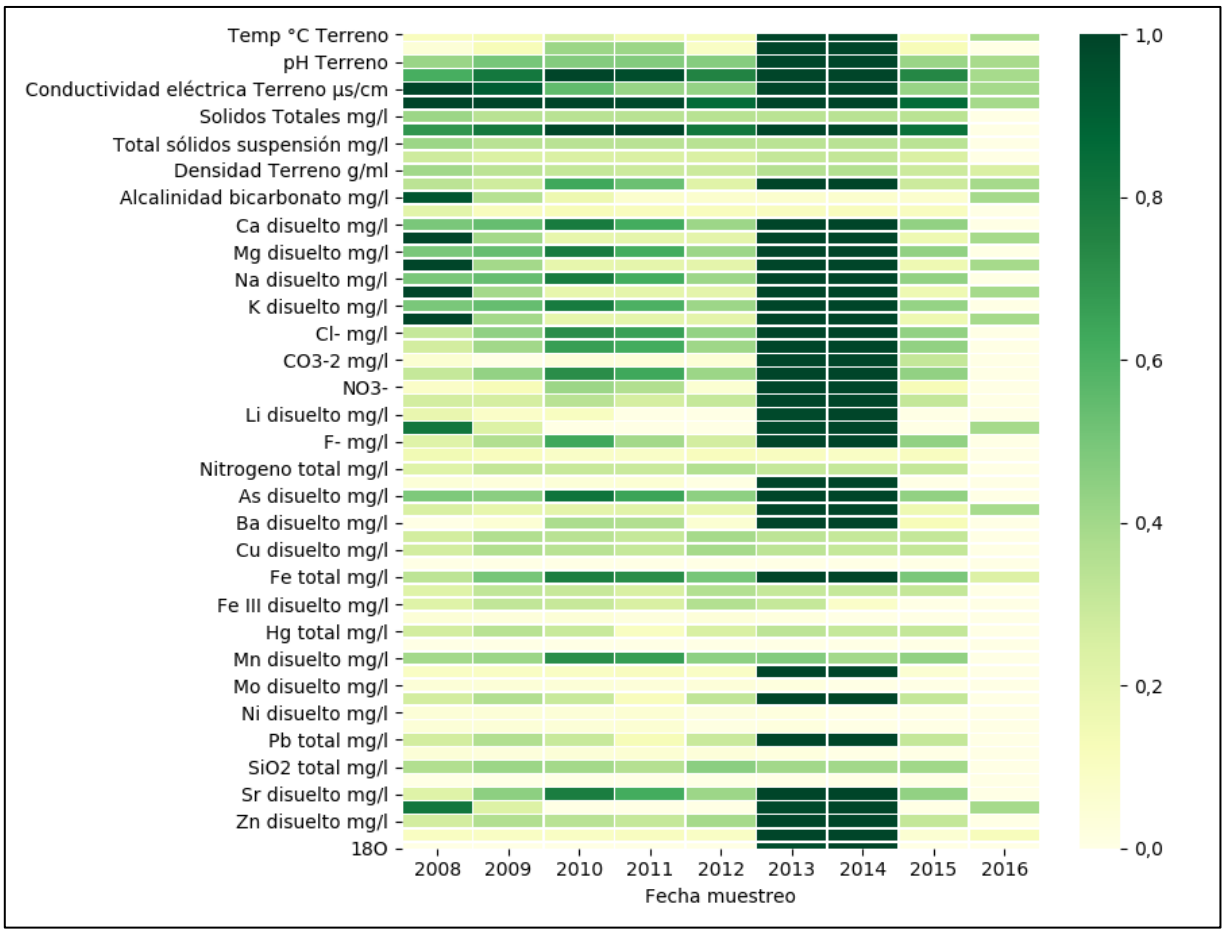


Figura I-53: Completitud en los datos de monitoreo de variables hidroquímicas referentes a calidad de agua.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21, (2018), SMA y SEA.

A partir de un análisis exploratorio de datos, se obtienen los estadígrafos de las mediciones de calidad del agua tanto de fuentes de agua superficial como subterránea. Las variables hidroquímicas más importantes de cada fuente se presentan en la *Tabla I-30* y la *Tabla I-31*.

Tabla I-30 Estadígrafos de variables de monitoreo hidroquímicas superficiales críticas

Estadígrafo	Temperatura en terreno	pH Terreno	Conductividad eléctrica en terreno	Salinidad	Sólidos Totales	Densidad Terreno	Li total mg/L
Medida	**(°C)**	**(-)**	**(µs/cm)**	**(mg/L de NaCl)**	**(mg/L)**	**(g/mL)**	**(mg/L)**
Promedio	21,0	7,4	83.825,3	3.369,5	119.680,1	1,0	271,0
Desviación estándar	5,1	0,6	101.041,2	1.475,7	123.996,4	0,3	620,2
min	5,0	5,3	0,0	2.326,0	99,4	0,0	0,0
Percentil 25%	17,5	7,1	0,0	2.847,8	7.374,5	1,0	2,6
Percentil 50%	20,7	7,4	8.650,0	3.369,5	110.021,0	1,1	80,8
Percentil 75%	24,2	7,8	205.800,0	3.891,3	185.000,0	1,2	253,3
Máx.	43,4	9,8	285.000,0	4.413,0	701.000,0	1,6	5.277,3

Fuente: Elaboración propia a partir de Comité de Minería No Metálica-Amphos21, (2018), SMA y SEA.

Tabla I-31 Estadígrafos de variables de monitoreo hidroquímicas subterráneas críticas

Estadígrafo	Temperatura en terreno	pH Terreno	Conductividad eléctrica en terreno	Salinidad	Sólidos Totales	Densidad Terreno	Li total
Medida	**(°C)**	**(-)**	**(µs/cm)**	**(mg/L NaCl)**	**(mg/L)**	**(g/mL)**	**(mg/L)**
Promedio	21,0	7,4	83.825,3	3.369,5	119.680,1	1,0	733,1
Desviación estándar	5,1	0,6	101.041,2	1.475,7	123.996,4	0,3	1.004,5
min	5,0	5,3	0,0	2.326,0	99,4	0,0	0,0
Percentil 25%	17,5	7,1	0,0	2.847,8	7.374,5	1,0	25,9
Percentil 50%	20,7	7,4	8.650,0	3.369,5	110.021	1,1	744,7
Percentil 75%	24,2	7,8	205.800,0	3.891,3	185.000	1,2	1.180,0
Máx.	43,4	9,8	285.000,0	4.413,0	701.000	1,6	18.172,0

Fuente: Elaboración propia a partir de Comité de Minería No Metálica-Amphos21, (2018), SMA y SEA.

Isótopos y cloruros

En el caso de la medición de isótopos y cloruros, se cuenta con un período de registro de información menor que el de variables hidroquímicas, abarcando un total de 14 años, siendo el período desde 2005 el intervalo con mayor registro de mediciones de isótopos, tanto superficial como subterráneo. Estos registros corresponden a las fuentes de información pública tanto de organizaciones del Estado como particulares, las cuales fueron descritas en este capítulo. Esta información isotópica consiste en:

1. Cloruro (Cl^-).
2. Oxígeno-18 (18O).
3. Deuterio (2H).
4. Tritio.
5. Isótopo de Carbono disuelto ($\delta^{13}C$–DIC).
6. Isótopo de Dióxido de Carbono ($\delta^{13}C$–CO2).
7. Isótopo de Sulfuro estable (^{34}S–SO4).
8. Isótopo de rubidio Estroncio ($^{87}Sr/^{86}Sr$).

En la *Figura I-54* se presenta un mapa de la calidad de la información filtrada de la base de datos, el cual se traduce a un indicador entre 0 y 1 de acuerdo a la metodología descrita en el apartado I.4.6.2. El criterio establece calidad del 100% si es que el número de días con registro es equivalente o mayor al valor obtenido cuando se pondera el periodo definido Ω (que puede ser 30 días en el caso de análisis mensual o 365 para análisis a escala anual) con un escalar β (que oscila entre 0 y 1), de lo contrario la calidad de la serie para el periodo definido es el número efectivo de días dividido por el producto descrito y expresado en %. De esta forma se tiene que:

$$Calidad = \begin{cases} 100\% \; si \; días \geq \Omega * \beta \; [Registro \; completo] \\ (\frac{días}{\Omega * \beta}) * 100\% \; si \; días < \Omega * \beta \; [Registro \; incompleto] \end{cases}$$

Ecuación 3

En este caso Ω = 365 y β = 0,8. Vale decir se considera año completo con 365 y calidad 100% si es que existen al menos 365*0,8 = 292 días con registros (continuos o discontinuos).

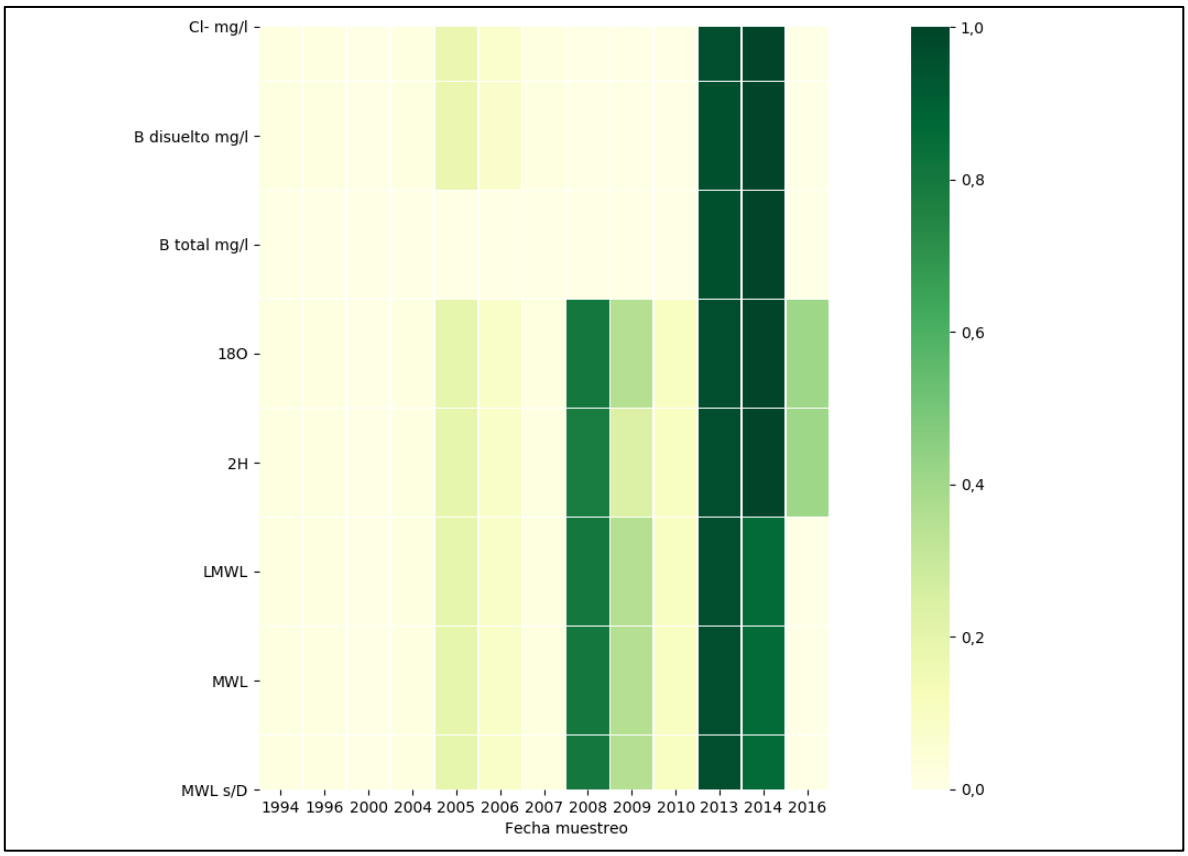


Figura I-54: Completitud de los datos de monitoreo de isótopos y cloruros.
Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21, (2018), SMA y SEA.

I.4.6.3.2 Monitoreo del medio biótico

Se describen a continuación los sistemas de monitoreo del medio biótico (monitoreo de ecosistemas y especies) existentes en la cuenca del Salar de Atacama. El monitoreo de ecosistemas y especies que se realiza en la cuenca del Salar de Atacama tanto por organismos del Estado y por empresas particulares se presenta en esta sección. La información utilizada para la elaboración de este apartado proviene de Comité de Minería No Metálica-GAC (2017) y Rodríguez, E. (2005).

Monitoreo en áreas bajo protección oficial

El monitoreo que se realiza en áreas bajo protección corresponde principalmente a las zonas de la reserva Nacional Los Flamencos y al Sistema Hidrológico de Soncor.

Reserva Nacional Los Flamencos: Desde el año 1995 se realizan censos de flamencos en los humedales y lagunas comprendidas en esta reserva en toda su extensión. Estos censos son parte de una iniciativa internacional de censos simultáneos que abarcan 52 humedales altoandinos de la macrozona norte del Chile como también varios sistemas ecológicos de Perú, Bolivia y Argentina. En la actualidad, los censos

en la cuenca del Salar de Atacama están enfocados en las tres especies flamencos que habitan principalmente en la zona altiplánica de Chile que son, el flamenco andino (*Phoenicoparus andinus*), flamenco chileno (*Phoenicopterus chilensis*) y flamenco de James (*Phoenicoparrus jamesi*). Se realizan con la participación de CONAF, el Grupo de Conservación de Flamencos Altoandinos y con la colaboración de empresas mineras del sector.

Al mismo tiempo CONAF y colaboradores llevan un seguimiento del proceso de reproducción de flamencos y tagua cornuda (*Fulica cornuta*) dentro de la reserva.

Sistema Hidrológico de Soncor: Este sitio está dentro de la planificación de la Reserva Nacional Los Flamencos, al encontrarse dentro de esta misma. En él se desarrolla un intenso monitoreo ambiental del proceso reproductivo de los flamencos y de variables ambientales asociadas.

Monitoreo por parte de empresas

Existe una serie de empresas realizando monitoreo sistemático de ecosistemas y especies en la cuenca del Salar de Atacama que se describen a continuación.

SQM Salar S.A.

Se encuentra realizando monitoreos de flora y fauna como parte del Plan de Seguimiento del EIA "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama" (RCA N°226/2006) que desde su aprobación ha unificado y reemplazado los planes de seguimientos existentes anteriormente.

Monitoreo de Vegetación y Flora: intenta detectar la ocurrencia de eventuales efectos de la extracción de salmuera sobre las formaciones vegetales emplazadas en el Borde Este del Salar de Atacama. Para la evaluación de la vegetación se evalúa la cobertura de las formaciones vegetales, a partir del análisis de imágenes satelitales de alta resolución y sobre la base de registros de terreno. Para la evaluación de flora, se mide la riqueza y abundancia de especies en una red de puntos de muestreo, los cuales están distribuidos en 7 transectos orientados en sentido Este-Oeste en el Borde Este del salar. Este monitoreo se llevará a cabo durante los años de operación de la extracción como también después de su término. Ver en la Tabla I-32 el plan de monitoreo de vegetación y flora propuesto.

Tabla I-32: Plan de monitoreo de vegetación de SQM Salar S.A

Etapa	Actividades del Plan de Seguimiento	Frecuencia	Momento de ejecución
Operación	Cobertura de formaciones vegetales Borde Este	Una campaña de medición al año, simultánea a la toma de imagen satelital, durante toda la etapa de operación.	Abril según los resultados obtenidos en las dos campañas de monitoreo previo a la operación del proyecto.
	Vitalidad de ejemplares de Prosopis flexuosa, sector de Camar 2	Una campaña de medición al año, durante toda la etapa de operación.	Al término de la época de mayor actividad vegetativa (abril).
	Riqueza y abundancia de especies Borde Este	Una campaña de medición al año, durante toda la etapa de operación.	Al término de la época de mayor actividad vegetativa (abril).
	Vegetación en la zona de interconexión vegetación – acuífero	2 mediciones al año con frecuencia trimestral.	Época de crecimiento de las plantas (noviembre – mayo)
Abandono	Cobertura de formaciones vegetales Borde Este	Una campaña de medición al año, simultánea a la toma de imagen satelital, durante cinco años con posterioridad al término del bombeo de agua dulce.	Abril según los resultados obtenidos en las dos campañas de monitoreo previo a la operación del proyecto
	Vitalidad de ejemplares de *Prosopis flexuosa*, sector de Camar 2	Una campaña de medición al año, durante cinco años con posterioridad al término del bombeo de agua dulce.	Al término de la época de mayor actividad vegetativa (abril).
	Riqueza y abundancia de especies Borde Este	Una campaña de medición al año, durante cinco años con posterioridad al término del bombeo de agua dulce.	Al término de la época de mayor actividad vegetativa (abril).

Fuente: Modificado de Comité de Minería No Metálica-GAC, (2017).

Monitoreo de Fauna Terrestre: Se monitorea anualmente durante el mes de abril. Consiste en evaluar la presencia y abundancia de la fauna en los diferentes hábitats presentes en el área de estudio. Esto incluye el sector denominado Borde Este del Salar de Atacama y los sistemas lacustres: Soncor, Aguas de Quelana y Peine en donde principalmente se evalúa la fauna acuática (aves). Para el muestreo se consideran los hábitats identificados a partir de campañas de terreno en las que se establece el listado de especies de fauna presentes y sus abundancias. Los grupos considerados son reptiles, aves y mamíferos.

Monitoreo de variables para Biota Acuática**:** Incluye actividades complementarias al monitoreo que ya se lleva a cabo en el salar por CONAF y con apoyo de SQM a partir de 1995[22]. Las mediciones que se realizan incluyen: superficie lacustre, profundidad de columna de agua, abundancia y ciclos reproductivos de aves lacustres, abundancia y ciclos reproductivos de la población chilena de flamencos altoandinos, abundancia de oferta alimentaria para flamencos, propiedades fisicoquímicas determinantes de la oferta alimentaria y actividades antrópicas. Las variables bióticas que se miden son: el porcentaje

[22] Este convenio terminó en diciembre de 2018. CONAF lo declaró en Carta Oficial N°3/2019. https://snifa.sma.gob.cl/General/DescargarInformeSeguimiento/237125

de cobertura absoluta de la vegetación acuática, composición y abundancia de fauna planctónica y bentónica, riqueza y abundancia de microalgas y diatomeas.

Albemarle (ex Rockwood)

El comienzo de la extracción de salmuera en la planta Salar de Atacama -operada en la actualidad por Albemarle- se remonta a 1984, pero a través del proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama que fue aprobado mediante en enero de 2016 (RCA 021/2016), es que se determina el esquema general de los compromisos técnico-ambientales de monitoreo de biota descritos a continuación:

Monitoreo de Vegetación y Flora: Se monitoreas puntos en los sectores de Peine, La Punta, La Brava, Soncor, Quelana y Tilopozo. Se mide distribución y cobertura de vegetación azonal. Además del estudio en transectos se hacen análisis de imágenes satelitales para medir distribución y cobertura. Se caracteriza la diversidad de flora en los transectos.

Se realizan campañas de invierno y verano en los meses de agosto y abril. Paralelamente se hacen análisis de pH, textura, permeabilidad, materia orgánica, humedad, CE, nutrientes en los suelos que ocupa la vegetación.

Monitoreo de Biota Acuática**:** Se miden distintos parámetros para la biota acuática en estaciones de los sectores de La Punta, La Brava y Tilopozo. Las mediciones realizadas varían despendiendo del tipo de biota a evaluar. Para macrófitas (plantas acuáticas) se mide abundancia relativa o cobertura de las distintas especies o comunidades; para el fitobentos, fitoplancton, zoobentos y zooplancton se realizan estimaciones de riqueza y abundancia. Las mediciones son hechas en invierno y verano, en los meses de agosto y abril.

Monitoreo de Fauna Terrestre: Realiza seguimiento de vertebrados terrestres, incluyendo flamencos, aves terrestres y acuáticas, mamíferos, reptiles y anfibios. Se evalúa la composición, riqueza y abundancia, para cada grupo de vertebrados.

Aves acuáticas a través de puntos censales, aves terrestres, reptiles y anfibios mediante transectos, mamíferos mediante transectos, trampas cámara y trampas Sherman. Esto se hace semestralmente.

Minera Escondida

Asociada al proyecto de lixiviación de óxidos de cobre y aumento de la capacidad de tratamiento de mineral sulfurado se encuentra la RCA 1/1997 bajo la cual se han realizado monitoreos continuos por 23 años. Se realizan monitories de flora y fauna en los sectores de vegas de Tilopozo, lagunas La Punta y La Brava y el sector de Monturaqui. Además están las RCA 48/1998 (proyecto: Modificaciones a las instalaciones de manejo y procesamiento de mineral sulfurado gases y MP), RCA 398/2009 (Proyecto: Ampliación de capacidad de extracción y procesamiento de mineral sulfurado de minera escondida) y RCA 277/2001

(Escondida norte y plantas de tratamiento de aguas) bajo las cuales se realizan monitoreos de fauna terrestre.
De acuerdo con informes de realizados en cumplimiento de la RCA 1/1997 (i.e. Escondida-BHP 2020), los monitoreos que se realizan con mayor frecuencia son:

Monitoreo de Vegetación y Flora: se mide cobertura y riqueza de vegetación en transectos. El muestreo se realiza dos veces al año durante el invierno y el verano.

Monitoreo de Biota Acuática: se toman muestras en las distintas estaciones de muestreo para caracterizar la comunidad de diatomeas bentónicas, zoobentos y zooplancton, con énfasis en la determinación de posibles patrones espaciales y temporales en los cuerpos de agua. Desde el año 2011, la frecuencia de muestreo es estacional.

Monitoreo de Fauna Terrestre: se realizan transectos en donde se registra la presencia y abundancia de distintas especies de vertebrados Se emplean identificaciones visuales y fotografías. Para el caso de aves también identificación sonora. También se emplean evidencias indirectas para algunos mamíferos.

Minera Zaldivar

Asociados a los proyectos Proyecto Zaldivar y Modificaciones faena Minera Zaldivar están asociadas las RCA 574/1993 y 47/2010 respectivamente. De acuerdo con estas se debe mantener monitoreo de la biota en los sectores de Negrillar y Tilopozo. Referenciando a los informes de monitoreo más recientes (i.e. Zaldivar-Knight Piédsold 2020).

Monitoreo de Vegetación y Flora: se monitorean 7 puntos de muestreo en Negrillar y 4 en Tilopozo, estableciendo parcelas de 100 m^2. En cada punto se evalúa riqueza, abundancia y cobertura de vegetación. Además se evalúa la vigorosidad y fenología de cada individuo dentro de las parcelas.

Monitoreo de Fauna Terrestre**:** anfibios, reptiles, aves y mamíferos se evalúan en transectos en los que se busca la presencia de animales mediante evidencia visual. También hay búsqueda dirigida en refugios potenciales. Para mamíferos se complementa con cámaras trampa y trampas Sherman.

I.4.6.3.3 Monitoreo del medio humano

Se describen a continuación los sistemas de monitoreo del medio humano (considerando elementos asociados a la demografía y la actividad económica) existentes en la cuenca del Salar de Atacama.

Monitoreo demográfico

Dos herramientas se utilizan para caracterizar el medio humano en la cuenca: El Censo de Población y Vivienda realizado por el INE, y la encuesta CASEN realizada por MIDEPLAN.

El censo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas corresponde al conteo y caracterización de todas las viviendas y habitantes del territorio nacional en un momento determinado: magnitud, distribución y composición de la población (sexo, edad, fertilidad, educación, migración, etc.). Esta operación permite obtener la información necesaria para el desarrollo de las Estimaciones y Proyecciones de Población (desagregados por región y comuna), a partir de los supuestos de crecimiento de la fecundidad, mortalidad y saldo migratorio. En concreto, esta información es clave para el adecuado diseño de políticas públicas y la construcción de indicadores fundamentales para el país. Estos se realizan aproximadamente cada 10 años, siendo los últimos registrados los años: 1992, 2002, 2017.

La encuesta de Caracterización Socioeconómica Nacional (CASEN) realizada por MIDEPLAN, es una encuesta de hogares representativa a nivel nacional, regional, urbano y rural y comuna, que busca elaborar diagnósticos de la realidad socioeconómica del país y evaluar los programas sociales, así como sus resultados. Asimismo, esta encuesta es la principal herramienta para la evaluación del impacto de la política social en los ingresos de los hogares considerando programas sociales que representan un alto componente del gasto social. Esta encuesta permite conocer periódicamente la situación de los hogares y de la población, especialmente de aquella en situación de pobreza, con relación a aspectos demográficos, de educación, salud, vivienda, ocupación e ingresos. Esta encuesta se realiza con una periodicidad bienal, siendo las últimas registradas los años: 2011, 2013, 2015 y 2017.

Monitoreo de actividades económicas

Turismo:

La información sobre el desempeño del turismo a nivel nacional es recopilada y presentada por el Instituto Nacional de Estadísticas a través de la Encuesta Mensual de Alojamiento Turístico (EMAT). Dicho instrumento apoya a entidades gubernamentales como el Servicio Nacional del Turismo en la generación de políticas públicas, al monitorear las constantes oscilaciones estadísticas del turismo en Chile, tanto de los mercados emisivos como receptivos, y transparentar esta información en una serie de indicadores como: pernoctaciones, llegadas y estancia media de turistas; tasa de ocupación en habitaciones y plazas; ingreso por habitación disponible (RevPAR); tarifa promedio diaria (ADR), y capacidades disponibles en unidades de alojamiento y plazas.

Actividad Agrícola:

El monitoreo de las actividades productivas es insumo importante para los distintos instrumentos de la política pública. Así para el caso de la actividad, se cuenta con dos instrumentos principales, como son el Centro Agropecuario y los Catastros agrícolas de la Oficina de Planificación y Políticas Agrarias (ODEPA) dependiente del Ministerio de Agricultura.

El Censo Agropecuario y Forestal es una iniciativa desarrollada por el Instituto Nacional de

Estadísticas, INE, encargado de las estadísticas oficiales del país y cuya labor está sujeta al secreto estadístico por ley. Este se realiza por encargo de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) del Ministerio de Agricultura, quien es la mandante y transfiere los recursos. Este proceso se realiza normalmente cada 10 años, pues se considera un período prudencial para apreciar los cambios que experimenta la agricultura en el país. Los censos constituyen la fuente primaria más importante y amplia de información estadística, sus resultados suministran los antecedentes básicos para el diseño e implementación de políticas y programas públicos y para la decisión de inversiones y estudios privados.

Hasta la actualidad se han realizado siete Censos Nacionales Agropecuarios en nuestro país, los cuales fueron realizados en los años 1930, 1936, 1955, 1965, 1976, 1997 y 2007. Su periodicidad ha respondido principalmente a que, desde el punto de vista estadístico, es recomendable realizar este tipo de censos a lo menos cada 10 años, normalmente a continuación de los Censos de Población y Vivienda, para poder así mantener un buen sistema y continuidad de las estadísticas agropecuarias y forestales. Debido a realización del Censo Nacional durante el año 2017, y por tanto la incapacidad del INE de realizar ambos procesos en conjunto, el Censo Agropecuario fue reagendado para el segundo semestre del año 2020.

Su principal objetivo es obtener información sobre la estructura productiva y distribución de la actividad agropecuaria que se desarrolla en el territorio nacional, como base para la elaboración de estadísticas intercensales. Por ello, se centra principalmente en recolectar datos sobre la estructura organizacional de las unidades productivas agropecuarias, tales como la identificación y localización geográfica de los productores, las formas jurídicas y modalidades de organización de la producción, el tamaño, tenencia y uso de la tierra, las áreas cultivadas y los cultivos sembrados, los volúmenes de producción, las existencias ganaderas, el uso de riego y de insumos agropecuarios, el capital fijo, la maquinaria, las tecnologías de producción, las formas de comercialización de la producción y el uso de mano de obra.

ODEPA, además de coordinar junto al INE el Censo Agropecuario y Forestal, levanta, sistematiza y publica con una frecuencia cercana a la anual, una serie de estadistas productivas adicionales para el sector agrícola, tales como la superficie, composición de cultivos, catastros frutícolas, vitícola y hortícola, indicadores comerciales entre otros. Lamentablemente para la región de Antofagasta no se realiza este proceso, concentrándose la estadística agrícola oficial de la región en los Censos Agropecuarios antes mencionados.

Minería no metálica:

Respecto al monitoreo y seguimiento de la producción minera no metálica, el SERNAGEOMIN genera estadísticas de producción minera en base a los reportes que Albemarle y SQM Salar envía a dicho organismo regulador, los cuales se consolidan anualmente en el "Anuario de la Minería de Chile", este documento caracteriza la producción a nivel regional de compuestos de litio, desagregando entre: carbonato de litio, hidróxido de litio y cloruro de litio.

I.5 Descripción de trabajos previos en modelación

I.5.1 Introducción

En esta sección se describen tanto los antecedentes sobre modelación conceptual y numérica de hidrología, hidrogeología y ecosistemas en la cuenca del Salar de Atacama, destacándose las brechas existentes en cuanto a modelación.

I.5.2 Modelación hidrológica

En esta sección se describen los antecedentes sobre modelación conceptual y numérica de la hidrología de la cuenca del Salar de Atacama. Se encontraron 106 estudios relacionados a hidrología superficial en la cuenca del Salar de Atacama, de los cuales se seleccionaron los más importantes para ser descritos en este capítulo.

La mayoría de los modelos hidrológicos superficiales existentes para la cuenca del Salar de Atacama consisten en modelos de precipitación escorrentía, los cuales consisten en un balance hídrico de los procesos de precipitación, escorrentía, infiltración, evapotranspiración, fusión y sublimación. La mayoría de estos estudios se han enfocado en la estimación de la evapotranspiración, principal salida del balance de agua superficial y subterráneo de la cuenca.

I.5.2.1 Modelación hidrológica conceptual

Respecto a la modelación hidrológica conceptual, dentro de la base de datos de antecedentes recopilados destacan los siguientes estudios:

1. Dirección General de Aguas (DGA), (1986a). Evaporación desde salares: metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación a las regiones I y II. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Publicación Interna SDEH, 86(4), 19., Santiago, Chile: este estudio plantea relaciones analíticas para estimar las tasas de evaporación en salares en base a mediciones puntuales, además, presenta lineamientos generales para realizar un balance hídrico en salares y su aplicación a la cuenca del Río Loa.

2. Dirección General de Aguas (DGA), (1986b). Balance Hidrológico Nacional, II Región. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Santiago, Chile: este estudio contiene una recopilación de la estadística de precipitación, caudales, temperatura y evaporación de tanque tipo A, en la región de Antofagasta. El periodo escogido para representar los valores medios es de 1961 a 1981. Son de interés las relaciones que plantea el estudio sobre la variación de la precipitación y la evaporación potencial en función de la altura.

3. SQM-TESAM, (1996). Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con ampliación de la capacidad productiva de Cloruro de Potasio: En este EIA se presenta un

balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama, sin mayores antecedentes metodológicos. Utiliza estaciones hidrometeorológicas de la DGA, además de registros propios.

4. Orphanopoulos, D., (1998). Informe Hidrogeológico. Evaluación de la Disponibilidad de Aguas Superficiales y Subterráneas: este informe desarrolla un modelo hidrológico conceptual de la cuenca del Salar de Atacama, separándola en franjas de elevación, sobre las cuales distribuye la precipitación media anual. Utiliza la metodología del Balance Hídrico Nacional (1986). Emplea como base de datos las estaciones hidrometeorológicas de la DGA.

5. Compañía Minera RioChilex-EDRA, (1999). Evaluación hidrogeológica acuífero sector Norte del Salar de Atacama. Informe Final: el estudio realizó una estimación de la evaporación del sector norte del salar igual a 3.197 l/s, este valor no incluía la evaporación asociada a cultivos antrópicos (854 l/s). La estimación de evaporación se desarrolló a partir de una sectorización del suelo realizada en base a una imagen satelital.

6. Dirección General de Aguas (DGA), (1999). Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. II Región. Minuta técnica N°60. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos: este estudio presenta un balance hídrico realizado a partir de un modelo conceptual de precipitación escorrentía en la cuenca del Salar de Atacama. Para ello se utilizan las bases de datos hidrometeorológicas de la DGA.

7. CONAMA, (2003). Proyecto de estudio y Monitoreo del Recurso Hídrico de la Cuenca del Salar de Atacama, Antofagasta, Chile. Estudio solicitado por CONAMA (Comisión Nacional de Medio Ambiente) a las empresas SQM (Sociedad Química y Minera de Chile), Minera Escondida Ltda. (Minera Escondida), CMZ (Compañía Minera Zaldívar) y SCL (Sociedad Chilena del Litio). Proyecto de estudio y monitoreo del recurso hídrico de la cuenca del Salar de Atacama: este informe presenta un modelo hidrológico conceptual, el cual utiliza las relaciones de Mardones (1986) para estimar la evaporación, y resultados del balance hídrico del estudio de (DICTUC, 1998) para realizar un balance hídrico del Salar de Atacama. Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones DGA y estaciones propias.

8. SQM-DICTUC, (2004). Modelo hidrogeológico del acuífero de salmuera del núcleo del Salar de Atacama. Descripción del modelo y simulaciones. Estudio de Impacto Ambiental Cambios y Mejoras en la Operación Minera del Salar de Atacama: este estudio presenta un balance hidrológico realizado a partir de estaciones pluviométricas de la DGA y SQM, medición de evaporación de SQM y aforos para determinar la recarga por infiltración. Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones DGA.

9. Kampf, S. K., Tyler, S. W., Ortiz, C. A., Muñoz, J. F., & Adkins, P. L. (2005). Evaporation

and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. Journal of Hydrology, 310(1-4), 236-252: en este artículo se relaciona la evaporación en la superficie del salar, el clima y los flujos de energía en la superficie del suelo. La evaporación se estima para cada tipo de suelo realizando mediciones de campo con estaciones de medición de la covarianza de remolinos (Eddy covariance) y de flujos de energía.

10. Houston, John (2006a). Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. International Journal of Hydrology 330: esta publicación se enfoca en la determinación de la evaporación potencial, a escala regional, para el norte de Chile. Para lograr este objetivo se utilizaron mediciones de evaporación de tanque en 11 estaciones meteorológicas de la DGA.

11. Houston, John (2006b). Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. International Journal of Climatology: esta publicación analizó la precipitación a escala regional del desierto de Atacama, usando 27 estaciones meteorológicas públicas.

12. Kampf, Stephanie; Tyler, Scott (2006). Spatial characterization of land surface energy fluxes and uncertainty estimation at the Salar de Atacama, northern Chile. Advances in Water Resources 29: este artículo da cuenta de la distribución espacial del flujo de energía y la evaporación en el Salar de Atacama, calculados a partir de imágenes satelitales (ASTER).

13. Johnson, J., (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, Regiones XV, I, II y III: esta tesis presenta relaciones teóricas para estimar los flujos evaporativos de la cuenca del Salar de Atacama mediante Correlaciones de Eddy.

14. Rockwood Lithium-SGA, (2009). Adenda I: EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama: este documento calcula la tasa de evaporación del salar de acuerdo a las relaciones de Mardones (1986), y un modelo conceptual para estimar la evaporación del núcleo del salar. Presenta las precipitaciones mensuales a partir de estaciones hidrometeorológicas y una estimación de la escorrentía obtenida a partir de gradientes de precipitaciones. Estima la recarga por precipitaciones al sistema subterráneo mediante una fracción de los caudales de precipitación. Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones DGA y SQM.

15. Dirección General de Aguas (DGA)-GCF, (2010). Actualización de la Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Derechos de Aprovechamiento en las Subcuencas Afluentes al Salar de Atacama. Región II., Informe Final, S.I.T. Nº 210, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, DEP, Santiago, Chile: en este estudio se desarrolla un modelo hidrológico de precipitación escorrentía a partir de mediciones de estaciones hidrometeorológicas de la cuenca más un proceso de rellenado de información y gradientes altimétricos

para realizar un balance hídrico. Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones DGA.

16. Dirección General de Aguas (DGA), (2011). Estimación de Recarga en Cuencas Altiplánicas Seleccionadas: Informe Técnico, SDT N° 317, DEP: este estudio establece una metodología para realizar un modelo hidrológico conceptual de precipitación media y escorrentía total en cuencas altiplánicas. Dentro de las cuencas controladas donde se aplica esta metodología se encuentra la subcuenca de San Pedro de Atacama. Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones DGA.

17. CNR-Ayala y Cabrera, (2012). Diagnóstico del Riego y Drenaje en la II Región: este estudio presenta un análisis de frecuencia de caudales medios mensuales y anuales para toda la cuenca. Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones DGA.

18. Durán, R. (2012). Modelación numérica y su contribución al estudio del comportamiento hidrogeológico del sector SW del acuífero del Salar de Atacama, II Región de Antofagasta, Chile: esta memoria realiza un balance hidrológico conceptual para determinar la recarga al sistema subterráneo, el cual considera relaciones teóricas para los flujos evaporativos obtenidas de Mardones, L. (1986).

19. Dirección General de Aguas (DGA), (2012a). Estimación de recarga en cuencas altiplánicas, región de Atacama: Informe Técnico; SDT N° 334; DEP: este estudio establece la metodología para determinar la recarga de acuíferos en cuencas altiplánicas. Detalla las relaciones de precipitación escorrentía, mediante el uso de coeficientes de escorrentía y de distribución de precipitaciones para estimar los caudales de escorrentía total y recarga neta.

20. Dirección General de Aguas (DGA), (2012b). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Atacama; Informe Técnico; SDT N° 334; DARH: este estudio desarrolla un modelo hidrológico superficial de la cuenca del Salar de Atacama, presentando un balance hídrico completo y valida sus estimaciones de flujos evaporativos con los resultados de Mardones (1986). Utiliza como información hidrometeorológica estaciones propias de la DGA.

21. Minera Delfín-SGA, (2013). EIA Planta de Sulfato de Cobre Pentahidratado: en este EIA se presenta un modelo conceptual hidrológico, donde se analizan las precipitaciones medias mensuales en la cuenca del Salar de Atacama, se presentan curvas de variación estacional y se determina la escorrentía superficial de la cuenca mediante la fórmula racional. Utiliza en su base de datos estaciones hidrometeorológicas de la DGA, estaciones propias y de terceros.

22. Elmes, M., (2015). Amenaza debido a eventos de precipitación máxima entre los 21° y 34° latitud Sur de Chile Continental: análisis de umbrales hidrometeorológicos, gatillantes de remoción en masa por flujos en la Cuenca del Río Copiapó: Esta

memoria determina eventos hidrológicos de precipitaciones máximas para toda la región de Antofagasta y en particular en la cuenca del Salar de Atacama, mediante análisis de frecuencias. Utiliza registros hidrometeorológicos de la DGA.

23. Rockwood Lithium-SGA, (2015). Adenda V: EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama: en este EIA se realiza un modelo hidrológico conceptual, en el cual se distribuye la precipitación mediante isoyetas y gradientes de precipitación, mientras que la evaporación se estima a través del índice NDVI de imágenes satelitales, obteniendo gradientes mensuales de evaporación. La infiltración al sistema subterráneo se estima mediante un balance del ión cloruro producto de las precipitaciones a través de los registros de mediciones de este elemento en aguas de infiltración. Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones DGA y estaciones propias.

24. Boutt, D. F., Hynek, S. A., Munk, L. A., & Corenthal, L. G. (2016). Rapid recharge of fresh water to the halite-hosted brine aquifer of Salar de Atacama, Chile. Hydrological Processes, 30(25), 4720-4740: este artículo presenta un modelo hidrológico conceptual, el cual utiliza datos hidrometeorológicos para determinar la recarga en el sistema de acuíferos someros del Salar de Atacama, percepción remota para estimar la superficie de lagunas del salar, mediciones in-situ de temperatura, conductividad y rastreo de isótopos para determinar direcciones de flujo. Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones DGA.

25. Dirección General de Aguas (DGA), (2016). Sistematización de información de los recursos hídricos del Salar de Atacama para un futuro plan de gestión, Informe Técnico, SDT Nº 392, DEP, Santiago, Chile: este informe presenta la metodología para realizar un plan de gestión hídrico integrado del Salar de Atacama, además de incluir las fuentes de información fundamentales que deben ser utilizada para tales fines. Las conclusiones de este estudio se enfocan en establecer los lineamientos básicos para realizar un balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama, específicamente respecto a cómo abordar el análisis de hidrología en el plan de gestión. En este sentido, es más acotado en alcance respecto a los objetivos del presente estudio.

26. Minera Escondida Ltda.-Golder (2017). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Monturaqui: en este EIA se determina la relación entre la precipitación media anual y el caudal de recarga del acuífero subterráneo del sector de Monturaqui, y el rango de ocurrencia de la recarga disponible. Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones meteorológicas de la Dirección General de Aguas (DGA) y estaciones y por Minera Escondida Ltda. (MEL).

27. Minera Escondida Ltda.-Golder, (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Monturaqui: en el anexo de este EIA se determina la relación entre la precipitación media anual y el caudal de recarga del acuífero subterráneo del sector de Monturaqui mediante el análisis de 30 series sintéticas de 100 años a escala horaria, en conjunto con observaciones

de niveles piezométricos en el Salar de Atacama. Los niveles observados muestran 4 a 5 recuperaciones cada 10 años. Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones DGA e información pública de registros de Minera Escondida Ltda. entre 2010 y 2016.

28. SQM-CSIC, (2017). Cuarta Actualización del modelo hidrogeológico del Salar de Atacama: este estudio presenta un análisis de precipitaciones por isoyetas, gradientes altimétricos de precipitación y estimación de la recarga subterránea a partir de DICTUC (2004). Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones DGA y SQM.

29. CEAZA, (2018). Aspectos esenciales de la hidrología y gestión del agua: Comunidad Atacameña de Peine: este estudio presenta un modelo conceptual esquemático del funcionamiento hidrológico de la cuenca del Salar de Atacama, el cual describe los cuerpos de agua presentes en la cuenca y los distintos procesos hidrológicos que gobiernan la dinámica del salar. Utiliza como bases de datos estaciones hidrometeorológicas de la DGA y otros estudios.

30. Comité de Minería No Metálica-Amphos21, (2018). Estudio que contiene un modelo hidrológico conceptual de la cuenca del Salar de Atacama, de precipitación escorrentía mediante relaciones empíricas, en particular el método DIHA-UC-DGA para determinar caudales de escorrentía y recarga por escorrentía superficial. Se caracteriza y cuantifica la evaporación y evapotranspiración en la cuenca a través del análisis de imágenes satelitales, en función del índice de humedad, índice de brillo e índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Utiliza como bases de datos hidrometeorológicas estaciones de la DGA, estaciones de SQM, Albemarle y Compañía Minera Zaldívar, mediciones in-situ y estudios anteriores.

31. SQM-CSIC, (2018). Informe de investigación Producto de la Activación del Plan de Contingencia en los puntos L1-5 y reglilla L1-G4: este informe realiza un análisis de representatividad de la estación meteorológica Chaxa y las otras estaciones de la cuenca de acuerdo a los eventos de precipitación y evaporación que se han registrado. Presenta un mapa de isoyetas y gradientes de evaporación en la cuenca. Adicionalmente realiza un análisis hidrológico de la precipitación nival en las subcuencas de Río Grande, Toconao y Talabre.

32. Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T. (2019a). Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. Science of The Total Environment, 651, 668-683: este estudio presenta la distribución de precipitación por isoyetas, establece un umbral de precipitación bajo el que no se produce recarga, determinando esta última como un porcentaje de las precipitaciones intensas. La evaporación se estima a partir de mediciones de terreno y las relaciones de Mardones (1986). Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones DGA y SQM.

33. Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T. (2019b).

The effect of brine pumping on the natural hydrodynamics of the Salar de Atacama: The damping capacity of salt flats. Science of The Total Environment, 654, 1118-1131: este artículo presenta una estimación de recarga por precipitación a los acuíferos de la cuenca del Salar de Atacama siguiendo la metodología de Marazuela et al. (2018). Utiliza como base de datos estaciones pluviométricas de la DGA y de SQM, modelos de elevación digital e imágenes LANDSAT 7 y aforos fluviométricos de los ríos principales de la cuenca del Salar de Atacama.

34. SQM-CSIC, (2019). Quinta Actualización del Modelo Regional de Flujo del Salar de Atacama: este estudio presenta un análisis de precipitaciones por isoyetas, gradientes altimétricos de precipitación y estimación de la recarga subterránea a partir de DICTUC (2004). Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones DGA y SQM actualizadas al año 2019.

I.5.2.2 Modelación hidrológica numérica

Con respecto a la modelación hidrológica numérica, la cantidad de estudios es más acotada que en el caso anterior. A partir de la recopilación de antecedentes realizada se destacan los siguientes estudios referentes a modelación hidrológica numérica:

1. Liang, X., and Z. Xie, (2001): A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models, Advances in Water Resources, 24(9-10), 1173-1193: Consiste en otro antecedente con el que se cuenta respecto a la modelación hidrológica superficial de la zona corresponde al modelo regional Variable Infiltration Capacity (VIC), el cual fue desarrollado metodológicamente y aplicado en Centro Interdisciplinario de Cambio Global UC (2018). El modelo VIC fue creado por Liang et al. (2001). La herramienta VIC consiste en un modelo distribuido de base física que representa procesos de evapotranspiración, acumulación y derretimiento de nieve, intercepción, lagos, etc. Por otra parte, el suelo se encuentra representado por distintos estratos (3 en el caso del presente estudio), los que no incorporan formalmente un acuífero.

   La evapotranspiración corresponde a la suma de la evaporación desde suelo desnudo, transpiración desde la vegetación y la evaporación del agua acumulada en el follaje. La acumulación puede ser superficial (nieve o glaciares, por ejemplo) o subterránea, la que se representa mediante las humedades del suelo en las distintas capas. La precipitación (P) corresponde a la única entrada de agua a la celda.

2. Dirección General de Aguas (DGA)-Centro Interdisciplinario De Cambio Global UC, (2013). Actualización del Balance Hídrico Nacional Considerando Cambio Climático: Diagnóstico, S.I.T. Nº 313, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile: este estudio considera distintos modelos de balance hidrológico, según la escala a la cual son aplicables, ya sea a escala continental o de cuenca. Dentro del balance hidrológico a escala de cuenca considera métodos directos e indirectos para estimar precipitaciones,

transposición de caudales para flujos aportantes a la cuenca, estimaciones de salidas de agua por evapotranspiración a partir de relaciones empíricas y métodos indirectos, como teledetección y estimación de evaporación a partir de métodos directos. También se describen los principales modelos hidrológicos de precipitación escorrentía, se describen modelos de cambio climático a nivel global. Las bases de datos hidrometeorológicas utilizadas en las cuencas de control de este estudio corresponden a las de la DGA y CEAZA-MET, además de productos grillados de modelos climáticos globales.

3. CNR-Arrau Ingeniería EIRL, (2014). Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego En Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. Informe Final: en este estudio se realiza un análisis hidrológico acabado de la zona de San Pedro de Atacama. Se analizan curvas de variación estacional, estudio de crecidas, análisis fluviométrico y se plantea un modelo de escorrentía superficial, mediante la generación de caudales mensuales naturalizados en San Pedro de Atacama. Las bases de datos de este modelo corresponden a estaciones hidrometeorológicas de la DGA y mediciones en terreno.

4. Dirección General de Aguas (DGA)-Universidad de Chile & Pontificia Universidad Católica de Chile, (2017). Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile: este estudio plantea la metodología general para realizar un modelo hidrológico de balance hídrico a escala de cuenca. Consiste en caracterizar la cuenca en estudio, definir variables hidrológicas, forzantes climáticas para finalmente aplicar un modelo de simulación hidrológica Variable Infiltration Capacity (VIC) y análisis de impactos del cambio climático incluyendo 4 modelos de circulación general. Se presenta la aplicación de esta metodología a la cuenca del Río Loa, entre otras. Las bases de datos hidrometeorológicas utilizadas en las cuencas de control de este estudio corresponden a las de la DGA y CEAZA-MET, además de productos grillados y bases de datos de modelos climáticos globales.

5. Dirección General de Aguas (DGA)-Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile, (2018). Aplicación de la Metodología de Actualización del Balance Hídrico Nacional en las Cuencas de las Macrozonas Norte y Centro, SIT N° 435. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile: este estudio consiste en una actualización y aplicación del informe anterior, donde se plantea la metodología general para realizar un modelo hidrológico de balance hídrico a escala de cuenca. Consiste en caracterizar la cuenca en estudio, definir variables hidrológicas, forzantes climáticas para finalmente aplicar un modelo de simulación hidrológica Variable Infiltration Capacity (VIC) y un análisis de impactos del cambio climático incluyendo 4 modelos de circulación general. Además, se implementa un modelo hidrológico de superficie terrestre NOAH-MP para las cuencas de la zona norte de Chile. Se presenta la aplicación de esta metodología a la cuenca del Río Loa, entre otras. Las bases de datos hidrometeorológicas utilizadas en las cuencas de control de este estudio corresponden a las de la DGA y CEAZA-MET, además de

productos grillados y bases de datos de modelos climáticos globales.

6. CMZ-GCF Ingenieros, (2018). Modelo del sistema hídrico de la subcuenca sur del Salar de Atacama. EIA Continuidad operacional Compañía Minera Zaldívar: en este EIA se utiliza un modelo matemático de hidrología superficial a escala diaria en la cuenca del Salar de Atacama. Esta herramienta fue implementada en el código MATLAB R2016a y es capaz de representar mediante relaciones algebraicas los procesos físicos enumerados a continuación y cuyo diagrama se muestra en la Figura I-55:

    a) Precipitación.
    b) Escorrentía.
    c) Infiltración.
    d) Evaporación.
    e) Sublimación.
    f) Deshielo.

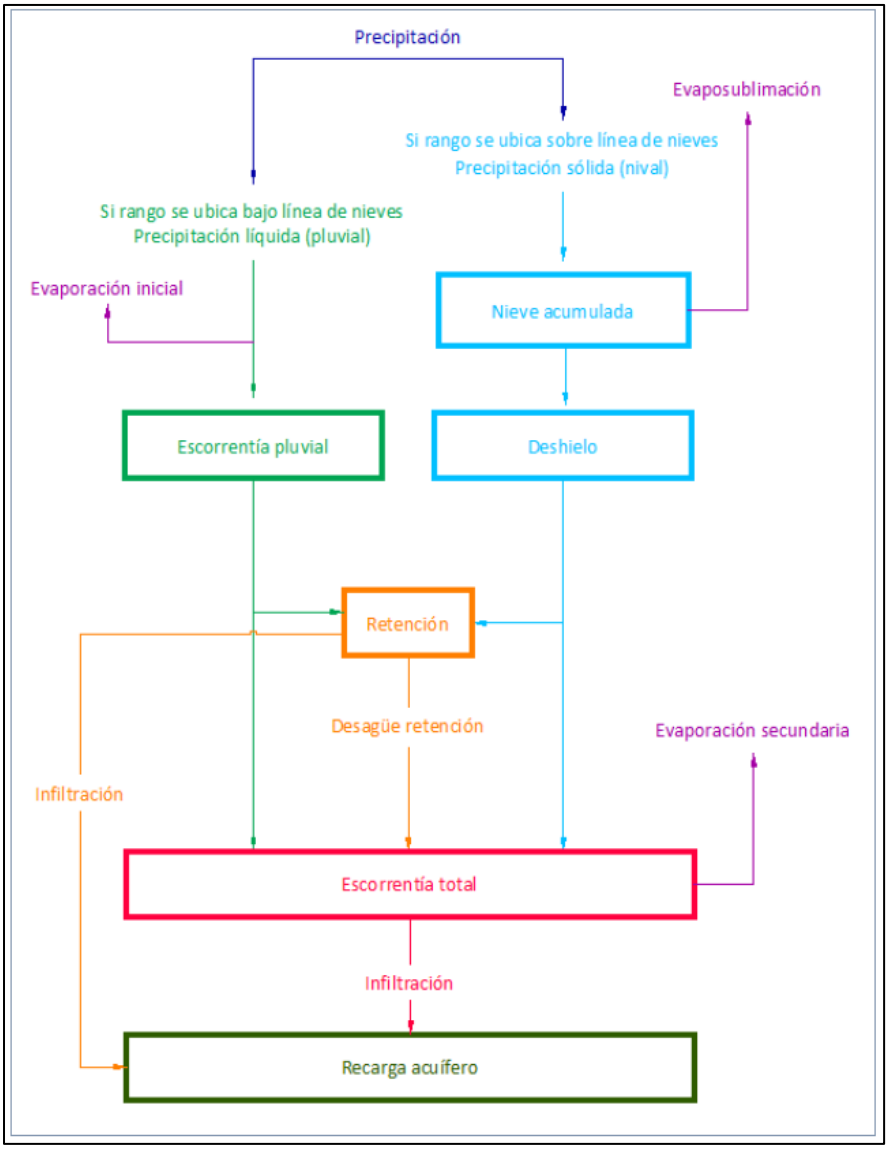


Figura I-55: Esquema de modelo numérico hidrológico en MATLAB 2016.
Fuente: DGA-GCF, (2018).

Este modelo utiliza relaciones algebraicas extraídas del modelo SWAT para representar los procesos de deshielo, entre otras. Respecto al resto de balances hidrológicos conceptuales, éste tiene la ventaja de ser semi distribuido en la cuenca, es decir, toma en cuenta la distribución espacial de las variables hidrometeorológicas sobre la cuenca, separándose por zonas definidas por bandas de elevación. El modelo requiere como datos de entrada gradientes altimétricos de precipitación, gradientes de temperatura y mediciones de evaporación.

I.5.3 Modelación hidrogeológica

En esta sección se describen los antecedentes sobre modelación conceptual y numérica de la hidrogeología de la cuenca del Salar de Atacama. Se recopilaron 83 estudios

referentes específicamente a modelación hidrogeológica relacionados a hidrología superficial en la cuenca del Salar de Atacama, de los cuales se seleccionaron los más importantes para ser descritos en este apartado.

I.5.3.1 Modelación hidrogeológica conceptual

A continuación, se describen los estudios referentes a modelación hidrogeológica conceptual más relevantes obtenidos en la recopilación de antecedentes respecto a modelación hidrogeológica conceptual.

1. SQM -TESAM, (1996). Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con Ampliación de la Capacidad Productiva de Cloruro de Potasio: este estudio presenta un modelo conceptual hidrogeológico del Salar de Atacama, para el cual presenta transmisividades, porosidades y permeabilidades. Utiliza como bases de datos la geología de la cuenca del Salar de Atacama, niveles piezométricos de salmuera y agua fresca, pruebas de bombeo, geología, topografía y estudios anteriores.

2. Orphanopoulos, D., (1998). Informe Hidrogeológico. Evaluación de la Disponibilidad de Aguas Superficiales y Subterráneas: este informe incluye un modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca del Salar de Atacama, realizando un balance hídrico de los sistemas de acuíferos del salar y determina el volumen almacenado por dichos sistemas acuífero. Emplea como base de datos las estaciones hidrometeorológicas de la DGA, estudios anteriores de los espesores de los acuíferos, profundidad del nivel freático y niveles piezométricos (EDRA (1999)).

3. Compañía Minera RioChilex-EDRA, (1999). Evaluación hidrogeológica acuífero sector Norte Salar de Atacama, Informe final: Este estudio presenta la hidrogeología de la cuenca del Salar de Atacama, identificando 3 unidades hidrogeológicas. Utiliza como base de datos sondajes, geofísica, pruebas de bombeo y medición de niveles.

4. SQM Salar S.A.-Igsa Consultores, Pramar Ambiental Consultores e Ingeniería DICTUC, (2004-2006). EIA Cambios y Mejoras en la Operación Minera en Salar de Atacama: presenta la geología de parte de la cuenca del Salar de Atacama y describe el funcionamiento hidrogeológico del sistema de lagunas y el núcleo del salar. Identifica las zonas hidrogeológicas del salar según permeabilidad, comportamiento hidráulico de lagunas y presenta secciones hidrológicas. Emplea como base de datos mediciones de piezométricas, registros de precipitación de estaciones de la DGA, perfiles geofísicos, informes de habilitación de pozos, calicatas, pruebas de bombeo, columnas estratigráficas, entre otros.

5. DICTUC, (2005). Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudios de evaluación de recursos hídricos: este informe presenta un modelo hidrogeológico conceptual del Salar de Atacama, donde describe la geometría y formación de los acuíferos y los tipos de relleno, su transmisividad, potencia y una estimación de la recarga total. Utiliza como base de datos la geología del salar,

columnas estratigráficas y pruebas de bombeo.

6. Rissmann, C., Leybourne, M., Benn, C., & Christenson, B. (2015). The origin of solutes within the groundwaters of a high Andean aquifer. Chemical Geology, 396, 164-181: este trabajo presenta un modelo conceptual hidrogeológico, el cual explica el origen y la mezcla de las fuentes de solutos de la zona de MNT del Salar de Atacama. Utiliza como base de datos mediciones hidroquímicas e isotópicos.

7. Rockwood Lithium-SGA, (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama: este EIA presenta un modelo hidrogeológico conceptual y numérico. Respecto al modelo conceptual, este se construyó a partir de datos de antecedentes históricos y actuales de piezómetros, aforos y limnímetros obtenidos a partir de campañas de terreno, además de estaciones meteorológicas, entre otros. El modelo considera 9 unidades hidrogeológicas distribuidas según su potencia, permeabilidad, almacenamiento y características geológicas.

8. Minera Escondida-Golder, (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui: este estudio presenta un modelo hidrogeológico conceptual y otro numérico para la cuenca del salar de Atacama. Respecto al modelo conceptual hidrogeológico, éste realiza una caracterización geológica de las Unidades Hidrogeológicas definidas para el sistema de acuíferos del Salar de Atacama, niveles de agua, posición de la interface salina en el sector terminal del acuífero, así como el tamaño de las lagunas y cuerpos de agua del sector sur de la cuenca del Salar de Atacama. Como base de datos emplea pozos de bombeo, pozos de observación, piezómetros, calicatas, perforaciones, entre otras mediciones de campo.

9. SLM NX Uno de Peine-CPH Consultores y Asociados, (2017). Adenda III Anexo 5. Estudio Hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelo Conceptual. Rev.0. EIA Planta de Producción de Sales de Potasio: este estudio presenta un análisis hidrogeológico conceptual de la cuenca del Salar de Atacama, enfocado en el núcleo y su frontera. Describen las Unidades Hidrogeológicas a partir de descripciones geológicas, se define una geometría del acuífero mediante datos geofísicos, se detalla el funcionamiento hidrogeológico del núcleo del salar, su frontera y la zona de la cuña salina. Este estudio considera en su base de datos pruebas de bombeo, niveles de pozos, antecedentes de Albemarle y SQM.

10. SQM-CSIC, (2017). Cuarta actualización modelo SQM: este estudio corresponde a una actualización del modelo hidrogeológico conceptual y numérico del Salar de Atacama. El modelo conceptual utiliza información geológica, datos hidrometeorológicos, piezómetros y entrega una actualización de las unidades hidrogeológicas del Salar de Atacama.

11. CMZ-GCF Ingenieros, (2018). Modelo del sistema hídrico de la subcuenca sur del Salar de Atacama. EIA Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar: este estudio incluye un modelo hidrogeológico conceptual, donde se definen unidades hidrogeológicas, además de presentar la piezometría del sector de Monturaqui. Este modelo utiliza como bases de datos la red hidrometeorológica de la DGA y propia, además de niveles piezométricos de pozos de observación, derechos de agua otorgados, extracciones históricas y actuales de salmuera, la geometría de los acuíferos y otros estudios anteriores.

12. Comité de Minería No Metálica-Amphos21, (2018). Este informe presenta un modelo hidrogeológico conceptual tridimensional, con unidades hidrogeológicas bien definidas, separadas según su permeabilidad, potencia, almacenamiento, composición geológica y edad. Para desarrollar este modelo conceptual se utilizaron columnas litológicas, estudios geológicos anteriores, geología estructural , estudios de geofísica, niveles piezométricos, pruebas de bombeo y análisis hidrológico de diversos parámetros que formaron parte de un balance hídrico del sistema acuífero del Salar de Atacama.

13. Exploraciones San Pedro S.A. (EPSA)-Gestionare Consultores, (2018). Plan de Alerta Temprana para el seguimiento de la extracción de agua subterránea en el norte del Salar de Atacama: este plan de alerta temprana presenta un modelo conceptual hidrogeológico en el cual describe las unidades hidrogeológicas de los acuíferos del Salar de Atacama, además de presentar perfiles conceptuales de dichas unidades. La base de datos utilizada para desarrollar este modelo comprende columnas litológicas de geología, estudios geofísicos de estudios anteriores, además de una actualización de la topografía y nuevos niveles piezométricos.

14. Marazuela et al., (2018). 3D mapping, hydrodynamics and modelling of the freshwater-brine mixing zone in salt flats similar to the Salar de Atacama (Chile). Journal of Hydrology 561 (2018) 223-235: este artículo incluye un modelo hidrogeológico del salar, en el cual se presenta una distribución tridimensional de niveles de salmueras y agua fresca alrededor de la interfaz salina, lo que utilizaron como base para desarrollar un modelo numérico hidrogeológico. Utiliza como base de datos niveles piezométricos de salmueras, agua dulce, topografía, estudios de geología, entre otros.

15. Minera Escondida Ldta.-Golder, (2018). Adenda EIA Proyecto Monturaqui: este estudio presenta una actualización de los modelos hidrogeológicos previos, el cual presenta una nueva distribución piezométrica del sector sur del Salar de Atacama, correspondiente a la zona de Monturaqui. Utiliza como base de datos niveles estáticos de pozos de monitoreo, punteras, pruebas de bombeo y mediciones piezométricas anteriores, entre otros.

16. SQM-CSIC, (2018). Informe de investigación Producto de la Activación del Plan de Contingencia en los puntos L1-5 y reglilla L1-G4: Este informe realizado para el expediente sancionatorio de SQM presenta un modelo hidrogeológico conceptual

del sector del sistema de Soncor de la cuenca del Salar de Atacama, el cual servirá para implementar un modelo numérico hidrogeológico.

17. Tapia, J, et al. "Geology and geochemistry of the Atacama Desert." Antonie van Leeuwenhoek 111.8 (2018): 1273-129: este artículo describe la geología y geomorfología de la cuenca del Salar de Atacama, describe los cuerpos de agua presentes en la zona y realiza un análisis hidrogeoquímico de la cuenca. La base de datos utilizada por este artículo consiste en catastros de la DGA, antecedentes del SERNAGEOMIN y estudios anteriores.

18. Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T. (2019). The effect of brine pumping on the natural hydrodynamics of the Salar de Atacama: The damping capacity of salt flats. Science of The Total Environment, 654, 1118-1131: este artículo presenta una estimación de recarga por precipitación a los acuíferos de la cuenca del Salar de Atacama siguiendo la metodología de Marazuela et al. (2018). El modelo conceptual hidrogeológico desarrollado en este estudio se basa en pruebas de bombeo, geología y columnas litológicas de estudios anteriores. Utiliza como base de datos estaciones pluviométrias de la DGA y de SQM, además de modelos de elevación digital e imágenes LANDSAT 7, aforos fluviométricos de los ríos principales de la cuenca del Salar de Atacama, pozos de monitoreo piezométrico, pruebas de bombeo y estudios previos.

19. SQM-CSIC, (2019). Quinta Actualización del Modelo Regional de Flujo del Salar de Atacama: este estudio corresponde a la quinta actualización del modelo hidrogeológico conceptual y numérico del Salar de Atacama. El modelo conceptual utiliza información geológica, datos hidrometeorológicos, piezómetros y entrega una actualización de las unidades hidrogeológicas del Salar de Atacama. El estudio presenta información actualizada al año 2019.

En general, estos antecedentes utilizan registros de:

1. Red hidrometeorológica y niveles piezométricos de pozos de observación. Evolución temporal de niveles.

2. Derechos de agua otorgados, extracciones históricas y actuales de salmuera.

3. Mapas de isopiezas y direcciones de flujo.

4. Valores de permeabilidad, transmisividad, porosidad y coeficientes de almacenamiento, así como la distribución espacial de dichos parámetros.

5. Geometría de la interface salina.

6. Monitoreo de variables hidrogeológicas de los sistemas lagunares tales como hidroquímica, niveles superficiales y batimetría.

7. Otros estudios anteriores.

I.5.3.2 Modelación hidrogeológica numérica

En esta sección se describen los estudios más relevantes obtenidos a partir de la recopilación de antecedentes sobre modelación hidrogeológica numérica.

1. SQM, (1996). Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con Ampliación de la Capacidad Productiva de Cloruro de Potasio: este estudio presenta un modelo numérico hidrogeológico basado en el estudio conceptual hidrogeológico del mismo informe del Salar de Atacama. El modelo está implementado en el código MODFLOW, y entrega direcciones de flujo subterráneo, piezometría, mapas de descensos y niveles de salmuera, entre otros. Utiliza como bases de datos el modelo hidrogeológico conceptual del mismo estudio, determinación de transmisividades, porosidades y permeabilidades. la geología de la cuenca del Salar de Atacama, niveles piezométricos de salmuera y agua fresca, pruebas de bombeo, geología, topografía y estudios anteriores.

2. Compañía Minera RioChilex-EDRA, (1999). Evaluación hidrogeológica acuífero sector norte del Salar de Atacama. Informe Final. Modelación realizada por Waterloo Hydrogeological Latinoamerica: en este estudio se realizó una modelación numérica del acuífero ubicado al norte del núcleo del Salar de Atacama, presentándose el modelo conceptual que apoya su construcción, basado en una serie de trabajos realizados como parte de la exploración minera realizada por minera Riochilex. El modelo numérico construido consideró gran parte del acuífero del norte del Salar de Atacama, coincidiendo el límite norte con la ciudad de San Pedro de Atacama y el límite sur con el nacimiento del sistema lacustre de Soncor, a la altura de Toconao. El modelo construido aportó antecedentes interesantes para la modelación a realizar, puesto que aborda la zona menos estudiada del Salar de Atacama, que corresponde al sector norte.

3. SQM Salar S.A.-Igsa Consultores, Pramar Ambiental Consultores e Ingeniería DICTUC, (2004-2006). EIA Cambios y Mejoras en la Operación Minera en Salar de Atacama: el modelo se encuentra realizado en MODFLOW, representando a la zona centro-sur del Salar de Atacama. Presenta un tamaño de celda comprendido entre 250 hasta 1.000 m. las condiciones iniciales del modelo se definieron en base a los registros obtenidos en 180 pozos de observación y de bombeo.

4. DICTUC, (2005). Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudios de evaluación de recursos hídricos: este estudio presenta un modelo hidrogeológico numérico implementado en MODFLOW del acuífero del núcleo sur y este del Salar de Atacama. Este modelo se construye en base al modelo geológico del mismo estudio y consiste la base de estudios futuros, los cuales lo fueron actualizando.

5. Sociedad Legal Minera NX UNO de Peine, (2009). EIA Planta de Producción de Sales de Potasio, SLM NX Uno de Peine: este EIA presenta un modelo hidrogeológico conceptual, donde se establecen 2 sistemas de acuíferos principales en el Salar de Atacama, uno superficial y otro profundo, separados por un estrato arcilloso de espesor variable (acuitardo), lo cual se confirma con un estudio hidroquímico. Además, presenta la transmisividad de estos acuíferos obtenida a partir de pruebas de bombeo. Este modelo emplea como bases de datos los perfiles estratigráficos del salar y pruebas de bombeo.

6. Durán J., (2012). Modelación numérica y su contribución al estudio del comportamiento hidrogeológico del sector sw del acuífero del Salar de Atacama. II Región de Antofagasta, Chile. Universidad de Chile: trabajo de modelación numérica referente al estudio del comportamiento hidrogeológico del sector SW del Salar de Atacama. La información utilizada es la de SQM, pero solo se expone la información que no es confidencial.

   Rockwood Lithium-SGA, (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama: este EIA presenta un modelo hidrogeológico conceptual y numérico. Respecto a este último, se utiliza el código MODFLOW para la modelación tridimensional de flujo y SEAWAT para la modelación de perfiles bidimensionales. Este último acopla un modelo MODFLOW que resuelve las ecuaciones de flujo más MT3DMS que resuelve las ecuaciones de transporte para simular flujo de densidad variable. El modelo de transporte depende del modelo de flujo para imponer sus condiciones de borde. Estos modelos no abarcan la superficie completa del salar y utilizan como base de datos el modelo conceptual descrito anteriormente, datos de antecedentes históricos y actuales de piezómetros, aforos y limnímetros obtenidos a partir de campañas de terreno, además de estaciones meteorológicas, entre otros.

7. Minera Escondida Ltda.-Golder, (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui: el modelo numérico presentado en este estudio corresponde al código MODFLOW-USG, el cual abarca la zona sur del Salar de Atacama correspondiendo a Tilopozo, Negrillar y Monturaqui. Los antecedentes utilizados para elaborar este modelo corresponden al modelo hidrogeológico conceptual, datos de perforaciones, pozos de bombeo, pozos de observación, piezómetros, calicatas, perforaciones, entre otras mediciones de campo.

8. SLM NX Uno de Peine-CPH Consultores y Asociados, (2017). Adenda 3. Anexo 6. Estudio hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelación numérica. Rev. 0: el modelo numérico se desarrollado a partir del modelo de simulación del DICTUC del 2004. Se complementa con la adición de nuevos sondajes y nueva geofísica.

9. SQM-CSIC, (2017). Cuarta actualización modelo SQM: este estudio corresponde a una actualización del modelo numérico hidrogeológico del Salar de Atacama. Este

modelo corresponde al código FEFLOW. Este modelo considera para su elaboración el modelo conceptual del mismo estudio, datos de antecedentes históricos y actuales de piezómetros, geofísica, sondajes, aforos, mediciones hidrometeorológicas de la DGA y SQM, entre otros.

10. CMZ-GCF Ingenieros (2018). Modelo del sistema hídrico de la subcuenca sur del Salar de Atacama. EIA Continuidad operacional Compañía Minera Zaldívar: este estudio incluye un modelo hidrogeológico conceptual, donde se definen unidades hidrogeológicas, además de presentar la piezometría del sector de Monturaqui. Se presenta un modelo de simulación hidrogeológico desarrollado en MODFLOW del sector sur del Salar de Atacama. Este estudio utiliza como bases de datos el modelo conceptual hidrogeológico desarrollado, la red hidrometeorológica de la DGA y propia, además de niveles piezométricos de pozos de observación, derechos de agua otorgados, extracciones históricas y actuales de salmuera, la geometría de los acuíferos y otros estudios anteriores.

11. Exploraciones San Pedro S.A. (EPSA)-Gestionare Consultores, (2018). Plan de Alerta Temprana para el seguimiento de la extracción de agua subterránea en el norte del Salar de Atacama: el modelo presentado se construyó en Visual Modflow y consta de 6 capas, 2 de las cuales corresponden a estratos confinantes. La extensión del modelo es similar a la utilizada por Riochilex en su estudio, e incluye la cuenca del río San Pedro dentro del dominio. El modelo utiliza como base de datos la red hidrometeorológica de la DGA y propia, además de niveles piezométricos de pozos de observación, derechos de agua otorgados, extracciones históricas y actuales de salmuera, la geometría de los acuíferos y otros estudios anteriores.

12. Marazuela, M. A., Vázquez-Suñè, E., Custodio, E., Palma, T., Garcia-Gil, A., & Ayora, C. (2018). 3D mapping, hydrodynamics and modelling of the freshwater-brine mixing zone in salt flats similar to the Salar de Atacama (Chile). Journal of Hydrology, 561, 223-235: este artículo presenta un modelo numérico hidrogeológico de flujo 2D con densidad variable.

13. Minera Escondida Ltda.-Golder (2018). Adenda EIA Proyecto Monturaqui: este estudio presenta una actualización de los modelos hidrogeológicos previos, el cual presenta una nueva distribución piezométrica del sector sur del Salar de Atacama, correspondiente a la zona de Monturaqui. Utiliza como base de datos niveles estáticos de pozos de monitoreo, punteras, pruebas de bombeo y mediciones piezométricas anteriores, entre otros.

14. SQM-CSIC, (2018). Informe de investigación Producto de la Activación del Plan de Contingencia en los puntos L1-5 y reglilla L1-G4: Este informe presenta un modelo hidrogeológico numérico tridimensional de flujo de densidad variable en la zona del sistema hidrogeológico de Soncor, implementado en el software FEFLOW 7.0. El modelo utiliza como base de datos la red hidrometeorológica de la DGA y propia, además de niveles piezométricos de pozos de observación, derechos de agua otorgados, extracciones históricas y actuales de salmuera, la geometría de los

acuíferos y otros estudios anteriores.

15. Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T., (2019). The effect of brine pumping on the natural hydrodynamics of the Salar de Atacama: The damping capacity of salt flats. Science of The Total Environment, 654, 1118-1131: este artículo presenta una estimación de recarga por precipitación a los acuíferos de la cuenca del Salar de Atacama siguiendo la metodología de Marazuela et al. (2018). El modelo numérico consiste en el código FEFLOW, de elementos finitos, permite simular densidad variable y es de estructura tridimensional. La extensión del modelo abarca el núcleo del Salar de Atacama, la zona fronteriza, con especial énfasis en la interfaz salina y gran parte del este de la cuenca del salar. Utiliza como base de datos el modelo conceptual hidrogeológico, estaciones pluviométrias de la DGA y de SQM, además de modelos de elevación digital e imágenes LANDSAT 7, aforos fluviométricos de los ríos principales de la cuenca del Salar de Atacama, pozos de monitoreo piezométrico, pruebas de bombeo y estudios previos.

16. SQM-CSIC, (2019). Quinta Actualización del Modelo Regional de Flujo del Salar de Atacama: este estudio corresponde a la quinta actualización del modelo numérico hidrogeológico del Salar de Atacama. Este modelo corresponde al código FEFLOW. Este modelo considera para su elaboración el modelo conceptual del mismo estudio, datos de antecedentes históricos y actuales de piezómetros, geofísica, sondajes, aforos, mediciones hidrometeorológicas de la DGA y SQM, entre otros, cuya información fue actualizada al año 2019.

En general estos estudios utilizan registros de:

1. Red hidrometeorológica y niveles piezométricos de pozos de observación. Evolución temporal de niveles.

2. Derechos de agua otorgados, extracciones históricas y actuales de salmuera.

3. Mapas de isopiezas y direcciones de flujo.

4. Valores de permeabilidad, transmisividad, porosidad y coeficientes de almacenamiento, así como la distribución espacial de dichos parámetros.

5. Geometría de la interface salina.

6. Monitoreo de variables hidrogeológicas de los sistemas lagunares tales como hidroquímica, niveles superficiales y batimetría.

7. Modelos conceptuales previos y/o realizados en el mismo estudio.

I.5.4 Descripción de trabajos previos en modelación ecológica

En este capítulo se describen los estudios más relevantes referentes a modelación ecológica

en la cuenca del Salar de Atacama, obtenidos a partir de la recopilación de antecedentes.

1. Marquet, P. A., (1998). Los ecosistemas del desierto de Atacama y área andina adyacente en el norte de Chile: las variables analizadas en este estudio corresponden a forzantes abióticas, ecosistemas y variables antrópicas. Respecto a las primeras, se desarrolla el marco climático de la cuenca, caracterizando las variables abióticas de precipitación y temperatura tanto temporal como espacialmente, las cuales influyen en los ecosistemas. Las variables ecosistémicas descritas corresponden a flora, vegetación, mamíferos, aves e insectos presentes en la cuenca del Salar de Atacama, a partir de las cuales se establecen cadenas tróficas (Figura I-56), y se correlaciona su abundancia en función de la altura.

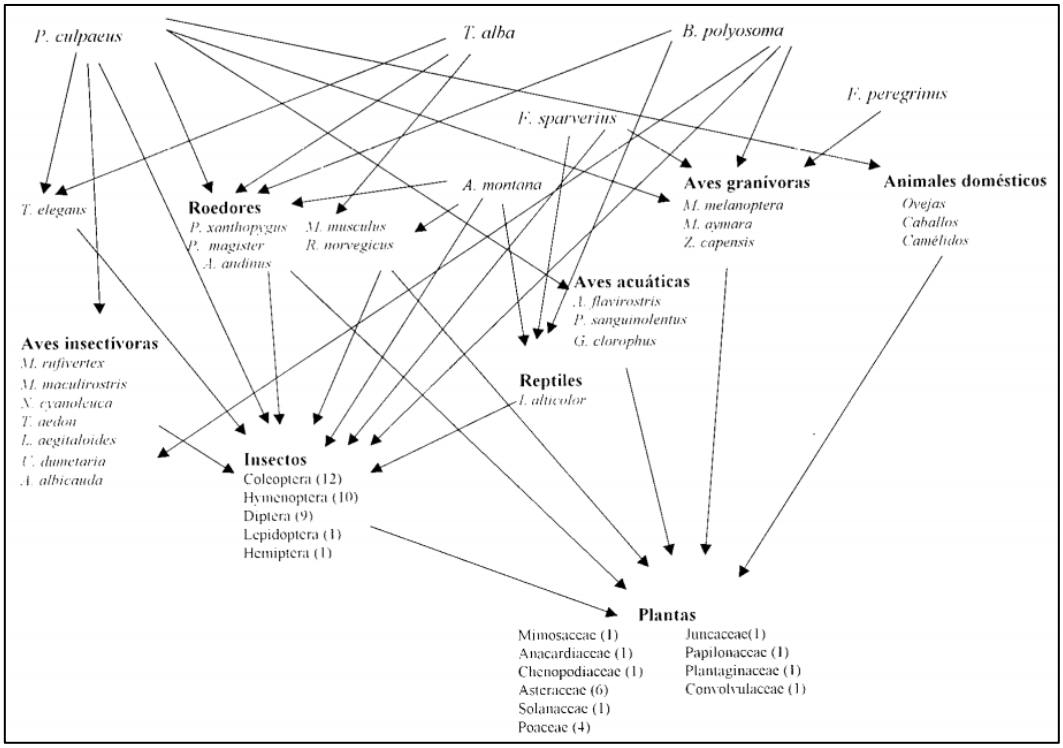


Figura I-56 Cadenas tróficas para el ambiente de Puna.
Fuente: Marquet et al., (1998).

Por otro lado, se resume la información respecto de patrones en la estructura de estos ecosistemas, en relación a la diversidad y abundancia de roedores, aves, insectos y plantas. Respecto a la última variable, se reconoce al ser humano como un componente del ecosistema, identificando y describiendo las principales actividades antrópicas que afectan el ecosistema, como los asentamientos humanos, la actividad agrícola, e infraestructura de riego.

Por último, el estudio presenta una aplicación de la identificación de estos 3 grupos de variables para el caso del Ayllu de Beter en San Pedro de Atacama, para el cual se documenta la evolución histórica de los asentamientos en la zona, los principales cultivos en la zona y la descripción del clima de la zona.

Se emplean como base de datos excavaciones arqueológicas e indagaciones antropológicas en los asentamientos humanos, datos de clima de la región, catastro de asentamientos humanos, investigaciones anteriores sobre ecosistemas de la región de Antofagasta, descripción de fauna, flora, vegetación y suelo de la región.

2. Millenium Ecosystem Assesment, (2005). Evaluación Ecosistémica del Milenio: Bienestar Humano y Manejo Sustentable en San Pedro De Atacama - Chile: este proyecto presenta una evaluación de la capacidad de los ecosistemas para seguir proporcionando bienestar humano y vida en la tierra, para facilitar la toma de decisiones tanto para los gobiernos, organizaciones no gubernamentales, grupos indígenas e industria, y para las convenciones internacionales relacionadas con ecosistemas. Se define el concepto de servicios ecosistémicos para entender las relaciones entre la sociedad y los ecosistemas. Estos servicios se definen como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas y se reconocen tanto sistemas tangibles como intangibles. Los servicios ecosistémicos expuestos corresponden a servicios de suministro (agua, alimento y aire), servicios de regulación (clima, regulación del agua y enfermedades), servicios culturales (turismo, desarrollo local, culturales y espirituales), y servicios de producción de materia prima (minerales extraíbles, agricultura y suelo).

   El trabajo presenta un marco conceptual de esta interacción entre servicios ecosistémicos con el bienestar humano a escala de localidad de San Pedro de Atacama. Identifica a los principales usuarios del ecosistema como comunidades, mineras, universidades, empresarios, turismo y entidades públicas. Se establece que los cambios en los factores que afectan indirectamente los ecosistemas, como cambios demográficos, crecimiento económico, aspectos sociopolíticos, desarrollo tecnológico (como uso de fertilizantes), afectan indirectamente los ecosistemas, provocando cambios en los servicios ecosistémicos, con lo cual influyen en el bienestar humano. De este modo, se obtiene un marco conceptual que relaciona la interacción entre servicios ecosistémicos y bienestar humano a través de acciones e intervenciones positivas y negativas.

   Este estudio utiliza como bases de datos estadísticas de población del INE, promulgaciones de leyes indígenas, índices económicos del ex MIDEPLAN, programas de desarrollo indígena, estudios hidrológicos de la cuenca del Salar de Atacama, monitoreo de la calidad de aguas superficiales y subterráneas, datos de Agua Potable Rural, consumo de agua potable y salmuera, registros de turismo obtenidos de SERNATUR, estadísticas del PIB, actividad minera de la zona, formaciones vegetacionales y fauna, uso de suelos, entre otros.

3. CEAZA, (2014). Memoria de Gestión Pro EcoServ San Pedro de Atacama: esta memoria define los servicios ecosistémicos como bienes, beneficios o procesos del ecosistema que generan un beneficio para el ser humano. Los servicios ecosistémicos se clasifican en:

a. Servicios de provisión o suministro: corresponden a bienes que satisfacen necesidades básicas como alimentos, agua, madera, entre otros.

b. Servicios de regulación: consisten en los servicios que mantienen el equilibrio el ecosistema, tales como la regulación del clima, la purificación del agua, el control de la erosión y el control de inundaciones.

c. Servicios culturales: Son los beneficios no materiales asociados a valores, identidad y espiritualidad.

d. Servicios de soporte: representan los procesos internos de los ecosistemas, de los cuales dependen el resto de los servicios ecosistémicos, tales como la formación de suelo y la polinización.

El estudio desarrolla una herramienta de toma de decisiones con enfoque ecosistémico que permite caracterizar y comprender los vínculos entre ecosistemas existentes en San Pedro de Atacama. Esta herramienta de toma de decisiones considera 3 actividades principales de toma de decisiones, las cuales corresponden a:

a. Modelación de la cuenca del Río San Pedro de Atacama. Este sistema requiere como variables de entrada la observación de precipitaciones y caudales, evapotranspiración y almacenamiento del acuífero.

b. Provisión de agua: El abastecimiento de agua requiere de una planificación y uso sustentable de los servicios ecosistémicos.

c. Ecoturismo y recreación: El desarrollo de esta actividad depende del uso sustentable de los servicios ecosistémicos. Para analizar el flujo de turistas es necesario estudiar la variable de número de visitantes, lo cual sirve para determinar el potencial de ecoturismo, capacidad de carga y áreas de impacto visual.

El informe desarrolla una aplicación de estas definiciones y herramientas en la cuenca del Río San Pedro, presentando un marco integral a partir de las evaluaciones, proyecciones futuras y valoraciones de los servicios ecosistémicos, para apoyar la toma de decisiones ciudadana y político-estatal. El estudio clasifica en servicios ecosistémicos al medio biótico, servicios de equilibrio ecológico como clima, beneficios antrópicos de estos servicios y procesos internos de los ecosistemas. El proyecto requirió de distintos servicios públicos y se aplicó en la comuna de San Pedro de Atacama. Este trabajo presenta un análisis multiespacial ecoturístico de San Pedro de Atacama y los resultados se dispusieron en la plataforma Tableau. Este modelo ecosistémico permite evaluar escenarios de aumento de turismo y actividad minera.

El estudio emplea como bases de datos registros hidrometeorológicos de la DGA, distribución de asentamientos humanos, datos de turismo, encuestas y talleres

participativos en la zona.

4. Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, (2017a). Estudio de un Modelo Conceptual Ecológico para la Cuenca del Salar de Atacama. Informe 1: Análisis Crítico de Antecedentes Ambientales Registrados Para la Cuenca del Salar de Atacama. Este estudio consiste en compilar y presentar las bases para elaborar un modelo conceptual ecológico en la cuenca del Salar de Atacama. El documento presenta el análisis crítico de los antecedentes ambientales registrados para la cuenca del Salar de Atacama, con el fin de implementar un modelo ecológico conceptual. Respecto a los antecedentes, éstos se clasifican en:

    a. Antecedentes referentes a recursos hídricos: se revisan estudios hidrológicos, hidrogeológicos, hidroquímicos e hidrogeoquímicos enfocados principalmente a los sistemas lacustres. A partir de ello, se recopilan antecedentes que expliquen cómo se relacionan los recursos hídricos con dichos ecosistemas. Las principales variables identificadas en este contexto corresponden a: nivel freático, caudales superficiales, altura de escurrimiento, niveles hidrométricos, hidroquímica, evaporación, precipitaciones, viento y temperatura del aire.

    b. Sitios con protección ambiental en la cuenca del Salar de Atacama: Estos corresponden a: la Reserva Nacional Los Flamencos, el sitio RAMSAR de Soncor y el Valle de la Luna. Se identifican las especies de flora y fauna, principalmente aves como flamencos (*Phoenicoparrus jamesi, Phoenicopterus andinus y Phoenicopterus chilensis*), mamíferos como el zorro gris (*Pseudalopex griseus*) y lagartos (*Liolaemus*) presentes en la reserva natural Los Flamencos y en el sitio RAMSAR de Soncor. Se identifican las lagunas presentes en este sitio y se explica su funcionamiento, destacando su profundidad y dinamismo. Respecto al Valle de la Luna, se describe su geomorfología, se identifica la flora como Brea (*Pluchea absinthioides*), Cachiyuyos (*Atriplex atacamensis*) y fauna, como el zorro culpeo (*Pseudalopex culpaeus*), Ratón orejudo (*Phyllotys darwini*), Mero de la puna (*Agriornis albicauda),* que habitan esta zona.

    c. Macrozonificación Ecosistémica de la Cuenca del salar de Atacama: Se caracteriza preliminarmente los microambientes presentes en la cuenca del Salar de Atacama. Este estudio utiliza como fuentes de información las coberturas de suelo del "Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014" (AMAKÁIK (2017a)), mapas geológicos, coberturas de flora e inventarios de fauna del herbario nacional, Proyecto Biota y líneas base (AMAKÁIK (2017a)).

    El resultado consiste en una base de datos con 530 estudios relacionados a ecología de la cuenca del Salar de Atacama. Esta etapa del modelo conceptual utiliza otros estudios de modelación conceptual ecológica, las delimitaciones de sitios de protección ambiental entregados por CONAF y el mapa de Cobertura de Suelos de Chile para definir la macrozonificación de los ecosistemas presentes en la cuenca

del Salar de Atacama.

5. Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK (2017b). Estudio de un Modelo Conceptual Ecológico Para la Cuenca del Salar de Atacama. Informe 2: definición, selección y justificación de componentes principales y/o variables influyentes a considerar en la formulación del Modelo Conceptual Ecológico de la Cuenca del Salar de Atacama. En este estudio se identifican los componentes, variables, procesos e interacciones entre los ecosistemas de la cuenca del Salar de Atacama para implementar el modelo conceptual ecológico en dicha cuenca. Se realizaron talleres con expertos con el fin de determinar y justificar los componentes bióticos y abióticos necesarios para elaborar el modelo conceptual ecológico, definiendo sus variables de estado, las cuales se clasifican en:

   Componente biótica: Se definen los componentes y subcomponentes bióticos a considerar en el desarrollo del modelo ecológico conceptual de la cuenca del Salar de Atacama.

   a. Flora y vegetación: los subcomponentes corresponden a flora zonal, flora azonal, vegetación zonal y vegetación azonal.
   b. Fauna terrestre: sus subcomponentes corresponden a avifauna, anfibios, reptiles y macro y micro mamíferos.
   c. Ecosistemas acuáticos: los subcomponentes consisten en zooplancton, ictiofauna, zoobentos, fitoplancton, fitobentos, hidrofitos acuáticos, tapetes microbianos, microalgas y peces.
   d. Componente antrópico: se compone por asentamientos humanos.

   e. Elementos químicos orgánicos: fenoles, hidrocarburos clorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos o plaguicidas.

   Componente abiótica: se identifican los principales subcomponentes abióticos a considerar en el modelo ecológico conceptual tomando como referencia la literatura presentada en AMAKÁIK (2017a).

   a. Elementos químicos inorgánicos: oxígeno disuelto, compuestos carbonatados (carbonatos, bicarbonatos), compuestos nitrogenados (nitritos, nitratos, nitrógeno total, nitrógeno Kjendhal), macro elementos (sodio, magnesio, calcio, potasio), aniones: (cloruros, fluoruro, sulfuro, sulfatos) y metales pesados.

   b. Componentes biológicos y microbiológicos: bacterias, coliformes fecales.

   c. Recurso hídrico: hidrología (temperatura, precipitaciones, niveles de agua, sedimentos), hidrogeología, calidad de agua superficial (pH, alcalinidad, dureza, conductividad eléctrica, color o turbidez), calidad de agua subterránea e hidráulica (velocidad de la corriente y caudal).

   Luego, el estudio muestra relaciones e interacciones entre estas forzantes y variables

de estado e interacciones de tramas tróficas determinadas por Marquet et al. (1998) (Figura I-56) y se elabora un mapa de retroalimentación que puedan presentar estas variables entre sí (Figura I-57).

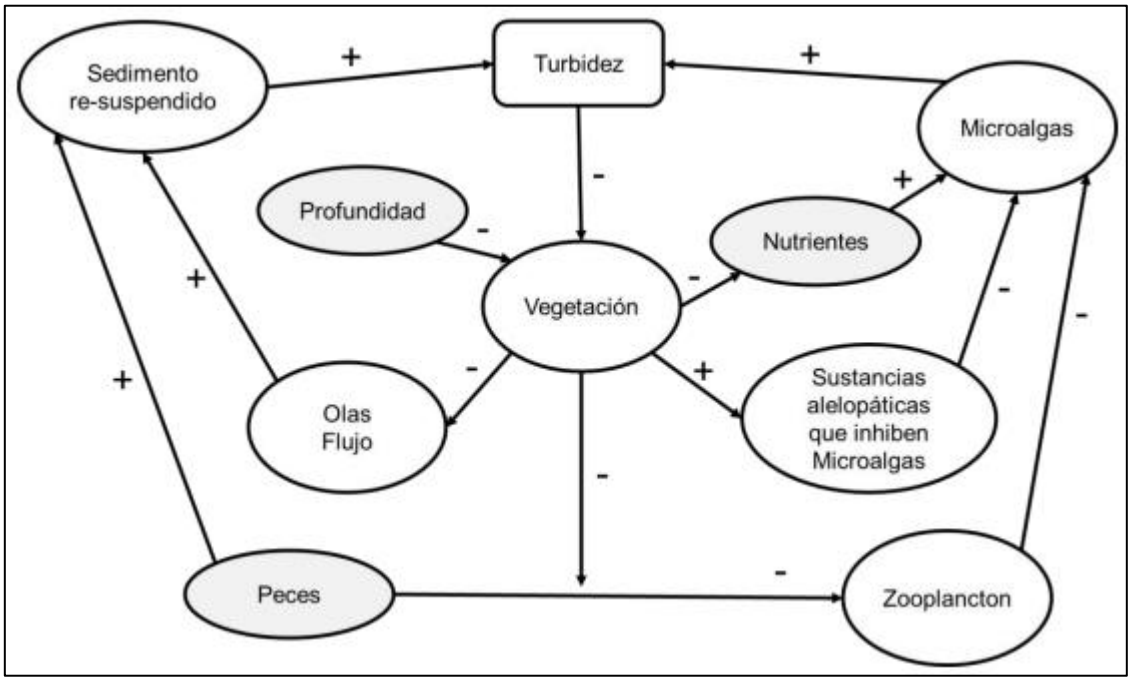


Figura I-57 Retroalimentaciones positivas y negativas que pueden causar dos variables de estado dominantes entre sí, en el marco del modelo conceptual ecológico
Fuente: Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, (2017b)

Finalmente, toda esta información se sintetiza en forma de matrices, las cuales agrupan las siguientes 3 categorías principales y cuyo resultado se muestran de la Tabla I-33 a la *Tabla I-38*:

a. Variables de estado: son las componentes o variables que nos interesan estudiar, las cuales sufren cambios en relación a forzantes y variables controladoras.
b. Variables o funciones forzantes: consisten en factores externos importantes que regulan el sistema y que impactan en las variables de estado, pueden ser de gran escala como cambios en el clima o a escala local, como acciones antrópicas.
c. Variable controladora: son las que evalúan los cambios en las variables forzantes y de estado, como, por ejemplo, el análisis de variables hidrológicas y climáticas.

Tabla I-33 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente de Hidrología.

Componente Recurso hídrico	Variable de estado	Variables forzantes	Variables controladoras
Hidrología	Precipitación	Factor climático	Energía solar
			Efecto invernadero
	Evaporación		Circulación atmosférica
			Circulación oceánica
Hidrogeología	Nivel piezométrico	Precipitación	Factor climático
	Permeabilidad		
	Transmisividad	Evaporación	
	Almacenamiento específico		
Calidad del agua superficial		Precipitación	Clima
		Evaporación	Invierno altiplánico
		Nivel piezométrico	Oscilación modal (ENSO)
		Pendiente	
		Tipo de sustrato	
		Altitud geográfica	
		Temperatura del agua	
		Caudal	
		Velocidad de la corriente	
		Profundidad del curso o la laguna	
		Concentración de nutrientes	
		(Compuestos nitrogenados y fosfatados)	
		Concentración de macroelementos (Ca, Mg, K, Na, otros)	
		Concentración de metales	
		Concentración de oxígeno disuelto	
		Conductividad/salinidad	
Calidad del agua subterránea	pH	Precipitación	Precipitación
	Eh	Evaporación	Evaporación
	Conductividad	Nivel piezométrico	
	Calcio	Permeabilidad	
	Magnesio	Transmisividad	
	Sodio	Almacenamiento específico	
	Potasio	Temperatura del agua	
	Carbonato	Geoquímica	

	Bicarbonato		
	Cloruro		
	Sulfato		
	Nitrato		
	Temperatura		
	Elementos minoritarios		
	Elementos traza		

Fuente: Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, (2017b)

Tabla I-34 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente de Flora y vegetación.

Componente Flora y vegetación	Variable de estado	Variables forzantes	Variables controladoras
Flora zonal	Presencia	Clima	Clima
Flora azonal	Abundancia	Precipitación	Invierno altiplánico
Vegetación zonal	Densidad	Temperatura	Oscilación modal (ENSO)
Vegetación azonal	Biomasa	Interacciones:	
	Riqueza de especies	Intra e interespecíficas	
	Diversidad		
	Consumo de energía		

Fuente: Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, (2017b)

Tabla I-35 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente de Fauna terrestre.

Componente Fauna terrestre	Variable de estado	Variables forzantes
Avifauna	Presencia	Clima
Anfibios	Abundancia	Precipitación
Reptiles	Densidad	Temperatura
Macro mamíferos	Biomasa	Interacciones:
Micro mamíferos	Riqueza de especies	Intra e interespecíficas
Artrópodos terrestres	Diversidad	
	Consumo de energía	

Fuente: Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK (2017b)

Tabla I-36 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente de Ecosistemas acuáticos.

Componente Ecosistemas acuáticos	Variable de estado	Variables forzantes	Variables controladoras
Zooplancton	Presencia	Calidad del agua:	Clima
Ictiofauna	Abundancia	Concentración de nutrientes	Invierno altiplánico
Zoobentos	Densidad	(Compuestos nitrogenados y fosfatados)	Oscilación modal (ENSO)
Fitoplancton	Biomasa	Concentración de marco elementos (Ca, Mg, K, Na, entre otros)	
Fitobentos	Riqueza de especies	Concentración de metales (Se, Li, etc.)	
Hidrofitos acuáticos	Diversidad	Concentración de oxígeno disuelto	
Tapetes microbianos	Consumo de energía	Temperatura del agua	
		Conductividad/salinidad	
		Hidrología:	
		Caudal	
		Velocidad de la corriente	
		Profundidad del curso o la laguna	
		Recursos hídricos:	
		Precipitación	
		Evaporación	
		Nivel piezométrico	
		Pendiente	
		Tipo de sustrato	
		Altitud geográfica	
		Relaciones tróficas (predación y pastoreo)	
		Interacciones:	
		Competencia	
		Comensalismo	
		Mutualismo	
		Parasitismo	

Fuente: Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK (2017b)

Tabla I-37 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes de la componente Antrópica.

Componente Antrópico	Variable de estado	Variables forzantes
Asentamiento humano	Actividad agro pastoril	Distancia al salar
	Actividad de extracción	Ganado doméstico
		Mascotas
		Densidad
Asentamiento industrial	Actividad de extracción	

Fuente: Comité de Minería No MetálicaAMAKÁIK (2017b)

Tabla I-38 Variables de estado, forzantes y controladoras para subcomponentes del componente Abiótico.

Componente abiótico	Variable de estado	Variables forzantes	Variables controladoras
Geoquímica	Mineralogía	Mineralogía	Presión de formación
		Factor climático	Temperatura de formación
			Precipitación

Fuente: Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK (2017b)

El estudio utilizó como base de datos estudios anteriores de modelos ecológicos del Salar de Atacama presentados en la revisión bibliográfica del informe anterior del modelo ecológico, inventario de especies, resultados de talleres con expertos, inventario de humedales del MMA y CIREN, descripción de clima de la zona, estudios hidrológicos del Salar de Atacama como el de Cade-Idepe Consultores en Ingeniería (2014), entre otros estudios.

6. Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, (2018a). Informe 3: Modelo Conceptual Ecológico (MCE) de la Cuenca del Salar de Atacama: Este informe corresponde al tercer hito del desarrollo del proyecto CORFO Estudio de un Modelo Conceptual Ecológico Para la Cuenca del Salar de Atacama. En dicha etapa se formula un modelo ecológico conceptual del Salar de Atacama, y se representa de manera formal y gráfica el Modelo Conceptual Ecológico, contemplando los componentes, subcomponentes, interacciones y procesos, al igual que los distintos tipos de variables que deben ser consideradas para realizar la modelación ecológica de la cuenca del Salar de Atacama. Se identifican y caracterizan los subsistemas ecológicos presentes en la cuenca del Salar de Atacama. En el caso de los subsistemas acuáticos, a diferencia de la flora y vegetación, se utilizaron diferentes estadísticos no paramétricos que permitieron hacer comparaciones entre los subsistemas de manera espacial y temporal, debido a que se cuenta con una mayor cantidad de datos cuantitativos. El MCE establece una conectividad entre

los distintos subsistemas presentes y entre los componentes bióticos y abióticos.

Los subsistemas ecológicos identificados y caracterizados en el MCE corresponden a la flora y vegetación y al subsistema acuático. Los subsistemas ecológicos de flora y vegetaciones se dividen en flora y vegetación zonal (subsistemas de matorrales) y azonal (vegas, bofedales y subsistemas riparianos no salinos), los cuales se encuentran detallados en el informe del MCE. La caracterización de los subsistemas acuáticos se realizó en base a la información pública de muestreo tanto de organismos públicos como entidades privadas.

De acuerdo a los antecedentes recopilados en los informes anteriores del MCE, se seleccionaron, definieron y justificaron cuáles eran los componentes bióticos y abióticos de relevancia a considerar para la formulación del modelo conceptual. Los componentes bióticos incluyen los organismos animales y vegetales que estructuran el ecosistema. Por su parte, los componentes abióticos incluyen tanto las variables hidrológicas e hidrogeológicas forzantes, como las variables fisicoquímicas presentes en el ecosistema.

Una vez definidas estas componentes, se procede a representar el MCE de manera gráfica, lo que requirió elaborar matrices de adyacencia para identificar relaciones entre componentes, es decir, matrices que contienen valores binarios, los cuales representan si existe efecto de un componente sobre otro (valor 1), o no existe (valor 0). Asimismo, se pudo representar una matriz de interacciones intra e interespecíficas, hábitats y factores físicos y químicos que pudieran estar influyendo entre subcomponentes y componentes biológicos de los sistemas terrestres y acuáticos considerados en el estudio, los cuales se encuentran descritos y caracterizados.

Una vez determinada la forma gráfica del MCE, se identificaron los procesos ecológicos presentes en el Salar de Atacama, de manera de representar el MCE tanto temporal como espacialmente. Los procesos ecológicos comprenden tanto la contribución de los ecosistemas al bienestar humano (servicios ecosistémicos) como las funciones ecológicas de los ecosistemas que proveen estos servicios. Se determinan las escalas temporales y espaciales de comunidades de mamíferos de la cuenca, tales como flamencos y otros. Se estimaron valores asociados a las migraciones de las especies de flamencos que habitan la cuenca. Las escalas espaciales y temporales de los componentes bióticos y abióticos se representaron en diagramas de Stommel como el de la *Figura I-58*.

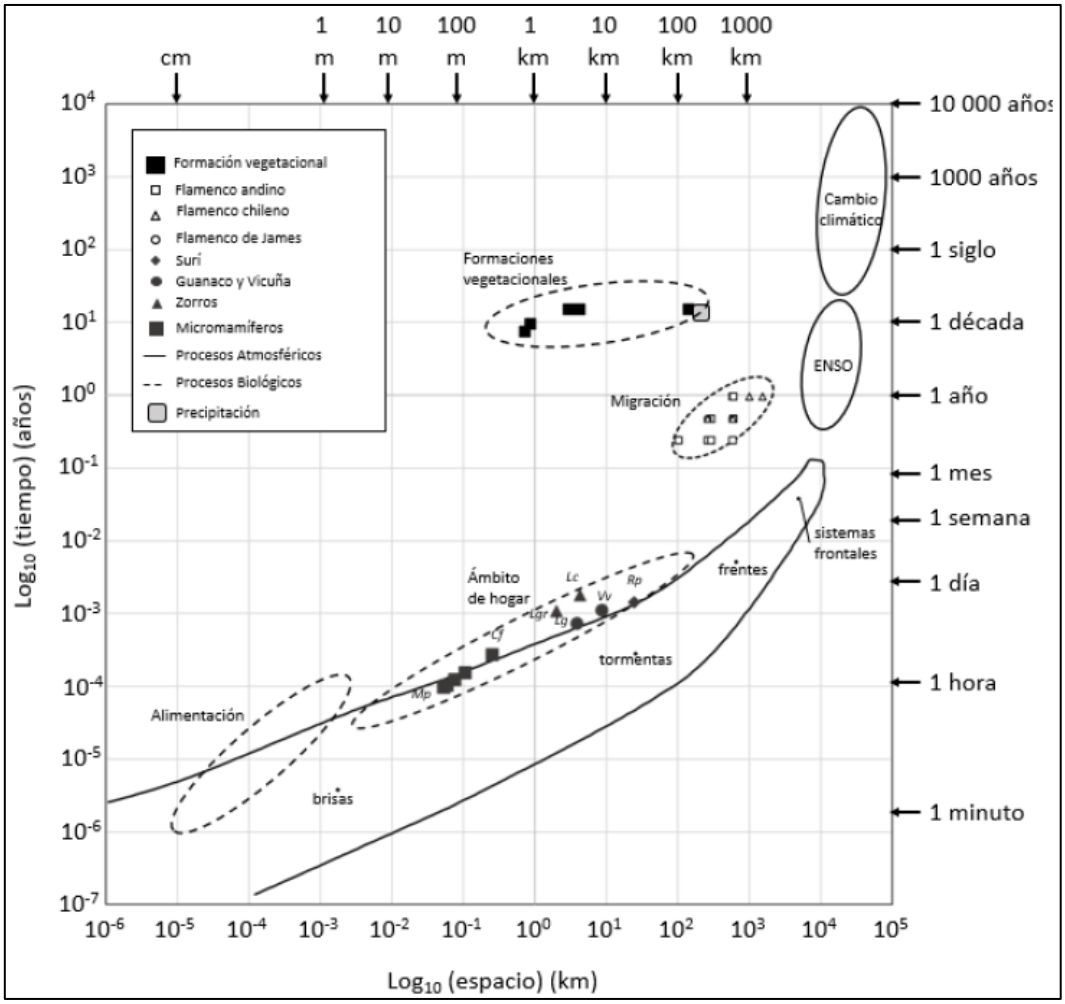


Figura I-58 Diagrama de Stommel que resume las escalas de tiempo y espacio de los procesos del Salar de Atacama y su relación con algunos de los procesos presentes en el salar.

Fuente: Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK (2018a)

El informe presenta en detalle la caracterización de las coberturas espaciales y temporales de los subsistemas ecológicos de análisis tales como vegetación zonal, azonal, vegas y bofedales sobre los cuales se realiza un análisis de sensibilidad de las amenazas que afectan estos sistemas mediante matrices de interacción, que ordenan estos factores mediante índices de severidad entre 1 (bajo)a 4 (muy alto). También se caracteriza temporal y espacialmente los subsistemas acuáticos mencionados anteriormente. En particular se establece una clasificación de la salinidad de los cuerpos de agua presentes en la cuenca y se analiza el funcionamiento de las aguas superficiales y subterráneas, incluyendo los sistemas lagunares y los subsistemas acuáticos que los habitan, en base a la información pública disponible de monitoreo de la cuenca del Salar de Atacama. Se concluye que la hidroquímica de las aguas es importante para explicar el comportamiento de los subsistemas existentes en los cuerpos de agua.

Los resultados del MCE también incluyen un catastro cuantitativo de la población de zooplancton de cada sistema lagunar y se presenta un diagrama de interacciones tróficas en cuerpos de agua (*Figura I-59*).

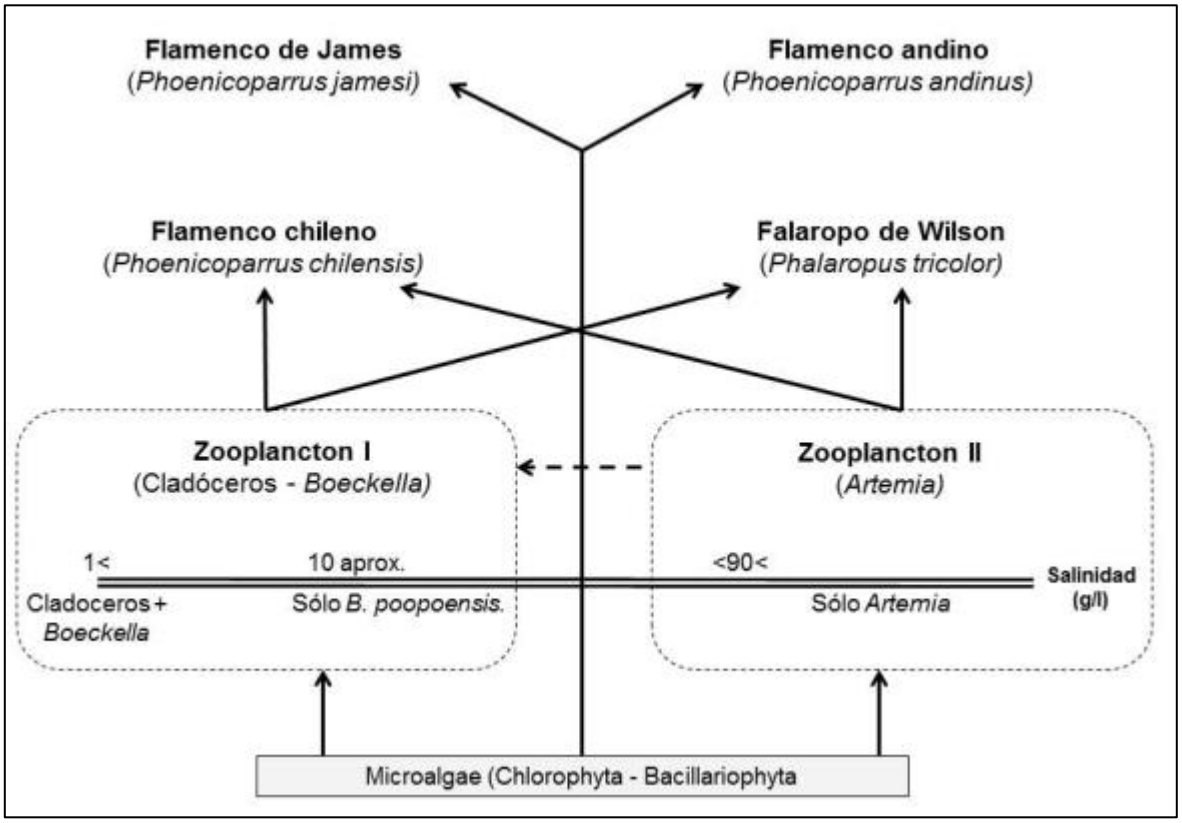


Figura I-59 Diagrama de interacciones tróficas en cuerpos de agua sin peces del Norte de Chile.

Fuente: Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK (2018a)

Finalmente, se muestran las salidas gráficas del MEC de la cuenca del Salar de Atacama (Figura I-60), las cuales fueron elaboradas por expertos en talleres de trabajo de modelación participativa, a partir de los antecedentes descritos y del análisis desarrollado durante el estudio. Un aspecto clave es el hecho que las variables de calidad de agua son las que median la distribución y abundancia de las especies de flora y fauna de ecosistemas acuáticos. Cabe mencionar que los resultados del MEC permiten identificar con claridad los subsistemas y sus interacciones.

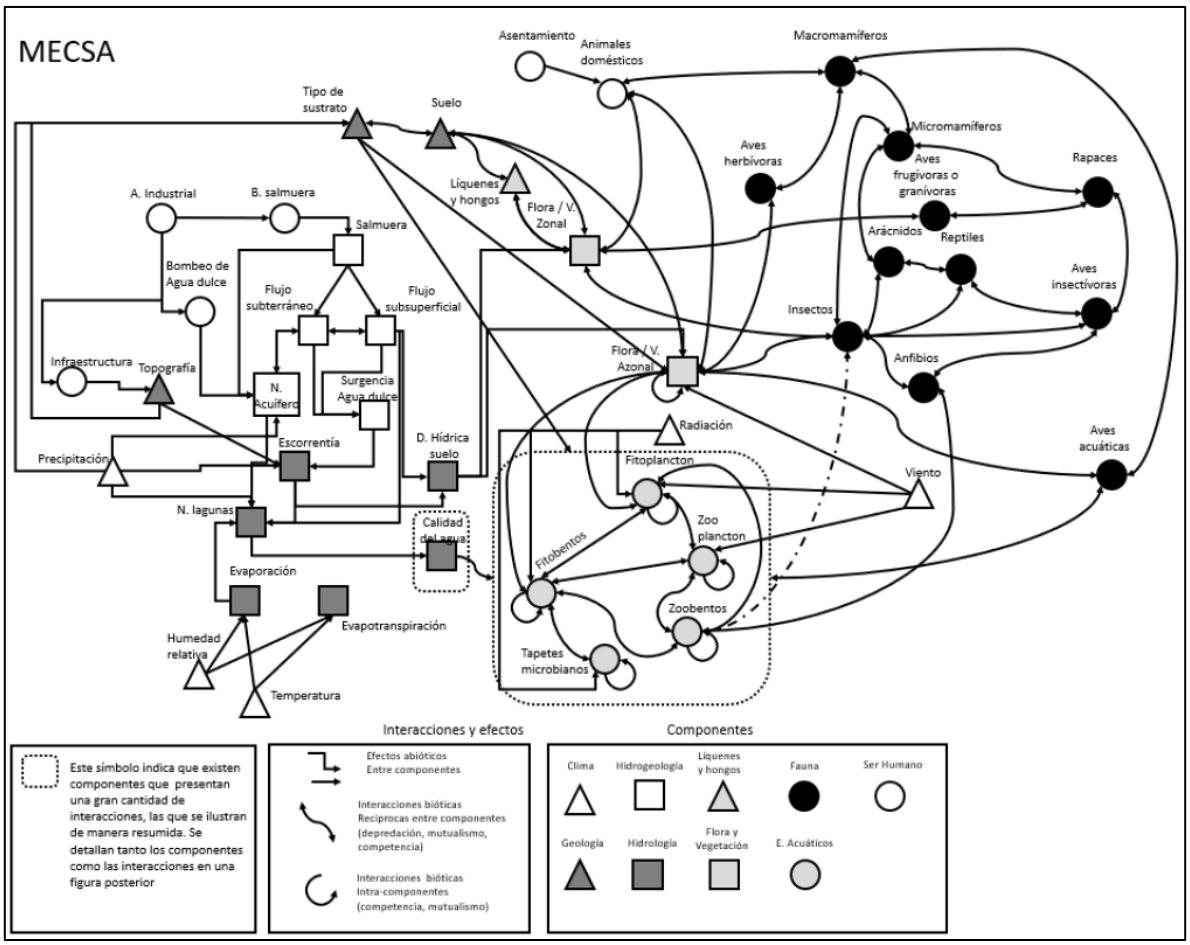


Figura I-60 Salida gráfica del Modelo Ecológico Conceptual de la Cuenca del Salar de Atacama (MECSA).

Fuente: Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK (2018a)

7. Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, (2018b). Informe 4: Principales aspectos de informes 1, 2 y 3 e identificación de brechas para modelación en una futura etapa y propuesta. Este último informe del proyecto desarrollado por el Comité de Minería No Metálica de CORFO, denominado Estudio de un Modelo Conceptual Ecológico para la Cuenca del Salar de Atacama presenta en forma consolidada los principales aspectos referentes a la recopilación de antecedentes, análisis, desarrollo y resultados de los 3 informes del MCE de la cuenca del Salar de Atacama. Posteriormente se presenta una recomendación de programas y plataformas de modelamiento estadístico-matemática, comerciales y de libre distribución, que pueden ser utilizadas para la implementación de un modelo numérico ecológico, ya que se cuenta con el modelo conceptual desarrollado. Se destaca el uso de los lenguajes Stata y R, los cuales son independientes de la plataforma en que se implementen, cuentan con herramientas estadísticas, y el último en particular cuenta con paquetes capaces de construir análisis de redes ecológicas. La ventaja de R con respecto a Stata es que es un lenguaje de programación de distribución libre, y no requiere pago de licencia como Stata. La lista completa de programas sugeridos en este último informe se presenta en la tabla *Tabla I-39*.

Tabla I-39 Lista de programas más utilizados en el ámbito de la estadística y modelación estadístico-matemática.

Software	Empresa	Web Site	Técnicas/ Métodos*	Área aplicación estudio	Costo (CLP)	Vigencia
B-VegAna	Universidad de Barcelona, España	http://biodiver.bio.ub.es/veganaweb/	1) Métodos Multivariantes	Modelamiento	FREE	Perpetua
Matlab	MathWorks	https://la.mathworks.com/	1) Análisis de Datos 2) Algoritmos 3) modelos Matemáticos	Modelamiento	$1.430.000	Perpetua
Orange	University of Ljubljana, Eslovenia	https://orange.biolab.si/	1) Data Mining 2) Redes Neuronales	Modelamiento	FREE	Perpetua
R	CRAN	www.r-project.org	1) Análisis de Datos 2) Ecuaciones Estructurales (SEM) 3) Series de Tiempo 4) Muestreo Estadístico 5) Métodos Multivariantes 6) Data Mining 7) Geoestadística Espacial	Muestreo Estadístico Análisis Estadístico Modelamiento	FREE	Perpetua
SPM 8.2	Salford Systems	www.salford-systems.com	1) Data Mining 2) Random Forest 3) MARS 4) CART 5) TreeNet	Modelamiento	$12.160.000	Perpetua

SPSS	IBM	https://www.ibm.com	1) Análisis de Datos 2) Geoestadística Espacial 3) Data Mining	Muestreo Estadístico Análisis Estadístico Modelamiento	$1.500.000	Anual
Stata	Software Shop	www.Software-Shop.com	1) Análisis de Datos 2) Ecuaciones Estructurales (SEM) 3) Series de Tiempo 4) Muestreo Estadístico 5) Métodos Multivariantes	Muestreo Estadístico Análisis Estadístico Modelamiento	$2.492.000	Perpetua
Stella	Isee Systems	https://www.iseesystems.com	1) Modelación de Sistemas 2) Algoritmos 3) Modelos Matemáticos	Modelamiento	$1.824.000	Perpetua
Weka	University of Waikato, Nueva Zelanda	https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka	1) Data Mining 2) Machine Learning	Modelamiento	FREE	Perpetua

Fuente: Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, (2018b).

El informe consolida las bases necesarias para implementar un modelo numérico ecológico de la cuenca del Salar de Atacama, comenzando con la recopilación de antecedentes, muestreo y campañas de terreno que se deben considerar, para luego establecer el modelamiento y el análisis que debe seguir el modelo numérico. Otro aspecto relevante de este estudio es el hecho que menciona las brechas de información identificadas durante la formulación del MCE. Estas dificultades se encuentran en la información del componente de recursos hídricos, flora y vegetación, fauna terrestre, ecosistemas acuáticos, para desarrollar el modelo. Por último, se identifican las brechas asociadas a un proyecto de modelación ecológica matemática en cuanto a la comprensión de los procesos hidrogeológico que gobiernan la dinámica de la cuenca del Salar de Atacama. Para subsanar esto se propuso considerar un diseño metodológico particular para entender el sistema de la cuenca, además de la realización de campañas de terreno durante 2 y 4 años, con el fin de recudir las brechas de información.

8. Minera Escondida Ltda.-Centro de Ecología Aplicada, (2017). Modelo biofísico para la evaluación de la respuesta vegetacional como función de la disponibilidad hídrica en sector sur del Salar de Atacama – Sector Tilopozo: este estudio para EIA incluye el desarrollo de un modelo ecológico implementado en el código Cropsyst (Stöckle et al. (2003)), el cual corresponde a un modelo de simulación biofísico, capaz de representar procesos ecológicos modulares a escala temporal diaria. El dominio del modelo corresponde al sector de las vegas y lagunas de Tilopozo como se muestra en la Figura I-61.

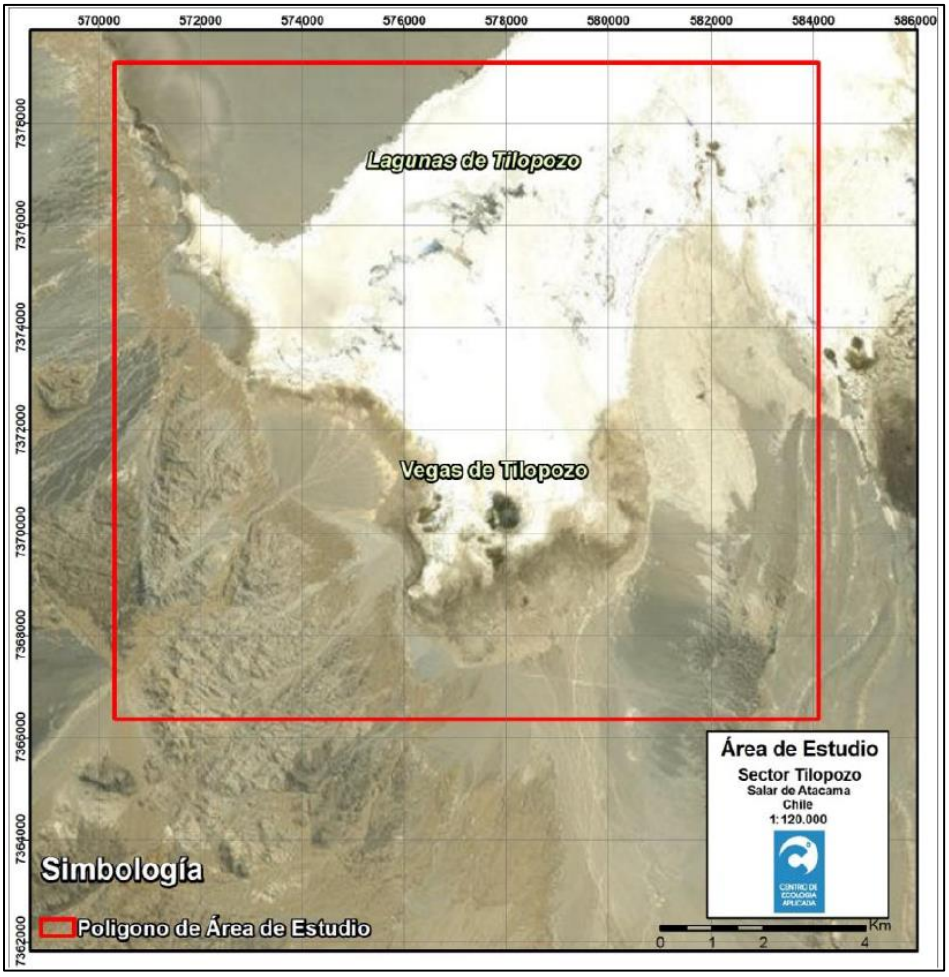


Figura I-61: Ubicación del área de estudio para realizar la modelación en el sector de Tilopozo.

Fuente: Minera Escondida Ltda.- Centro de Ecología Aplicada, (2017).

Las variables de estado que representa el modelo corresponden a las especies vegetales del sector de Tilopozo, las cuales son *Distichlis spicata, Lycium humile, Nitrophile atacamesnsis, Festuca deserticol, Puccinellia frigida, Triglochin palustris, Scirpus olneyi, Scirpus sp., Sarcocornia fruticosa, Juncus Balticus, Baccharis juncea, y Phragmites australis.*

Las forzantes que alteran estas variables de estado corresponden a variables climáticas, hidrológicas y agronómicas tales como: precipitación, temperatura, radiación solar incidente, humedad relativa y velocidad de viento y profundidad del nivel freático, topografía, humedad de suelo y cobertura de suelo. La Figura I-62 presenta un esquema de flujo conceptual del funcionamiento de la herramienta.

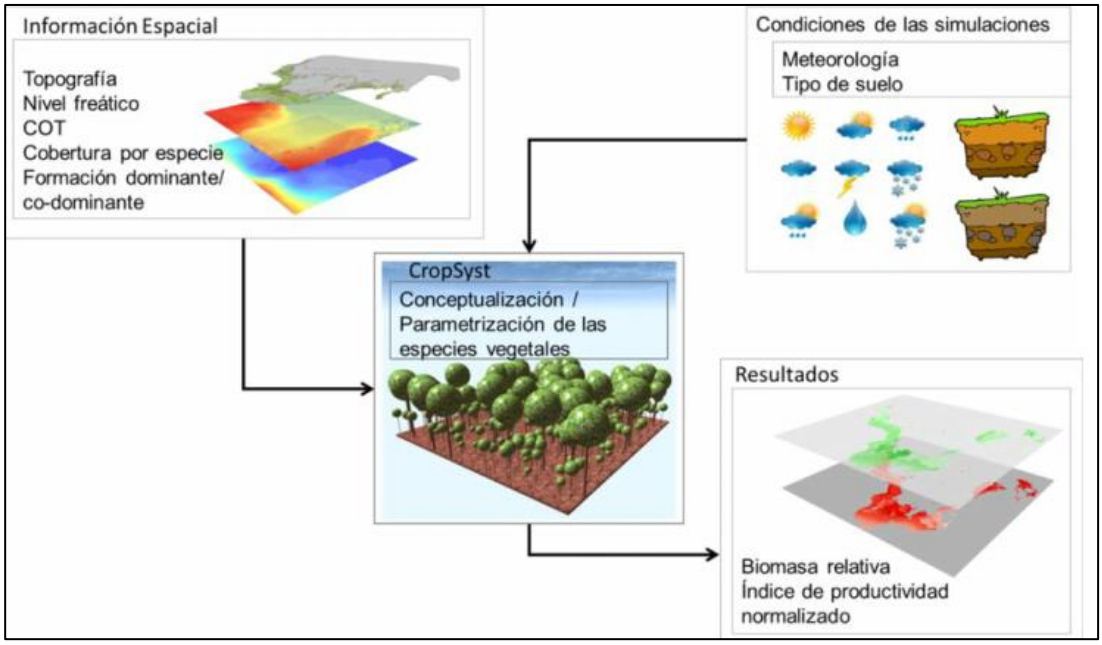


Figura I-62: Esquema del flujo del proceso para obtener los resultados espaciales
Fuente: Minera Escondida Ltda.-Centro de Ecología Aplicada, (2017)

El modelo ecológico reproduce el crecimiento de las especies más relevantes que componen la vegetación azonal del sector sur del Salar de Atacama y su aplicación bajo diferentes combinaciones de tipos de suelos y de disponibilidad hídrica. El modelo entrega resultados crecimiento de la biomasa, transpiración y la asimilación de carbono de la vegetación y biomasa relativa a la biomasa potencial. Además, se presentan escenarios de simulación de línea base y situación futura, con variaciones en los niveles freáticos con respecto a la situación actual, con lo que se obtienen nuevos índices de biomasa relativa producto de estos escenarios.

El desarrollo del modelo de crecimiento de la vegetación requirió una base de datos utilizada para este modelo comprende antecedentes de características físicas e hídricas del suelo, los niveles freáticos, clima local, nivel freático medio histórico, con topografía de detalle del terreno, carta de ocupación de tierra (COT), nivel freático, topografía, entre otros antecedentes de EIA.

9. CMZ-Agro Energía, (2018). Anexo 4.4 EIA Continuidad operacional Compañía Minera Zaldívar. Modelo Ecosistémico: Este estudio presenta un modelo ecológico, el cual sigue la metodología de definición de sistema de González (2011): el dominio espacial del modelo comprende las vegas y bofedales del sector de Tilopozo, en el extremo sur de la cuenca Salar de Atacama, cuya localización se muestra en la Figura I-63.

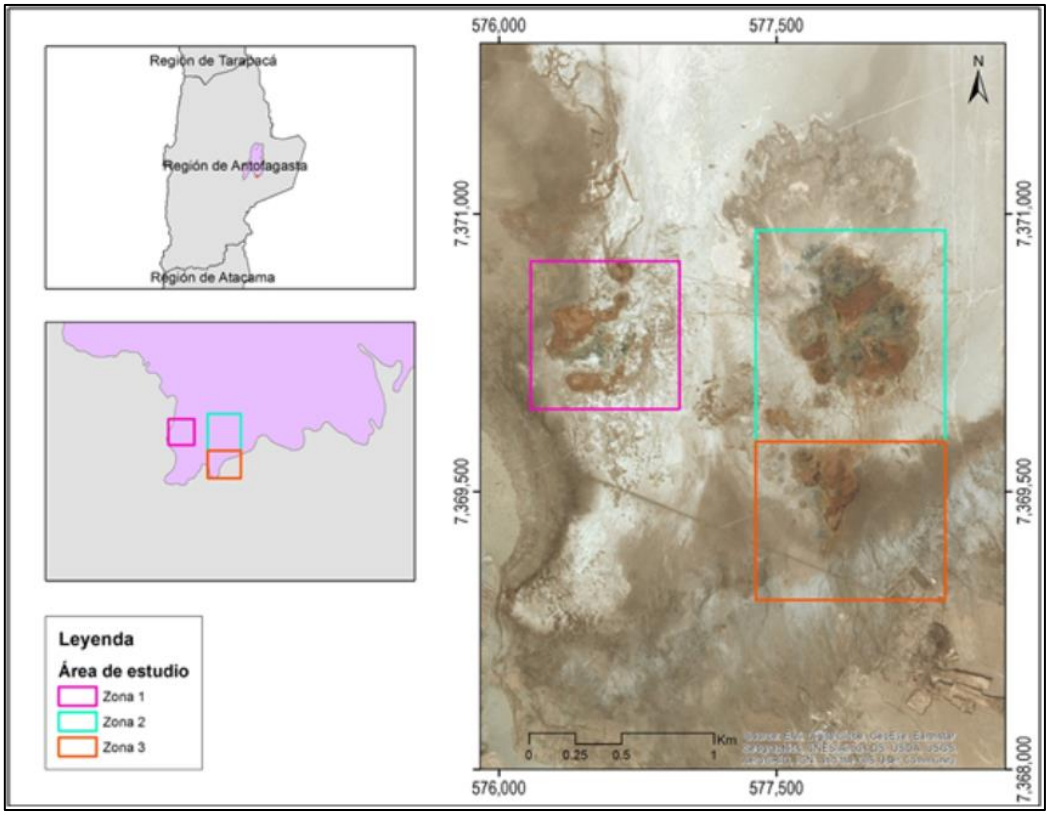


Figura I-63: Esquema del flujo del proceso para obtener los resultados del modelo biofísico y representarlos espacialmente.
Fuente: CMZ-Agro Energía, (2018).

Este modelo conceptualiza el sector de Tilopozo en 4 subsistemas, los cuales corresponden a:

a. Pozos de extracción y monitoreo: La extracción de agua subterránea que se realiza desde estos pozos en el acuífero MNT ha generado efectos en los niveles freáticos, por lo que este sistema representa un pilar fundamental del modelo ecológico.
b. Vegetación zonal y azonal: Se analiza el comportamiento de la vegetación en base a dos parámetros, área cubierta de vegetación y las capacidades adaptativas de las especies que se encuentran en la zona. Algunas especies de estas variables analizadas corresponden a *Juncus balticus*, y *Schoenoplectus americanus*, entre otras.
c. Suelo: Este sistema y sus características resultan fundamentales para comprender el movimiento de las aguas en el suelo, y como éstas ante un evento de precipitación. Los parámetros analizados de este sistema corresponden a la salinidad, el nivel freático y la zona vadosa (no saturada).
d. Clima: Consiste en el principal sistema que determina la recarga y descarga del acuífero. Las variables analizadas de dicho sistema corresponden a precipitaciones, evapotranspiración, evaporación y temperatura.

Este modelo relaciona los efectos de estos distintos sistemas medibles mediante regresiones múltiples respecto a datos históricos promedio de evapotranspiración y niveles freáticos a escala temporal anual. De esta forma, el modelo ecológico predice la cobertura vegetal en Tilopozo en el tiempo frente a cambios de la precipitación media anual, evapotranspiración media anual, profundidad del nivel freático del sector en estudio.

El estudio utiliza una base de datos de imágenes satelitales de la cobertura vegetal en superficie, las cuales permiten individualizar las zonas de vegetación de vegas bofedales. Además, requiere de registros de nivel freático, precipitación, temperatura y evapotranspiración.

I.5.5 Descripción de trabajos previos en modelación integrada

En esta sección se describen los antecedentes recopilados con respecto a la existencia de modelación integrada en la cuenca del Salar de Atacama. De acuerdo a las referencias expuestas en los capítulos anteriores, existen antecedentes referentes tanto a la modelación hidrológica conceptual y numérica, modelación hidrogeológica conceptual y numérica y modelación ecológica. Existen antecedentes de trabajos sobre planes estratégicos integrados de modelación. Entre los antecedentes expuestos en la base de datos destacan los siguientes:

1. Dirección General de Aguas (DGA)-Arrau Ingeniería EIRL, (2012). Diagnóstico plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, Región de Antofagasta, Informe Final, S.I.T. N° 291, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, visión de Estudios y Planificación: este trabajo presenta un diagnóstico para la gestión integrada de recursos hídricos de la región de Antofagasta. Presenta tanto el diagnóstico de recursos hídricos, la gestión ambiental estratégica y participación ciudadana.

2. Dirección General de Aguas (DGA)-Arcadis, (2016). Diagnóstico Plan Estratégico Para La Gestión De Los Recursos Hídricos, Región De Antofagasta Informe Final, S.I.T. N° 379, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, visión de Estudios y Planificación: este estudio presenta un diagnóstico de plan integrado para la gestión de los recursos hídricos, donde se exponen antecedentes referentes a la disponibilidad hídrica superficial, subterránea, herramientas de gestión hídrica, evaluación ambiental estratégica, además de actividades de desarrollo mineras y culturales.

3. DGA-DICTUC-SEI, (2019). Desarrollo de Herramienta para el Análisis de Gestión en el Marco del Plan Nacional de Recursos Hídricos: este estudio se efectúa en el marco del desarrollo de una herramienta para el análisis integrado de planes de gestión hídrica de cuencas en el marco del plan nacional de recursos hídricos, aplicado en las cuencas de Limarí, Ligua, Petorca, Choapa y Copiapó. El trabajo considera la elaboración de un modelo de gestión hídrica integrado de hidrología superficial y subterránea, mediante las plataformas WEAP y MODFLOW. El modelo WEAP permite

desarrollar un enfoque de planificación integrada de recursos hídricos, incorporando todos los actores y procesos a nivel de cuenca. En este estudio se implementa el vínculo WEAP-MODFLOW para acoplar la modelación hidrológica, agronómica y humana a escala de cuenca con el medio subterráneo, obteniendo un modelo completamente integrado. Este estudio establece un precedente para este trabajo, para el cual se desarrollará un modelo integrado de gestión hídrica superficial, subterráneo siguiendo la misma metodología en cuanto a herramientas. Las conclusiones del estudio de la DGA establecen consideraciones básicas y recomendaciones para tener en cuenta en futuros estudios de gestión integrada de recursos hídricos como el presente estudio.

4. DGA-PUC, (2019). Migración De Modelos Hidrogeológicos Desarrollados En Visual-MODFLOW y Groundwater Vistas Hacia Su Estado Nativo de Código MODFLOW: este informe establece la metodología para migrar los modelos numéricos hidrogeológicos a formato nativo del USGS para ser integrados con los modelos de gestión hídrica superficiales de las cuencas en estudio del plan integrado de gestión hídrica de la DGA.

I.5.6 Modelación hidrológica e hidrogeológica integrada

La metodología utilizada hasta la fecha en los distintos trabajos expuestos anteriormente para la cuenca del Salar de Atacama para desarrollar modelos hidrológicos e hidrogeológicos ha consistido en simular los procesos hidrológicos superficiales por separado, para posteriormente ser vinculados a un modelo de simulación hidrogeológico o ecológico. La integración con los modelos de simulación hidrogeológica se establece mediante la recarga por infiltración al medio subterráneo. Una vez determinada la recarga, esta tasa se utiliza como input para los modelos de simulación hidrogeológica. Los principales estudios en los cuales se desarrolla un modelo de simulación hídrica con esta metodología se describen a continuación:

1. SQM, (1996). Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con Ampliación de la Capacidad Productiva de Cloruro de Potasio: este estudio presenta un modelo hidrológico e hidrogeológico conceptual, además de uno numérico hidrogeológico basado en el estudio conceptual hidrogeológico del mismo informe del Salar de Atacama.

2. Compañía Minera RioChilex-EDRA, (1999). Evaluación hidrogeológica acuífero sector Norte del Salar de Atacama. Informe Final. Modelación realizada por Waterloo Hydrogeological Latinoamerica: en este estudio se realizó una modelación hidrológica e hidrogeológica conceptual, además de una simulación numérica del acuífero ubicado al norte del núcleo del Salar de Atacama.

3. SQM Salar S.A.-Igsa Consultores, Pramar Ambiental Consultores e Ingeniería DICTUC, (2004-2006). EIA Cambios y mejoras en la operación minera en Salar de Atacama: se presenta un modelo conceptual hidrológico e hidrogeológico, además de un modelo numérico en MODFLOW.

4. DICTUC, (2005). Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudios de evaluación de recursos hídricos: este estudio presenta un modelo hidrológico e hidrogeológico conceptual, además de un modelo numérico hidrogeológico implementado en MODFLOW del acuífero del núcleo sur y este del Salar de Atacama.

5. Sociedad Legal Minera NX UNO de Peine, (2009). EIA Planta de Producción de Sales de Potasio, SLM NX Uno de Peine: este EIA presenta un breve modelo hidrológico e hidrogeológico conceptual, además de un modelo numérico hidrogeológico.

6. Durán J., (2012). Modelación numérica y su contribución al estudio del comportamiento hidrogeológico del sector sw del acuífero del Salar de Atacama. II Región de Antofagasta, Chile. Universidad de Chile: trabajo de modelación hidrológica e hidrogeológica conceptual, además de una modelación numérica.

7. Rockwood Lithium-SGA, (2015). Adenda 5. Anexo I. Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama: este EIA presenta modelos hidrológico e hidrogeológico conceptuales y un modelo hidrogeológico numérico. La metodología utilizada para integrar estos modelos consistió en utilizar los flujos de recarga determinados por el modelo conceptual hidrológico como inputs del modelo numérico subterráneo.

8. Minera Escondida Ltda.-Golder, (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui: este informe presenta un modelo hidrológico e hidrogeológico conceptual, además de un modelo numérico hidrogeológico el cual comprende la zona sur del Salar de Atacama correspondiendo a Tilopozo, Negrillar y Monturaqui.

9. SLM NX Uno de Peine-CPH Consultores y Asociados, (2017). Adenda 3. Anexo 6. Estudio hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelación numérica. Rev. 0: el estudio desarrolla un modelo hidrológico e hidrogeológico conceptual, además de uno numérico actualizado de DICTUC (2004).

10. SQM-CSIC, (2017). Cuarta actualización modelo SQM: este estudio elabora un modelo conceptual hidrológico e hidrogeológico, además de una actualización del modelo numérico hidrogeológico del Salar de Atacama. Este modelo corresponde al código FEFLOW.

11. CMZ-GCF Ingenieros, (2018). Modelo del sistema hídrico de la subcuenca sur del Salar de Atacama. EIA Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar: este estudio incluye un modelo hidrológico e hidrogeológico conceptual, además de un modelo hidrogeológico numérico.

12. Exploraciones San Pedro S.A. (EPSA)-Gestionare Consultores, (2018). Plan de Alerta Temprana para el seguimiento de la extracción de agua subterránea en el norte del Salar de Atacama: se presenta un modelo conceptual hidrológico e hidrogeológico y uno numérico.

13. Marazuela, M. A., Vázquez-Suñè, E., Custodio, E., Palma, T., Garcia-Gil, A., & Ayora, C. (2018). 3D mapping, hydrodynamics and modelling of the freshwater-brine mixing zone in salt flats similar to the Salar de Atacama (Chile). Journal of Hydrology, 561, 223-235: este artículo presenta un modelo hidrológico conceptual y uno numérico hidrogeológico de flujo 2D con densidad variable.

14. Minera Escondida-Golder (2018). Adenda EIA Proyecto Monturaqui: este estudio presenta una actualización de los modelos hidrogeológicos previos, un modelo hidrológico conceptual y uno numérico hidrogeológico.

    SQM-CSIC, (2018a). Expediente Sancionatorio SQM Salar de Atacama. Informe de investigación Activación Contingencia L1_5 y reglilla L1_G4: este expediente presenta un modelo hidrológico e hidrogeológico conceptual, además de un modelo numérico tridimensional de flujo y transporte con densidad variable del sistema Soncor, en el sector norte del Salar de Atacama.

15. SQM-CSIC, (2018b). Informe de investigación Producto de la Activación del Plan de Contingencia en los puntos L1-5 y reglilla L1-G4: Este informe realizado para el expediente sancionatorio de SQM presenta un modelo hidrológico conceptual, un modelo hidrogeológico conceptual y un modelo numérico 3D de flujo de densidad variable del sector del sistema de Soncor de la cuenca del Salar de Atacama. La metodología empleada para integrar los modelos es estimar el balance hídrico conceptual a partir del modelo hidrológico, para ingresar las entradas y salidas del balance en el modelo numérico.

16. Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T., (2019). The effect of brine pumping on the natural hydrodynamics of the Salar de Atacama: The damping capacity of salt flats. Science of The Total Environment, 654, 1118-1131: este artículo presenta un modelo conceptual hidrológico y un modelo numérico hidrogeológico en FEFLOW.

17. SQM-CSIC, (2019). Quinta Actualización del Modelo Regional de Flujo del Salar de Atacama: Este informe realizado para el expediente sancionatorio de SQM presenta un modelo hidrológico conceptual, un modelo hidrogeológico conceptual y un modelo numérico 3D de flujo de densidad variable del sector del sistema de Soncor de la cuenca del Salar de Atacama. La metodología empleada para integrar los modelos es estimar el balance hídrico conceptual a partir del modelo hidrológico, para ingresar las entradas y salidas del balance en el modelo numérico. Los datos empleados en este estudio se encuentran actualizados al año 2019.

I.5.7 Modelación ecológica integrada

La naturaleza de los modelos ecológicos desarrollados en la cuenca del Salar de Atacama permite que la mayoría de estas herramientas se implementen de manera integrada con la hidrología superficial y subterránea, además de los actores principales de la cuenca. Los estudios de modelación ecológica integrada incluidos en la recopilación de antecedentes expuesta en la base de datos elaborada en este estudio se presentan a continuación.

1. Minera Escondida Ltda.-Centro de Ecología Aplicada, (2017). Modelo biofísico para la evaluación de la respuesta vegetacional como función de la disponibilidad hídrica en sector sur del Salar de Atacama – Sector Tilopozo: este modelo biofísico se encuentra acoplado a los niveles freáticos del sector sur del Salar de Atacama, a las variables meteorológicas como temperatura, precipitación y humedad de la zona además del uso de suelo del mismo sector, las cuales fueron detalladas en el CapítuloI.5.

2. CMZ-Agro Energía, (2018). Anexo 4.4 EIA Continuidad operacional Compañía Minera Zaldívar. Modelo Ecosistémico: este estudio presenta un modelo ecológico acoplado a la estimación de variables tanto hidrológicas como hidrogeológicas. Utiliza correlaciones con precipitaciones, evapotranspiración y niveles freáticos promediados a escala anual, las cuales fueron detalladas en el Capítulo I.5.

3. Comité de Minería No MetálicaAMAKÁIK, (2017a). Estudio de un Modelo Conceptual Ecológico para la Cuenca del Salar de Atacama. Informe 1: Análisis Crítico de Antecedentes Ambientales Registrados Para la Cuenca del Salar de Atacama: El informe presenta una revisión bibliográfica de los antecedentes relevantes para implementar un modelo ecológico conceptual. Además presenta una base de datos geocientífica a partir de los antecedentes encontrados para la Cuenca del Salar de Atacama.

4. Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, (2017b). Estudio de un Modelo Conceptual Ecológico Para la Cuenca del Salar de Atacama. Informe 2: Definición, selección y justificación de componentes principales y/o variables influyentes a considerar en la formulación del Modelo Conceptual Ecológico de la Cuenca del Salar de Atacama: En este estudio se identifican los componentes, variables, procesos e interacciones entre los ecosistemas de la cuenca del Salar de Atacama para implementar el modelo conceptual ecológico en dicha cuenca. En este estudio se determinaron las variables bióticas y abióticas del ecosistema de la cuenca mediante talleres de expertos. Además, se identificaron las forzantes y variables de estado, tales como hidrología, hidrogeología, clima, hidroquímica e hidráulica. Finalmente, el estudio muestra relaciones de interacciones entre estas forzantes y variables de estado e interacciones de tramas tróficas determinadas por Marquet et al. (1998).

5. Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, (2018a). Informe 3: Modelo Conceptual Ecológico (MCE) de la Cuenca del Salar de Atacama: este informe formula y

desarrolla un modelo ecológico conceptual a escala de cuenca Salar de Atacama, que representa la integración de los componentes bióticos y abióticos del ecosistema de la cuenca.

6. Comité de Minería No Metálica-AMAKÁIK, (2018b). Informe 4: Principales aspectos de informes 1, 2 y 3 e identificación de brechas para modelación en una futura etapa y propuesta. Este estudio además de consolidar el modelo ecosistémico consolidado a escala de cuenca, plantea las bases y recomendaciones para el desarrollo de un modelo ecosistémico numérico a escala de cuenca para el Salar de Atacama.

I.5.8 Levantamiento de brechas en modelación

Las principales brechas identificadas a lo largo del presente estudio de recopilación de antecedentes respecto a la disponibilidad de información y a la implementación actual de la integración de modelación hidrológica superficial, subterránea y de agentes consisten en las siguientes:

1. Existe limitada información de mediciones de estaciones hidrometeorológicas en la cuenca del Salar de Atacama, en especial en la zona oeste de la cuenca y en las partes altas del territorio, como en las cuencas de cabecera.

2. Existe escaza información respecto de las mediciones de evaporación de la red de lisímetros en la cuenca variable crítica para determinar correctamente el balance hídrico de la cuenca, al ser la principal salida de agua de esta. Sin perjuicio de aquello, en el trabajo desarrollado por Amphos 21, se consideran valores referenciales de evaporación utilizados para la construcción de su modelación hidrogeológica, la que se encuentran basada en información de datos públicos. Estos valores se utilizarán a modo referencial en este proyecto y para efectos de la modelación integrada. Por otra parte, lo mismo ocurre respecto de las recargas a los acuíferos al no existir mediciones directas, ni información suficiente sobre esta variable que, al igual que la evaporación, son elementos importantes para el desarrollo de los modelos hidrogeológicos. .

3. Respecto al medio biótico, si bien se cuenta con información referente a topografía y batimetría de las lagunas, además de imágenes satelitales, estos registros son acotados en el tiempo, por lo que existen dificultades para caracterizar dicha geografía regularmente en el tiempo. Este aspecto es fundamental para elaborar un modelo ecológico.

4. Por otro lado, para poder implementar el paradigma de la socio-hidrología (parte integral de la gestión de la cuenca), se requiere recopilar información científica (social–económica) específica, y es por ello que construimos y realizamos los talleres de modelación con la participación de académicos y servicios públicos. En otras palabras, la información con la que se cuenta (PIBR, indicadores socio-económicos,

demografía, etc.) es aún muy general para el nivel de granularidad que se requiere en el modelo.

5. El modelo hidrológico superficial requiere de la delimitación de las líneas de transmisión y derivaciones de las conducciones de Agua Potable Rural, de las cuales se tiene información parcial en la base de datos cartográfica. Para subsanar esto se recopiló información de CAPRA con mapas ráster con dicha información, la cual deberá ser georreferenciada y digitalizada.

6. La mayoría de los modelos hidrológicos desarrollados en la cuenca del Salar de Atacama corresponden a estudios conceptuales, dentro de los cuales los modelos con un mayor nivel de detalle se encuentran distribuidos por bandas de elevación. Esto representa una brecha respecto a la necesidad de un modelo hidrológico de tipo semi-distribuido, el cual sea integrando a nivel superficial y subterráneo y capaz de representar procesos hidrológicos como los deshielos y acumulación de nieve, como se constató en DGA-GCF (2010).

7. Los modelos hidrológicos numéricos distribuidos grillados (Liang, X., and Z. Xie, (2001)) presentan dificultades en su aplicación dentro del núcleo de la cuenca del Salar de Atacama debido a la planicie de su topografía y a la importante interacción entre los acuíferos y el escurrimiento superficial del norte de Chile en general en un clima con baja precipitación. Asimismo, los métodos de escalamiento de modelos de circulación general también presentan desafíos en su aplicación en el norte de Chile. En este sentido se deben comparar las series fluviométricas resultantes del modelo VIC existente con las mediciones de caudal existentes en las cuencas de cabecera para validar su aplicación. Como resultado de esto se puede volver necesario aplicar correcciones por estacionalidad o utilizar series medidas para determinar caudal por transposición de cuencas. También se deben comparar y validar los resultados de proyecciones de variables hidrometeorológicas de los modelos de circulación general para ser utilizadas en las proyecciones de cambio climático.

8. En la actualidad, tanto los modelos hidrológicos superficiales de carácter conceptual y numérico como los modelos hidrogeológicos subterráneos numéricos desarrollados para la cuenca del Salar de Atacama no se encuentran acoplados, siendo necesaria su integración mediante un vínculo como WEAP-MODFLOW, el cual está siendo utilizado actualmente en los planes integrados de gestión hídrica de cuencas (DICTUC-SEI-DGA, (2019) y DGA-PUC, (2019)). Este vínculo puede representar de manera explícita los procesos de recarga de agua al acuífero desde superficie.

El funcionamiento hidrológico particular de la cuenca del Salar de Atacama requiere la representación de procesos hidrológicos e hidrogeológicos de evaporación, evapotranspiración, deshielos, acumulación de nieve (DGA-GCF (2010)) y flujos de densidad variable, que sean capaz de representar la interacción entre las salmueras y agua fresca. Los paquetes requeridos por MODFLOW para representar flujos de densidad

variable, tales como el código de transporte de solutos MT3DMS (Bedekar et al. (2016)) o SWI2 Bakker et al. (2013), actualmente no se encuentran implementados en el acople de modelos de flujo subterráneo con el modelo hidrológico superficial WEAP. La representación de la interacción de los sistemas superficiales y subterráneos en estas plataformas (Harbaugh et al. (2005) y Harbaugh (2000)) requiere el desarrollo de la implementación de estos módulos de modelación hidrogeológica. El USGS se encuentra implementando paquetes para simular el flujo subterráneo de densidad variable con migración de salmueras para su código MODFLOW 6[23].

En relación a la modelación ecológica matemática, existen brechas en cuanto a información, específicamente respecto a la comprensión de la dinámica de las poblaciones de especies que habitan la cuenca y las interacciones entre ellas. Respecto a la modelación matemática de los ecosistemas acuáticos, existe la necesidad de comprender la relación entre las dinámicas de población e interacciones de los subcomponentes ecosistémicos. En particular, se reconoce la necesidad de profundizar en la comprensión de la dependencia matemática entre la dinámica de los sistemas lacustres y variables de calidad de agua tales como pH y conductividad eléctrica.

[23] https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/modflow-and-related-programs?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

I.6 Conclusiones

En el presente capítulo se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir del desarrollo de la Etapa I del proyecto "Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama". Esta Etapa, considera el levantamiento de información de base existente y tiene como objetivo contar con los antecedentes respecto la situación actual en la cuenca, a fin de comprender la problemática en el territorio que se desarrolla en la Etapa II.

Esta Etapa presenta la Información de base (línea de base), compilando la información existente levantada por estudios ya realizados hasta diciembre de 2019. La información para generar estas bases de datos se extrajo de distintos estudios, informes, tesis, bases de datos, noticias, libros, páginas web, estudios de impacto ambiental, RCA y adendas, entre otros. Esta información se sintetizó en una base de datos en formato Google Sheets, con un total de 501 antecedentes y se elaboraron fichas de estos.

Tomando en cuenta la información recopilada se presenta en esta Etapa una descripción detallada de la cuenca del Salar de Atacama incluyendo: su ubicación y características geográficas, delimitación(es) política-administrativas existentes, descripción del medio físico, biótico y humano de la cuenca. Con respecto del medio físico se incluye una caracterización climática, hidrológica, hidrogeológica. Con respecto del medio biótico se incluye una caracterización de los biomas y ecosistemas principales separando formaciones vegetacionales zonales y azonales además de especies de fauna y biota acuática relevantes. Finalmente, respecto del medio humano se incluye una caracterización de aspectos demográficos, de la presencia de pueblos originarios y una descripción de las actividades económicas principales en relación con la gestión de los recursos hídricos (agricultura, turismo y minería).

Se incluye también una descripción de los componentes claves para la gestión de los recursos hídricos tomando en cuenta el rol de actores claves y herramientas e instrumentos para la gestión. El análisis de estas herramientas e instrumentos se complementa con una descripción de las herramientas de monitoreo de estos distintos medios. Con respecto a los actores involucrados, estos se presentan clasificándolos a nivel público, privado y pertenecientes a la sociedad civil. En cada estrato, se identifica un amplio rango de actores que forma parte del proceso regulatorio. Se destacan también usuarios del agua como los Comités de APR y distintas empresas que extraen recursos para sus actividades productivas. Con respecto a los instrumentos y herramientas de planificación y gestión, se consideran las distintas opciones que tiene el Estado para gestionar de manera directa e indirecta los recursos hídricos. Estas se clasifican según su foco de acción en: (1) planificación del territorio, (2) planificación de los recursos hídricos (incluida infraestructura asociada), (3) gestión del aprovechamiento de los recursos hídricos (4) gestión de áreas naturales, (5) gestión de territorios indígenas y (6) gestión de otros recursos de asociados a actividades productivas (ej. minería no metálica, agricultura, energía).

Por otro lado, tomando en cuenta los antecedentes recopilados, se presentó también una

descripción de las experiencias en modelación hidrológica, hidrogeológica y ecológica, la cual incluye la descripción de bases de datos y la existencia de modelos conceptuales y numéricos. Además, se evaluaron las experiencias de modelos integrados y se identificaron las brechas que existen actualmente respecto al desarrollo de estos modelos en la cuenca del Salar de Atacama.

Respecto a la modelación hidrológica superficial, se cuenta principalmente con modelos conceptuales de precipitación escorrentía para obtener un balance hídrico general a escala de cuenca. Con respecto a experiencias con modelos numérico destacan el desarrollado por GCF Ingenieros (2018) (análogo al modelo hidrológico SWAT) y el modelo Variable Infiltration Capacity (Liang et al., 2001) desarrollado en la Actualización del Balance Hídrico de Chile (DGA, 2018)). Respecto de la modelación numérica hidrogeológica se cuenta con más de 18 modelos subterráneos desarrollados en MODFLOW y FEFLOW. Actualmente Amphos21 está trabajando en un modelo numérico hidrogeológico integral de la cuenca, el cual será incorporado en el acople con WEAP en este proyecto. Por otro lado, se puede concluir que la mayoría de los estudios existentes de modelación ecológica que comprenden completamente la cuenca del Salar de Atacama, son de carácter conceptual, entre los cuales destaca el de AMAKÁIK (2017b). Se concluye respecto a modelación ecosistémica que se cuenta tanto con estudios conceptuales, los cuales presentan una visión general y completa de la cuenca, como modelos ecosistémicos específicos, los cuales buscan entender el comportamiento de ecosistemas tanto a escala de cuenca como a escala local.

La recopilación de antecedentes presentada en esta Etapa se utilizará para poder desarrollar un diagnóstico de la gestión de recursos hídricos en la cuenca del Salar de Atacama que se lleva a cabo en la Etapa II del proyecto. Sin perjuicio de lo anterior, el levantamiento de información debe ser complementado en el desarrollo del Plan Estratégico de gestión de recursos hídricos de la cuenca especialmente a través de un trabajo participativo desarrollado por la DGA con todos los actores de la cuenca, considerando a las empresas de diversos sectores productivos como la minería, el turismo y la agricultura, a las comunidades locales, comités de riego, entre otros, lo cual no forma parte de los alcances de este proyecto.

Por otra parte, se describen las experiencias en modelación en distintos ámbitos (hidrológico, hidrogeológico y ecológico) que son la base para poder construir la herramienta que se debe desarrollar como parte de la Etapa III de este proyecto. Para lograr el perfeccionamiento de esta herramienta se deben abordar los desafíos en términos de modelación de hidrología superficial y ecológica, en la inclusión de la modelación explicita de toma de decisiones, acciones e intervenciones de los distintos actores relevantes en la cuenca, y los desafíos asociados a la integración de estos distintos modelos.

Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama

Etapa II: Diagnóstico

II.1 Resumen ejecutivo

En el contexto de interacciones entre los múltiples actores involucrados en la cuenca del Salar de Atacama con el medio biótico, y su dependencia con el recurso hídrico, surge la necesidad desarrollar un modelo integrado de gestión hídrica, que permita facilitar la toma de decisiones en la administración del recurso hídrico en dicha cuenca. En este contexto se ha formulado el Convenio de Colaboración CORFO-DGA cuyo objetivo es el desarrollo de una herramienta numérica de análisis integrado que reduzca la incertidumbre en la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico de la cuenca del Salar de Atacama. Dicha herramienta debe incorporar aspectos de diversa naturaleza, como biofísicos, económicos, sociales, tecnológicos, administrativos e institucionales, en el marco de una visión de desarrollo para el país y la política de recursos hídricos impulsada por la DGA.

En el marco de este Convenio de Colaboración CORFO-DGA se desarrolla el proyecto **Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama**. Este proyecto se estructura en base a 3 etapas: Etapa I: Levantamiento de información de base; Etapa II: Diagnóstico; Etapa III: Formulación y ejecución.

En esta Etapa se presentan los resultados correspondientes al Diagnóstico del Estudio Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama, realizando para ello, un análisis de la información recolectada en la Etapa anterior del proyecto, tomando en cuenta los elementos asociados al balance de entradas y salidas de agua dulce y salmuera, demanda y necesidades de agua por distintos sectores y sistemas, y proyección de escenarios futuros.

En esta Etapa se realiza una clasificación de los fluidos de distinta composición y densidad (agua fresca y salmuera) que coexisten e interactúan en la cuenca. La clasificación se realiza en función de los sólidos disueltos totales (SDT) o su conductividad eléctrica. A partir de Davis (1964) y Frezze & Cherry (1979) se puede clasificar el agua fresca como un fluido con SDT menores a 1.000 mg/L (conductividades del orden de 100 µs/cm) y salmueras como un fluido con SDT mayores a 100.000 mg/L (conductividades del orden de 500.000 µs/cm). Sin embargo, si bien el agua y la salmuera presentan diferentes grados de conexión hidráulica entre las unidades hidrogeológicas que los almacenan, estos dos fluidos coexisten de forma estrecha en la cuenca mediante la existencia de la interfaz o cuña salina.

En esta Etapa se da cuenta del balance de agua a nivel superficial y subterráneo que se realizó en el estudio Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018). De acuerdo a los análisis presentados la entrada principal de agua a la cuenca corresponde a las precipitaciones, las que en su régimen natural satisfacen las salidas evaporativas, las salidas por evapotranspiración, la evaporación desde la napa y el consumo humano que existía en la cuenca. Debido a las extracciones antrópicas de las últimas décadas, a partir de mediados de la década de los 90s de acuerdo con el balance presentado por Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), el equilibrio hídrico natural de la cuenca se vio

influenciado, existiendo una variación de almacenamiento en el balance general, que se ve compensado por el agua disponible del almacenamiento del sistema subterráneo

Las demandas de recursos existentes en la cuenca se dividen en consumo de agua dulce y salmueras. Respecto del primero, existen demandas de agua dulce para la industria minera, riego y el consumo por la población (residente y visitante principalmente asociada al turismo). La demanda para el consumo de agua potable para la población en la cuenca del Salar de Atacama se encuentra cubierta casi en su totalidad por Comités de agua potable rural (APR) que de acuerdo a los antecedentes recopilados tienen una buena cobertura (del orden de un 100% salvo en la localidad de San Pedro de Atacama, la cual presenta una confiabilidad del suministro del 96%). Respecto al consumo antrópico, por una parte se encuentra la demanda de agua para fines industriales, que proviene de la actividad minera en gran medida producto de la extracción de agua fresca (concentradas en la zona sureste de la cuenca), y por otra parte la demanda de salmueras, que proviene de la minería no metálica que está en la zona del núcleo. La actividad agrícola también tiene un consumo de agua a nivel superficial que se concentra en torno a los Ayllus del poblado de San Pedro de Atacama y otros pueblos en la cuenca. Los ecosistemas acuáticos dependen también de los niveles presentes en las lagunas, los que a su vez dependen del balance de entradas y salidas de agua (fresca y salmuera). La conservación de la biodiversidad en estos ecosistemas no solo depende de la cantidad, sino que también de la calidad del agua donde los efectos de la salinidad cobran importancia, sin embargo, no hay claridad respecto de la relación funcional de estas variables.

Se da cuenta en esta Etapa de la información relevante que permite realizar una modelación de los escenarios futuros que sirvan para caracterizar la oferta y demanda de agua en la cuenca del Salar de Atacama. Por una parte, respecto de las proyecciones de clima futuro se presenta un análisis de pronósticos asociados a cambio climático que son contrastado con información de tendencias observadas. El análisis de estas proyecciones da cuenta del alto nivel de incertidumbre respecto de cambios futuros en precipitación (diferente a otras cuencas del país) pero a la vez dan cuenta del importante aumento en temperatura (que supera a la situación de otras cuencas del país). También se presentan en el informe análisis que permiten proyectar el crecimiento demográfico, agrícola, minero y de actividad turística, para poder posteriormente realizar una modelación de los cambios en demanda de recursos hídricos para estos distintos sectores. Para la cuenca del Salar de Atacama se proyecta un aumento en las necesidades de agua potable por parte de la población residente y aquella asociada al turismo. La proyección futura de desarrollo minero podría prever que se continúe con las tasas de extracción de salmuera y agua dulce en el futuro. En el caso de la minería no metálica, podría existir un potencial aumento en la necesidad de extracción de salmuera y agua dulce en el salar dado que actualmente se encuentra en evaluación ambiental el proyecto "Planta de Producción de Sales de Potasio, SLM NX Uno de Peine". A la fecha no existen nuevas autorizaciones ambientales aprobadas para poder aumentar esta extracción, así como tampoco la autorización de nuevas cuotas de extracción de litio por parte de la CCHEN para la explotación y exportación de litio. Por otra parte, respecto de la extracción de agua fresca por parte de actividades de minería de cobre, a partir de diciembre del año 2019 deja de operar la extracción de agua fresca por parte de Minera Escondida dado que cesa su permiso ambiental de extracción

Los análisis de balances hidrológicos y de demanda de recursos hídricos por distintos sectores son complementados por análisis de otros componentes relevantes de la gestión de recursos hídricos tales como el nivel de coordinación de los distintos usuarios del agua y las relaciones que existen entre los distintos sectores de usuarios del agua (minería, medioambiente, agricultura, consumo humano). Se incluyen también análisis de los instrumentos que se han diseñado para la gestión de los derechos de aprovechamiento de agua y de zonas de protección y otros recursos. La presencia de estos múltiples objetivos requiere de una gobernanza en el marco del desarrollo de Plan Estratégico de Gestión Hídrica para la cuenca del Salar de Atacama.

Se incluyen también en estos análisis las limitaciones respecto de otros instrumentos complementarios pero claves para la gestión del recurso hídrico, como es el monitoreo de los sistemas naturales y antrópicos. Pese a que existen recursos importantes (públicos y privados) para realizar monitoreo de diversas variables (físicas y bióticas), esta información todavía es escaza considerando la gran extensión de la cuenca (en relación con las zonas donde se concentran los monitoreos) y la complejidad de los procesos biofísicos que ahí ocurren.

Este diagnóstico sirve de base para la Etapa III de Formulación y Ejecución del proyecto en el que se desarrolla el Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama.

II.2 Introducción

La segunda Etapa de este proyecto considera el análisis de la información recolectada en la primera Etapa y tiene como objetivo realizar el marco conceptual para la gestión hídrica considerando los siguientes elementos:

- Balance de entradas y salidas de agua dulce y salmueras: Estimación oferta y demanda de agua superficial y subterránea, balance hídrico superficial y subterráneo y descripción de zonas de agotamiento, restricción, protección y prohibición. Importante destacar que el agua y la salmuera son fluidos de distintas características y composición, los cuales pueden ser diferenciados en función de los sólidos disueltos totales (menores a 1.000 mg/L para agua y mayores a 100.000 mg/L para salmuera). Sin embargo, estos dos fluidos coexisten de forma estrecha en la cuenca mediante la existencia de la interfaz o cuña salina.

- Demanda de agua sectorizado: consumo productivo (agrícola, minero, turístico, industrial, entre otros), consumo humano básico, protección y conservación (humedales, paisajístico, parques, biodiversidad, entre otros), y otros usos (recreativo, deportivo, entre otros).

- Caracterización de proyecciones futuras: Eventos hidrometeorológicos (incluidos escenarios de cambio climático), proyección de aumento poblacional y proyecciones de la economía e inversión minera.

- Diagnóstico de la información levantada: balance hidrológico, consumo de agua potable, cobertura de abastecimiento y componentes relevantes para la gestión de recursos hídricos.

En esta Etapa se entregan los resultados de los análisis de los componentes del ciclo hidrológico de la cuenca, con especial énfasis en la descripción de la demanda de agua por distintos sectores sociales, productivos y sistemas naturales en la cuenca. A partir de estos análisis y complementando con los análisis de las herramientas y actores relacionados con la gestión de recursos hídricos presentado en la Etapa I se hace un primer levantamiento de la gestión de recursos hídricos en la cuenca del Salar de Atacama[24]. Finalmente se presenta la metodología que se propone utilizar para desarrollar las proyecciones climáticas y de crecimiento demográfico futuro que van a determinar las condiciones naturales de oferta y antrópica de demanda de agua y salmuera en la cuenca. Esta Etapa consta de cinco secciones que abordan cada uno de estos temas, incluyendo una sección final de conclusiones.

[24] Este primer levantamiento debe ser complementado con los resultados de talleres de expertos en el marco de este proyecto y con el trabajo que se desarrolla en el contexto de la ejecución del Plan Estratégico de Gestión Hídrica para la Cuenca del Salar de Atacama, liderado por la Dirección General de Aguas (DGA).

II.3 Antecedentes considerados en el diagnóstico

Los antecedentes utilizados para la elaboración de esta Etapa corresponden a los recopilados en la primera Etapa de levantamiento de información y corresponden a información pública disponible hasta diciembre de 2019.

II.3.1 Introducción

En esta Etapa se realiza un diagnóstico de la información disponible respecto de análisis de balance hídrico de las entradas y salidas de agua dulce y de salmueras en la cuenca del Salar de Atacama. Se han realizado una serie de estudios recientes que tratan de manera específica el balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama (Tesam, 2005; DGA-GCF, 2010; DGA, 2013; SGA, 2015; Golder, 2017*[25]; Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018). En esta Etapa se toma el estudio Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) como el estudio de modelo conceptual más reciente al 2019 del balance hídrico en la cuenca del Salar de Atacama. En esta sección se analizan los resultados de este estudio complementándolo con otras fuentes como la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA-U Chile-PUC, 2017) y el Banco Nacional de Aguas (BNA) de la Dirección General de Aguas (DGA-BNASIGIRH, 2019) entre otros estudios y bases de datos que se presentan en la Etapa I del proyecto.

El análisis realizado en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) y en estudios anteriores separa los balances de aguas a nivel superficial y subterráneo. La condición endorreica de la cuenca del Salar de Atacama y la presencia del núcleo de salmuera implica algunas condiciones especiales que deben ser consideradas en el balance hídrico. Un esquema conceptual de dicho balance se presenta en la Figura II-1. Se presentan de esta manera las entradas y salidas y movimientos de agua en los sistemas de aguas a nivel superficial y subterráneo. En el sistema superficial las entradas principales corresponden al input por precipitación (P) que puede infiltrarse directamente al suelo (Rp), o acumularse temporalmente como nieve generando una escorrentía (Q y Qn) que se transforma en caudales superficiales que aportan de recursos a distintas zonas de la cuenca. Esta escorrentía superficial termina infiltrándose de manera directa o a través de lagunas terminales (Rq y Rn) hacia el acuífero en la zona marginal del Salar de Atacama por lo que pasa a ser una salida importante del sistema superficial. Otras salidas son la evapotranspiración desde el suelo, cuerpos de agua, vegetación natural y cultivos (EVT). En el sistema subterráneo la principal entrada corresponde a la recarga de agua disponible en el suelo por infiltración desde la superficie y aportes directos desde cuerpos de agua (Rp, Rq y Rn). Las principales salidas son evaporación del nivel freático (E) y extracciones de agua dulce y salmuera (Ex). El balance de estos flujos determina la variación del almacenamiento del sistema hídrico. Los balances de ambos sistemas (sistema superficial y subterráneo) se presentan en Comité de Minería No Metálica -Amphos21 (2018) con los componentes que se describen a continuación y conceptualmente representados en la

[25] De todas las referencias esta es la única que no considera la cuenca en toda su extensión, sino que una zona de ella

Figura II-2.

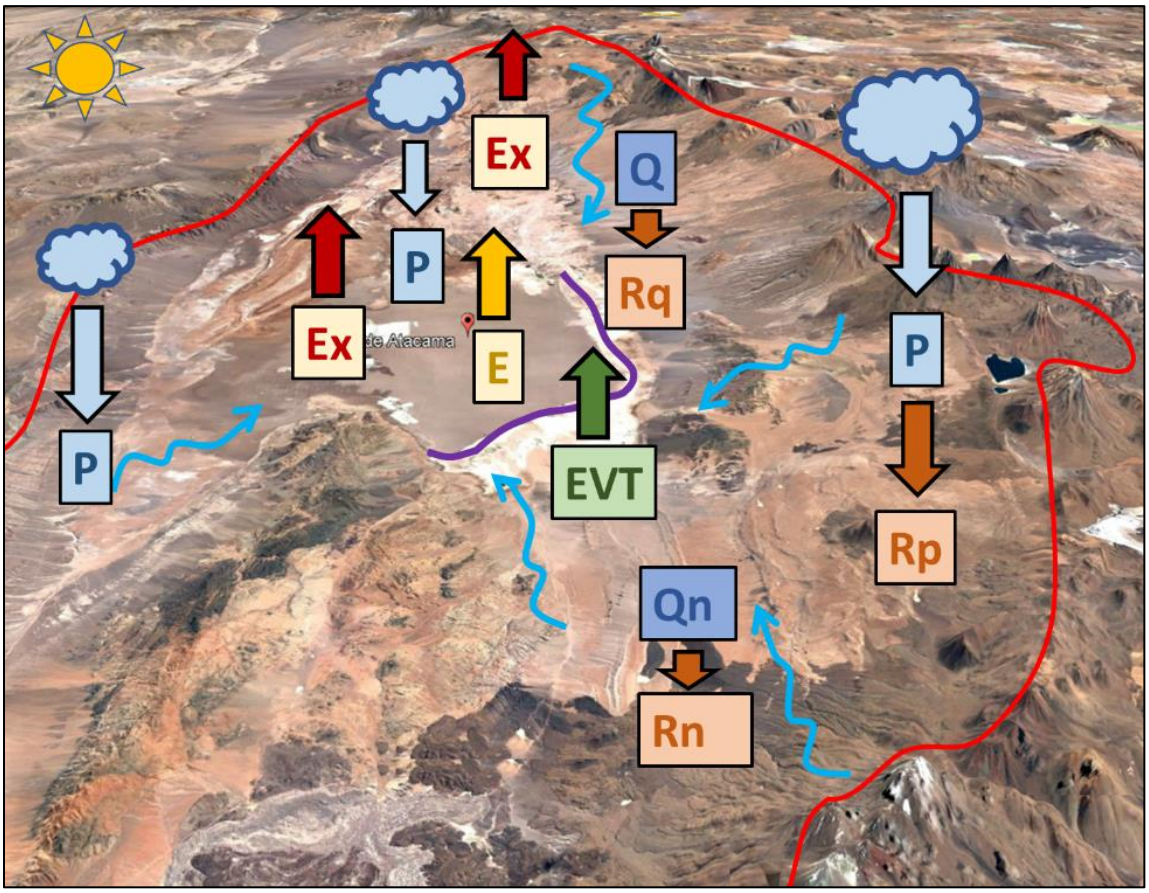


Figura II-1 : Esquema conceptual del Balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama.
Nota: Las variables incluyen precipitación (P), recarga al acuífero por precipitación (Rp), por escorrentía (Rq) y por derretimiento de nieves (Rn), evaporación (E), evapotranspiración (EVT), escorrentía directa (Q) y producida por derretimiento de nieves (Qn) y extracciones (Ex).
Fuente: Elaboración propia

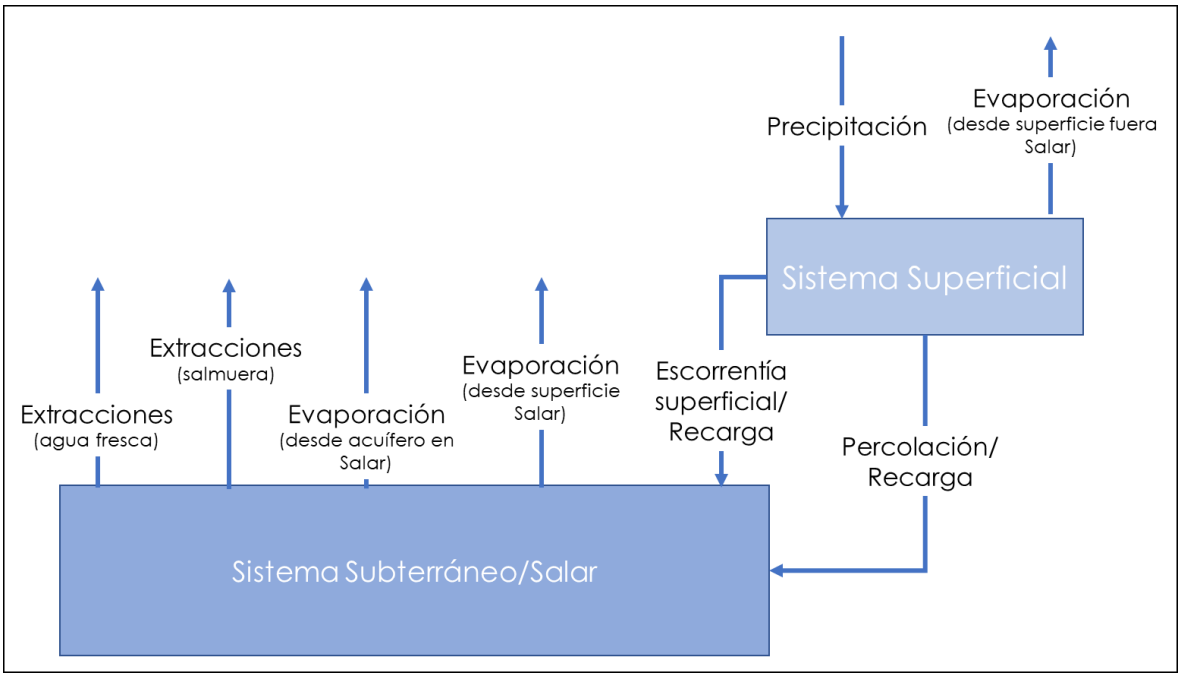


Figura II-2 : Esquema conceptual de la conexión entre los balances a nivel superficial y subterráneo
Fuente: Elaboración propia

El agua fresca y la salmuera son fluidos de distinta composición y densidad, los cuales pueden ser diferenciados en función de los sólidos disueltos totales (SDT) o su conductividad eléctrica. Davis (1964) y Frezze & Cherry (1979) clasifican el agua fresca como un fluido con SDT menores a 1.000 mg/L (conductividades del orden de 100 µs/cm) y salmueras como un fluido con SDT mayores a 100.000 mg/L (conductividades del orden de 500.000 µs/cm). La transición (ver Figura II-3) que supone el paso del agua fresca (conductividades del orden de 100 µs/cm) en las zonas de cordillera donde se producen los principales aportes de escorrentía superficial y subterráneo hacia la zona del núcleo del salar (conductividades del orden de 500.000 µs/cm) suponen un cambio drástico de densidad de las aguas que dificultan el intercambio de agua entre algunas zonas de la cuenca generando la necesidad de estudiar los balances por subcuencas. Sin embargo, Si bien el agua y la salmuera presentan diferentes grados de conexión hidráulica entre las unidades hidrogeológicas que los almacenan, estos dos fluidos coexisten de forma estrecha en la cuenca mediante la existencia de la interfaz o cuña salina. En estudios previos se han realizado la separación en estas distintas subcuencas para considerar balances a estas escalas con especial atención al balance entre las zonas altas en la cuenca y la zona del Salar de Atacama. El estudio de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) utiliza la delimitación de 17 subcuencas que en general coinciden con la delimitación de los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) definidos por la DGA para evaluar los flujos de entrada y de salida de la cuenca (ver Capítulo I.4.6.2.3). Esta delimitación se presenta en la Figura II-4.

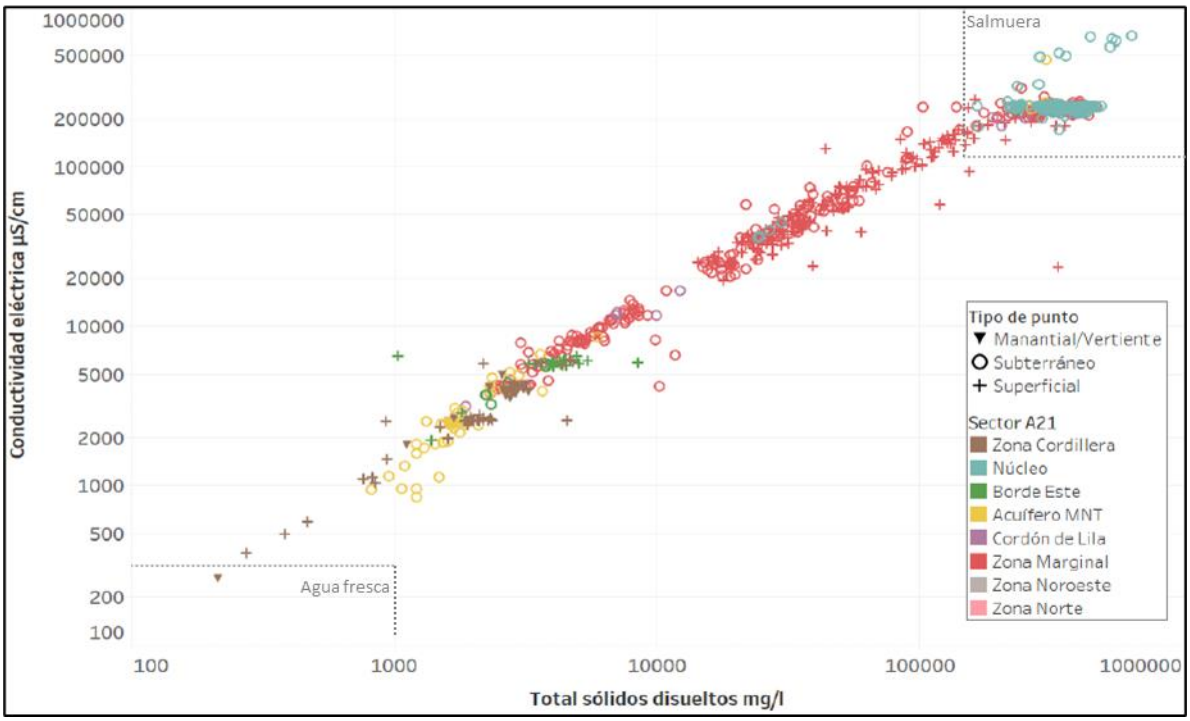


Figura II-3: Relación entre conductividad eléctrica y solidos disueltos en muestras de agua a nivel superficial y subterráneo en distintas zonas de la cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21(2018)

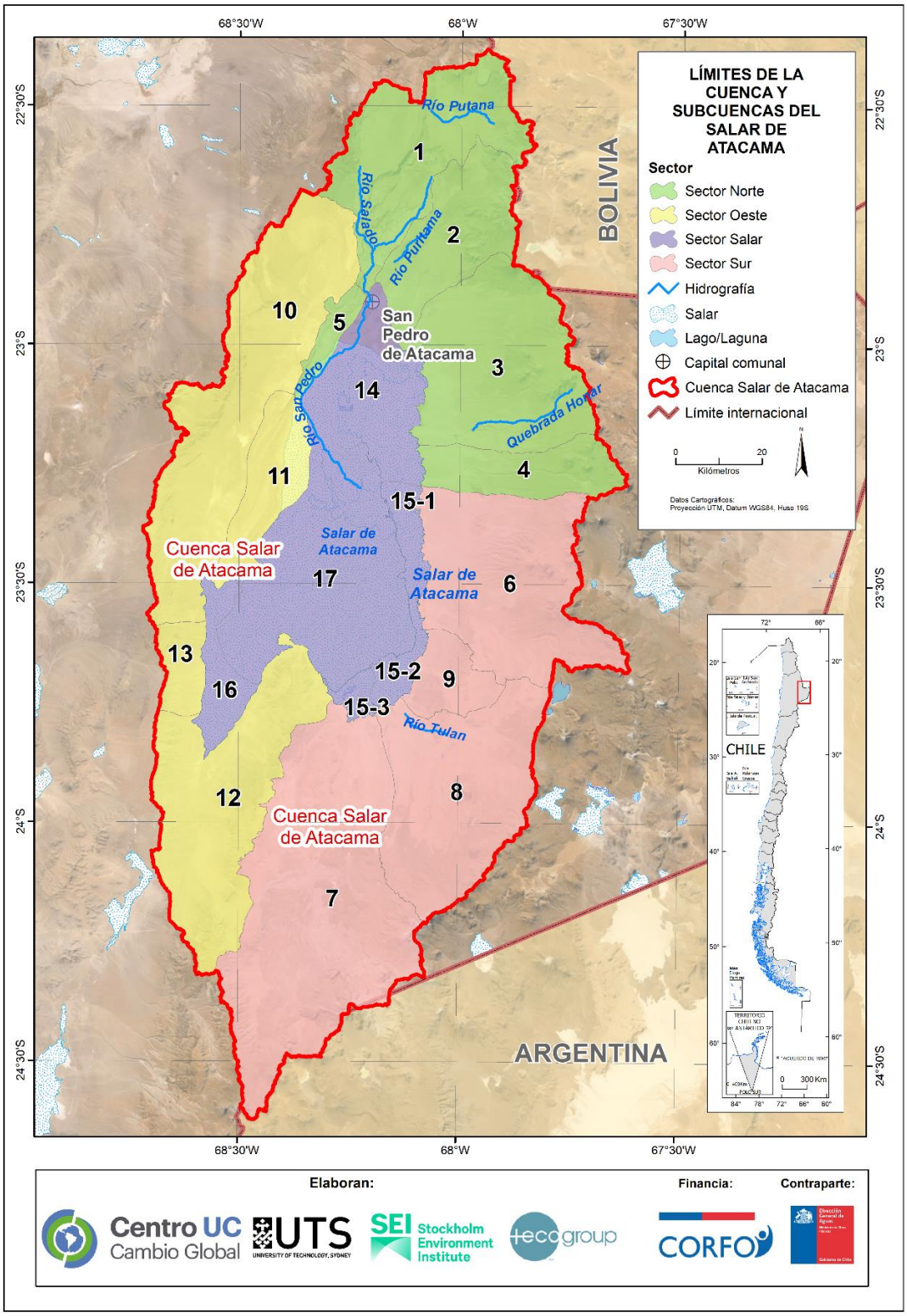


Figura II-4: Subcuencas de la cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración propia a partir de lo definido por Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)
Números indican discretización de subcuencas consideradas para el Salar de Atacama.

II.3.2 Entradas y salidas de aguas a nivel superficial

El estudio Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) realizó un análisis hidrológico de las variables de precipitación, escorrentía, evaporación e infiltración dentro de la cuenca del Salar de Atacama.

II.3.2.1 Precipitación

La precipitación es la principal fuente de entrada de agua a la cuenca del Salar de Atacama. Las precipitaciones en la cuenca son escasas debido al clima árido (BW) (Köppen,1936), las cuales se concentran en los meses de verano provenientes de frentes de lluvia amazónicos, seguidos por largos períodos de baja intensidad de precipitaciones. Además de esta variabilidad temporal, existe una variabilidad espacial de las precipitaciones debido a los gradientes topográficos de la cuenca del Salar de Atacama. Estos aspectos se analizan en las secciones siguientes.

II.3.2.1.1 Análisis de información proveniente de estaciones pluviométricas

Para realizar el balance hídrico de la cuenca se analizó información pública de estaciones de la DGA (pluviométricas e hidrométricas) y de otras redes de monitoreo privadas (SQM y MEL). El análisis consideró el período entre 1970 y 2016. Sin embargo, debido a su escaso registro pluviométrico, se descartó gran parte de las estaciones de SQM para realizar el balance hídrico. El detalle de las estaciones utilizadas para realizar el balance hídrico de la cuenca se presenta en la Tabla II-1 Adicionalmente, algunas estaciones pluviométricas utilizadas se encuentran fuera de la cuenca Salar de Atacama, las cuales se incluyeron en el análisis del balance hídrico de la cuenca (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018), con el motivo de determinar la variabilidad espacial de precipitaciones y evaluar su inclusión en la elaboración de gradientes de precipitación para distribuirla sobre la cuenca.

Tabla II-1: Estaciones pluviométricas existentes en la cuenca del Salar de Atacama y sus alrededores en la Región de Antofagasta. Coordenadas en WGS 1984

Código BNA	Estación	Lat.	Lon.	msnm	Fuente
02104010-K	ChiuChiu	-22,3422	-68,6461	2.524	DGA
02105016-4	Linzor	-22,2266	-68,0208	4.096	DGA
02105017-2	Toconce	-22,2615	-68,1642	3.350	DGA
2105018	Ayquina	-22,2753	-68,3183	3.031	DGA
02105020-2	Salado Embalse	-22,2851	-68,2034	3.200	DGA
02105021-0	Caspana	-22,3350	-68,2078	3.260	DGA
02105022-9	El Tatio	-22,3714	-68,0133	4.370	DGA
02110013-7	Calama	-22,4496	-68,9044	2.260	DGA
02112009-K	CoyaSur	-22,3940	-69,6225	1.290	DGA
02500016-1	Toconao Experimental	-23,1924	-67,9997	2.500	DGA
02500017-K	Camar	-23,4085	-67,9619	2.700	DGA
02500019-6	Socaire	-23,5904	-67,8945	3.251	DGA
02500020-K	Peine	-23,6877	-68,0600	2.460	DGA

Código BNA	Estación	Lat.	Lon.	msnm	Fuente
02500021-8	Talabre	-23,3160	-67,8898	3.300	DGA
02510006-9	San Pedro de Atacama	-22,9088	-68,2023	2.450	DGA
02510007-7	Rio Grande	-22,6557	-68,1678	3.250	DGA
02660001-4	Monturaqui	-24,3417	-68,4353	3.430	DGA
02700001-0	Sierra Gorda	-22,8908	-69,3213	1.616	DGA
02710002-3	Baquedano	-23,3278	-69,8339	1.032	DGA
02710003-1	Antofagasta	-23,5975	-70,3867	50	DGA
NA	Planta SCL	-23,6473	-68,3211	2.306	SQM
NA	Chaxas SQM	-23,2889	-68,1834	2.300	SQM
NA	Salar SQM	-23,5428	-68,3990	2.300	SQM
NA	Socompa	-24,3374	-68,4352	3.600	Golder
NA	Tilopozo	-23,7789	-68,1657	2.325	Golder
NA	Cerro Marcelo	-24,2328	-69,0985	3.290	Golder
NA	Laguna Seca	-24,4133	-69,1973	2.936	Golder
NA	Volcán Llullaillaco	-24,6843	-68,9012	4.312	Golder
NA	Salar de Punta Negra	-24,6842	-68,8023	2.950	Golder

Fuente: Elaboración propia a partir de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

La disponibilidad del registro de precipitaciones se presenta en la Figura II-5. La información recopilada permite concluir que los registros de precipitación en las estaciones pluviométricas de particulares son limitados. Cabe mencionar que sólo se cuenta con estadística de promedios anuales de precipitación de las estaciones de redes privadas de monitoreo correspondientes a Cerro Marcelo, Laguna Seca, Volcán Llullaillaco y Salar de Punta Negra.

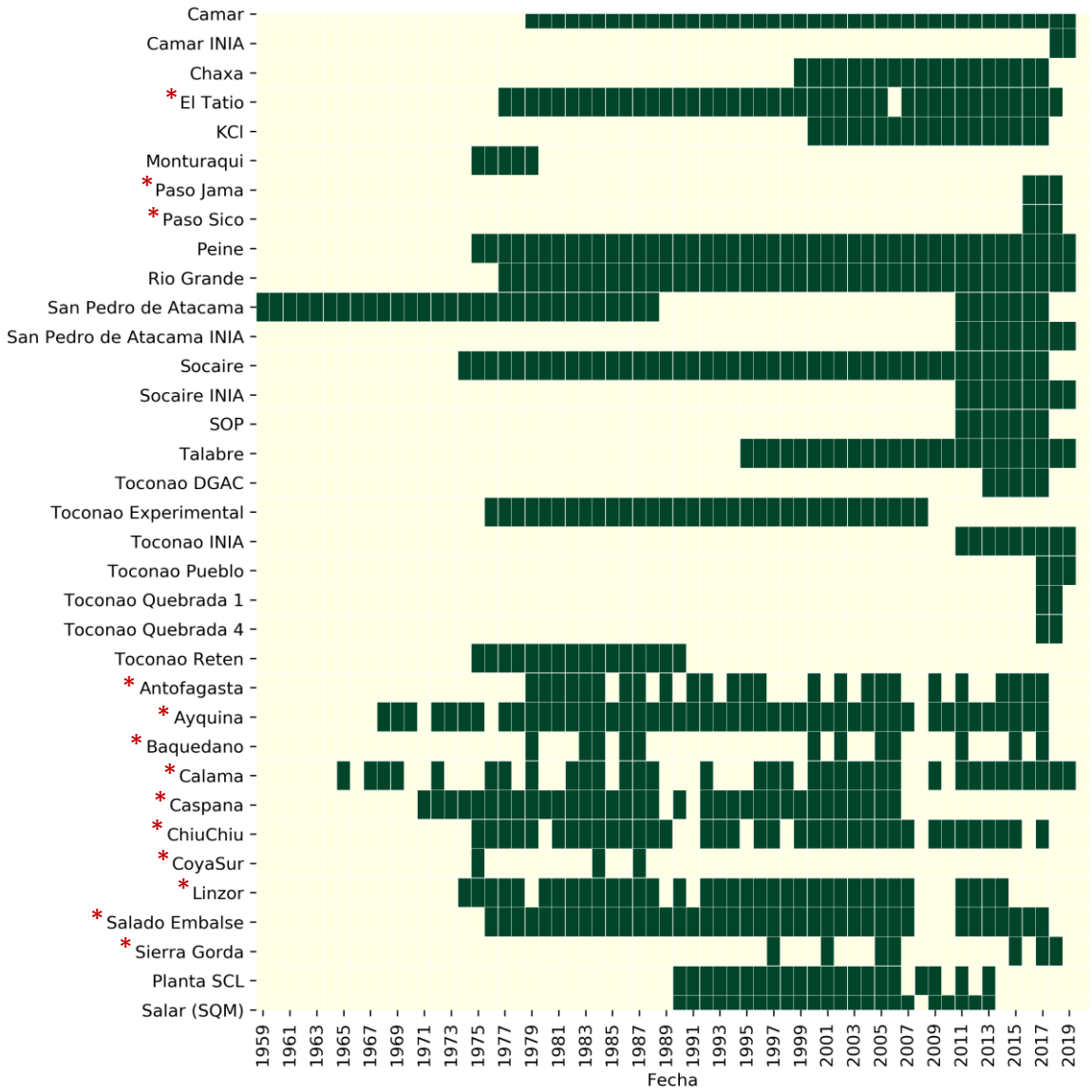


Figura II-5: Disponibilidad de la información pluviométrica en estaciones DGA y particulares.
Nota: Las estaciones con * se encuentran fuera de los límites de la cuenca.
Fuente: Elaboración propia.

Tomando en cuenta los registros de la información pluviométrica disponible, el estudio de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) optó por utilizar los promedios reportados por SGA (2015) y Golder (2017), en donde se presenta la estadística de las estaciones de la Tabla II-2. La metodología empleada para calcular la precipitación media anual de cada estación considera en primer lugar un relleno de datos y corrección de la estadística de pluviometría, que considera el ajuste de las medias y desviaciones de los datos. Respecto a la metodología de completitud de la información, el estudio de SGA (2015) hace referencia a un método estocástico multivariado (DGA, 2010), cuyo resultado para cada estación corresponde a valores aleatorios de la variable precipitación, los cuales consideran la probabilidad de no lluvia y correlación mensual con otras estaciones

utilizadas en el análisis. Por otro lado, la metodología empleada por el estudio de Golder (2017) para corregir la estadística de precipitaciones, consiste en completar dicha información utilizando como referencia la estación Peine, mediante factores de corrección. Estos se estimaron de acuerdo al sesgo que presenta su período particular observado, respecto de dicha estación de referencia.

Respecto a las estaciones de la DGA Talabre y San Pedro de Atacama, se utilizaron los valores de precipitación promedio anual presentados en el estudio SGA (2015). Se descartó el uso de la información pluviométrica de la estación Monturaqui debido a su escasez de información (Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)).

La estadística del resto de las estaciones públicas fue obtenida desde la base de datos del BNA, ya que en su mayoría se cuenta con al menos 32 años de registros completos, lo suficientemente extensos como para calcular directamente la precipitación media anual (Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)), a excepción de las estaciones Coya Sur y Sierra Gorda.

Los resultados de la precipitación media anual presentados en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) se presentan en la Tabla II-2 y la representación gráfica del comportamiento de las estaciones que se encuentran al interior de la cuenca en la Figura II-6. Los mínimos y máximos reportados pueden pertenecer a años distintos dentro del periodo analizado.

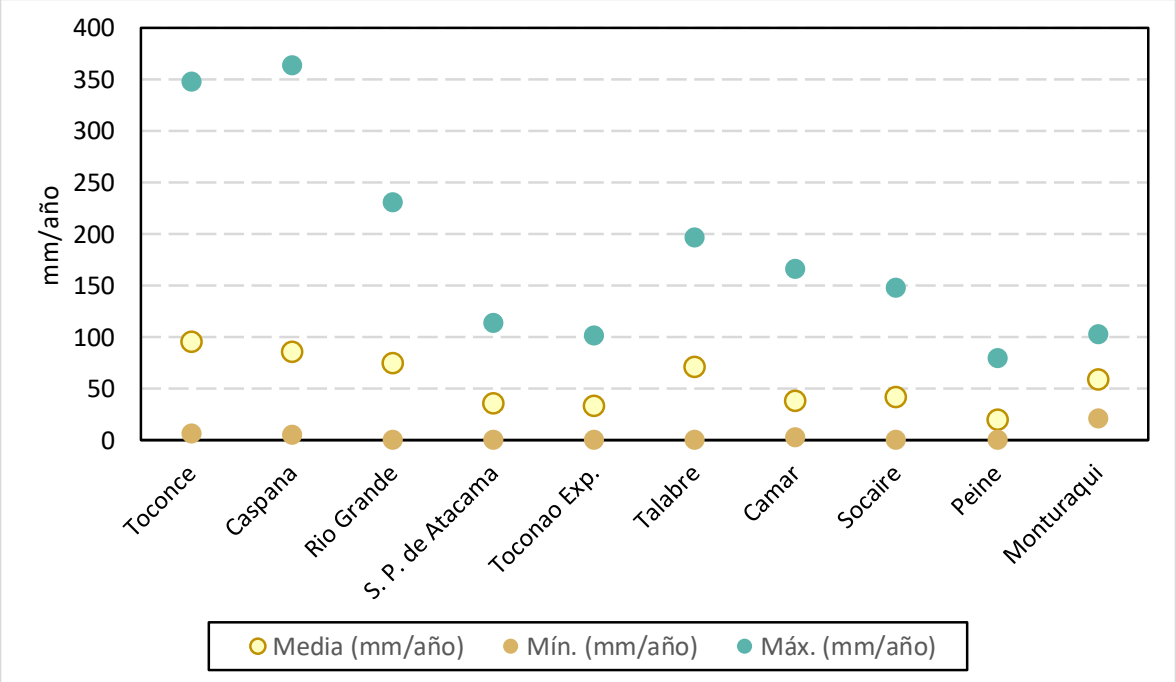


Figura II-6: Pluviometría media anual registrada en estaciones al interior de la cuenca (ordenadas de izquierda a derecha en la gráfica de norte a sur y de este a oeste) en un periodo mínimo de 32 años entre 1974 y 2018.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla II-2: Estadígrafos de la precipitación media anual.

Estación	Media (mm/año)	Desviación estándar (mm/año)	Mín. (mm/año)	Máx. (mm/año)
ChiuChiu*	5	5	0	24
Linzor*	161	109	1	412
Toconce	95	76	6	348
Ayquina*	40	42	0	190
Salado Embalse*	70	69	2	324
Caspana	85	83	5	364
El Tatio*	135	106	0	422
Calama*	4	4	0	14
CoyaSur*	1	2	0	5
Toconao Experimental	33	32	0	101
Camar	38	38	2	166
Socaire	41	41	0	148
Peine	20	20	0	79
Talabre	71	64	0	197
San Pedro de Atacama	36	32	0	114
Río Grande	75	60	0	231
Monturaqui	59	40	21	103
Sierra Gorda*	1	2	0	8
Baquedano*	2	5	0	21
Antofagasta*	5	9	0	37
Planta SCL*	13	-	-	-
Chaxas SQM	9	-	-	-
Salar (SQM)	13	-	-	-
Socompa	44	-	-	-
Tilopozo	22	-	-	-
Cerro Marcelo	17	-	-	-
Laguna Seca	25	-	-	-
Volcán Llullaillaco	54	-	-	-
Salar de Punta Negra	17	-	-	-

Nota: Aquellas estaciones con un * se encuentran fuera de los límites de la cuenca. Los datos de aquellas estaciones que solo presentan su estadígrafo de media fueron obtenidos desde los estudios de Golder Assosiates (2017) y SGA-Solución en Gestión Ambiental (2015), los que no presentaban el resto de los valores. Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

II.3.2.1.2 Distribución espacial de las precipitaciones a través de registros pluviométricos

Una de las metodologías utilizadas para la estimación de distribución espacial de la precipitación media sobre la cuenca contempla el cálculo del gradiente de precipitaciones obtenidas a partir de la precipitación media anual determinada en base a los registros de las estaciones pluviométricas de la cuenca Salar de Atacama. En el estudio de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) se utilizaron estaciones con al menos 32 años de registros completos, con solo dos estaciones (Coya sur y Sierra Gorda) con menos de 32 años, en un periodo comprendido entre 1979 y 2018. Se determinó que la función de mejor ajuste de la tendencia de las precipitaciones corresponde a un polinomio de segundo grado, obtenida mediante mínimos cuadrados ajustada a la precipitación media anual con respecto a al índice normalizado de la ubicación relativa de cada estación y su altura (IUA). La expresión de este indicador se presenta en la Ecuación 4 (Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)).

$$IUA = \left(\frac{E - 350.000}{200} + \frac{N - 7.000.000}{300} + z\right) * 0{,}001 \qquad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

IUA = Índice de ubicación y altura.
E = Coordenada este de cada estación en coordenadas UTM WGS 1984 huso 19S.
N = Coordenada norte de cada estación en coordenadas UTM WGS 1984 huso 19S.
Z = Elevación de la estación (m.s.n.m.).

La precipitación media anual máxima que se alcanza con este gradiente según la ubicación y la altura de la cuenca es de 320 mm/año, la cual es del orden de magnitud de las precipitaciones máximas registradas en la estación Toconce de la DGA. Para efectos de este estudio, se realizó una actualización de la información presentada en el balance hídrico de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), verificando los gradientes reportados con información actualizada a diciembre de 2019. Para esto se empleó la misma metodología obteniéndose resultados consistentes y logrando verificarse los rangos de validez de la información a utilizar en el balance hídrico. Los registros utilizados en este caso, por estación, comprenden distintos intervalos de tiempo dentro del periodo 1959-2019, con rangos variables desde la estación Monturaqui con 5 años de datos hasta las estaciones Ayquina y Calama con 48 años disponibles para obtener los promedios anuales, siendo las estaciones Peine y Talabre las de mayor larga data en la cuenca con 46 años con datos. El promedio de años de todas las estaciones utilizadas es de 37,6 años. Los resultados de este procedimiento se presentan en la Figura II-7. Con este gradiente de precipitaciones, se puede distribuir la precipitación media anual en las 17 subcuencas aportantes del Salar de Atacama (ver siguiente sección).

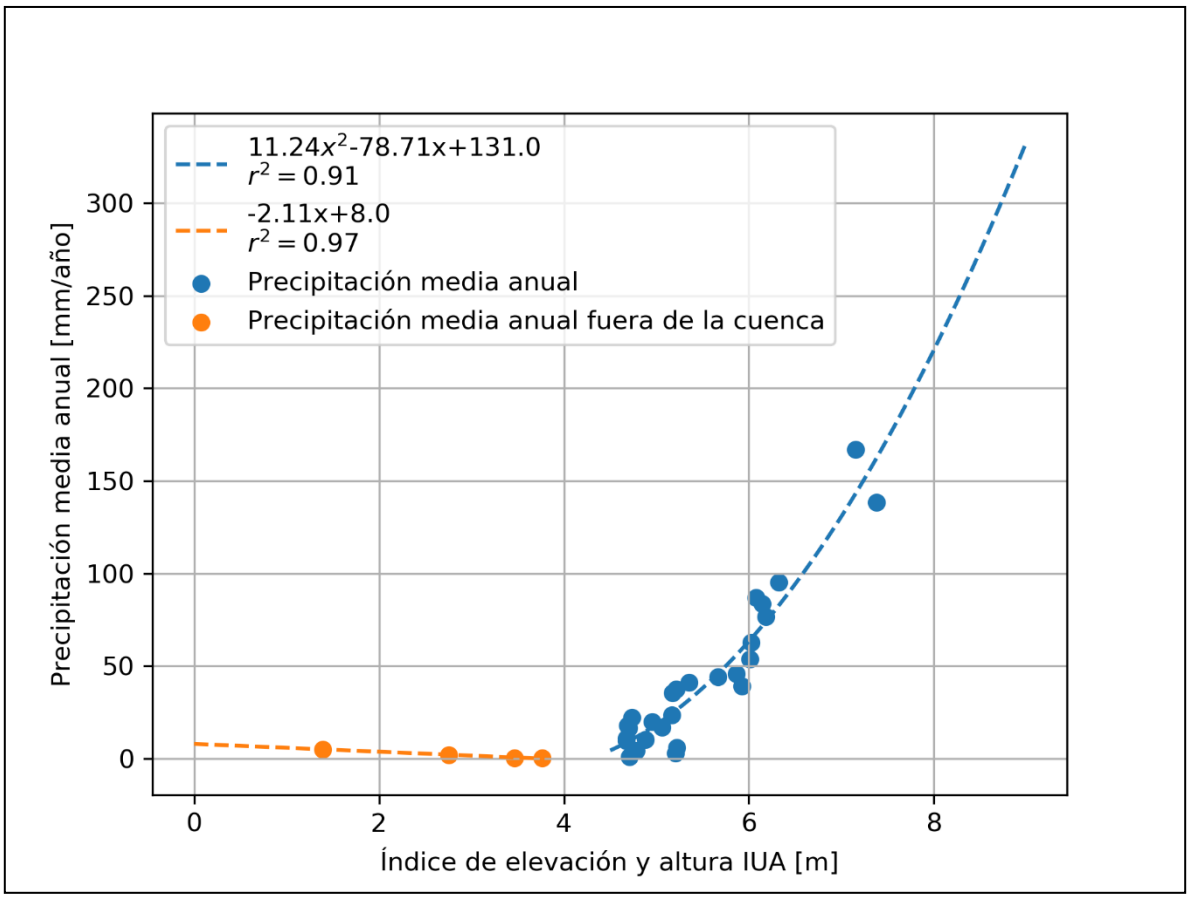


Figura II-7: Función de gradiente espacial y altitudinal de precipitaciones en base a observaciones en estaciones pluviométricas

Fuente: Elaboración propia utilizando metodología de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) e información de estaciones meteorológicas actualizadas a Diciembre 2019

De acuerdo a los registros se observa que el régimen de precipitaciones de la cuenca Salar de Atacama presenta zonas importantes con bajos niveles de precipitación con medias anuales de 19,2 mm/año en estación Peine y 78,5 mm/año promedio en estación Río Grande. Los periodos de alta intensidad se dan principalmente en el período estival debido al régimen altiplánico de la precipitación, de modo que esta se concentra particularmente en los meses de verano, en el cual los meses de febrero y marzo presentan una mayor cantidad de agua caída en la cuenca. También ocurren lluvias de menor importancia entre los meses abril y agosto debido al desplazamiento de frentes fríos. Respecto de extremos, la estación Camar, por ejemplo, tiene un mínimo anual distinto de 0, con 2 mm/año, mientras que el resto de las estaciones presentan 0 como mínimo esto puede atribuirse a ausencia de registros en días en donde ocurrió un evento de precipitación. Y acerca de las máximas precipitaciones anuales, existen tres estaciones en que en alguno(s) de los años entre 1959 y 2018 sobrepasaron los 200 mm: Río Grande (220,8), Camar (221) y Talabre (264,7).

A su vez, las precipitaciones están influenciadas por la elevación sobre el nivel del mar y por sistemas de tipo convectivo que generan lluvias en meses estivales. En el Altiplano las lluvias

con un régimen importante de agua caída comienzan a partir de los 2.000 m.s.n.m., incrementándose con la elevación hacia el oriente. Las precipitaciones que se presentan bajo este umbral de altitud son esporádicas y de baja magnitud como lo ilustra la Figura II-7. Un análisis de tendencias históricas y proyecciones futuras de los niveles de precipitación en la cuenca del Salar de Atacama se presenta en el Capítulo II.5.

II.3.2.1.3 Distribución espacial de las precipitaciones a través de productos meteorológicos grillados

En el marco de la Actualización del Balance Hídrico de Chile (DGA-U Chile-PUC, 2017) se ha desarrollado un producto meteorológico con series climáticas grilladas en celdas de 0,05°x0,05° (aprox. 5x5 km^2) llamado CR2Met. Estas series se construyen en base a información observada y técnicas de espacialización que se aplican usando estas series con covariables asociadas a la elevación, imágenes satelitales y productos de reanálisis. Este producto abarca todo Chile continental y entrega información a 3 horas en su máxima resolución temporal. La Figura II-8 muestra para el caso de precipitaciones el comportamiento medio anual de las variables en la zona en donde se ubica la cuenca Salar de Atacama. Se aprecia, tal como se comentó anteriormente, que las precipitaciones están concentradas hacia la cordillera.

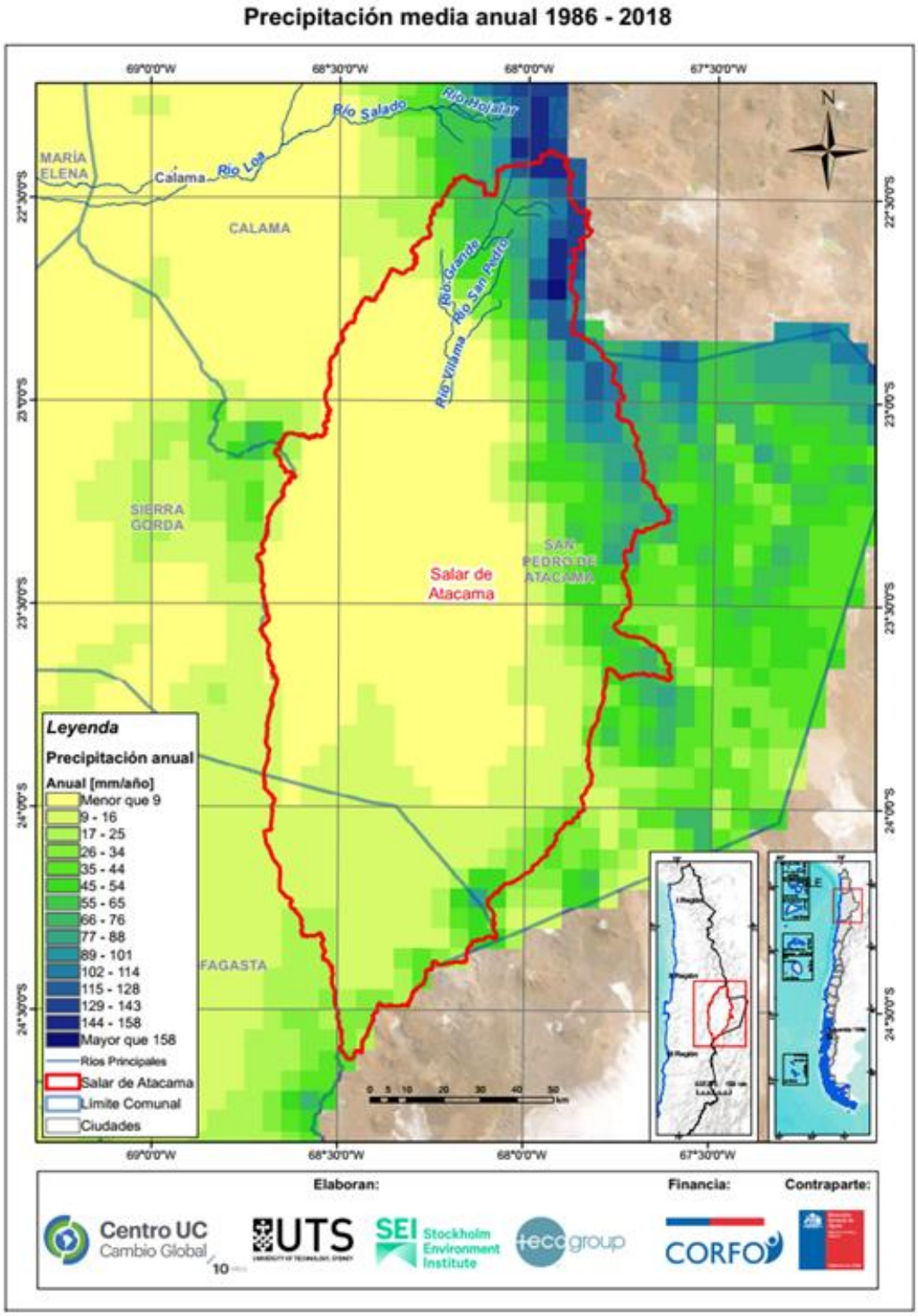


Figura II-8: Distribución de las precipitaciones en la cuenca del Salar de Atacama de acuerdo al producto CR2Met entre 1986 y 2018.
Fuente: Elaboración propia

Para verificar la validez del producto CR2Met en la cuenca del Salar de Atacama, es que se ha comparado el producto espacial de precipitaciones reportado por Comité de Minería No Metálica-Amphos (2018) con lo obtenido para las mismas celdas en el periodo más coincidente respecto del análisis basado en el IUA (1979-2018). Para ello, en primer lugar, se obtuvo el IUA de cada una de las celdas del producto CR2Met que poseen una porción de su área al interior de la cuenca (679 celdas de 0,05°x0,05°), a partir de las coordenadas de cada grilla y su elevación basado en el DEM STRM (90m), y se compararon con la precipitación media anual para el periodo descrito, de modo de corroborar la relación estadística. La Figura II-9 muestra que para valores de IUA sobre 4,5 m la relación espacial lineal entre el producto grillado de precipitación CR2Met con el indicador IUA.

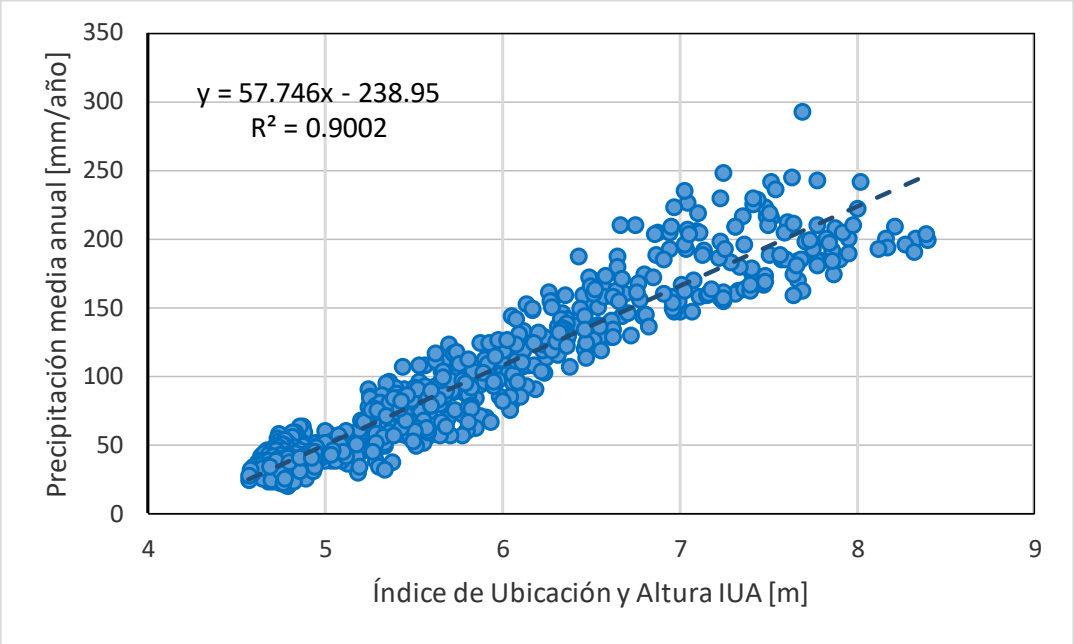


Figura II-9: Precipitación media anual del producto CR2Met versión 2 respecto del Índice de Ubicación y Altura (IUA).
Fuente: Elaboración propia

Para efectos de poder obtener series de tiempo diarias desde el producto CR2Met, como entrada para modelos hidrológicos, y conservando el patrón de distribución espacial de las precipitaciones reportado en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), es que se comparan ambos productos a escala de la resolución más gruesa (0,05°). En ese sentido, se obtuvo que existe un sesgo medio de 38,9 mm agua caída mayor el producto CR2Met respecto del de Amphos21. En términos convencionales, esto tiene sentido dado que el producto CR2met tiende sobrestimar el valor de la precipitación observada. No obstante, y para poder generar series temporales continuas en todas las celdas CR2Met que componen la cuenca para propósitos de modelación hidrológica, se debe corregir el producto de modo que la suma anual de este sea la misma que aquel reportado por Amphos21. Para ello, el primero debe ser corregido mediante un escalamiento.

Este escalamiento considera, en primer lugar, la obtención de todas las series temporales de las 679 celdas que componen la cuenca en el producto CR2Met para el periodo 1979-

2018. Luego, a cada uno de los valores, por celda, se le calcula su precipitación media anual entre 1979 y 2018, para luego promediar por celda la media anual de precipitaciones en toda la serie. Posteriormente, estos valores se multiplican por el área de cada celda en m^2 (considerando que en el interior de la cuenca el área media de las celdas de 0,05°x0,05° es de 28,44 Km^2) para obtener la lámina de agua por unidad de área. Luego estos valores por celda deben multiplicarse por el área efectiva que cada una tiene al interior de la cuenca, de modo de suprimir el efecto borde causado por la resolución espacial CR2Met. Finalmente se convierte la unidad "año" a "segundo" dividiendo para cada celda el resultado anterior por 3600*24*365. Con esto, y sumando el aporte ponderado en precipitación de cada una de las celdas se obtiene un caudal de 47.708,06 l/s. Con la relación de sobrestimación establecida, se obtiene, para cada celda CR2Met un coeficiente de escalamiento como razón entre el producto Amphos21 y el CR2Met. Como existen celdas del modelo más grueso que forman parte de la cuenca, pero no empatan con lo reportado en el modelo más fino, el coeficiente de escalamiento corresponde al de la celda más cercana.

Estos factores de conversión se aplican de forma sistemática a todos los valores de las series obtenidas desde el producto CR2Met, y se utilizan para ser agregados a nivel de subcuencas de modo de comparar ambos productos. La Tabla II-3 muestra que el producto CR2Met corregido devuelve un caudal de precipitación de 30,14 m^3/s, resultado muy similar al reportado por Amphos21 (29,02 m^3/s), cuya diferencia viene explicada por la disimilitud entre las resoluciones espaciales de ambos modelos. La correlación lineal entre ambos productos para la precipitación media y el caudal anual, dada la superficie de las 17 subcuencas es de 0,99 en ambos casos, lo que en definitiva permite concluir que el producto CR2Met escalado puede ser utilizado como insumo para modelación hidrológica, teniendo en cuenta también que a partir de las observaciones se puede corregir también el sesgo remanente.

Tabla II-3: Resultado del escalamiento para el modelo CR2Met

Subcuenca	Área (km^2)	Pp media anual Amphos21 (mm/año)	Pp media anual CR2Met escalado (mm/año)	Caudal de Pp Amphos21 (m^3/s)	Caudal de Pp CR2Met escalado (m^3/s)
1	1.196	119	125	4,51	4,73
2	754	105	110	2,51	2,64
3	1.444	96	104	4,40	4,75
4	504	92	95	1,47	1,52
5	137	23	22	0,10	0,09
6	1.502	80	87	3,81	4,16
7	2.584	49	50	4,01	4,08
8	1.444	66	70	3,02	3,22
9	296	32	39	0,30	0,36
10	1.918	29	26	1,76	1,60
11	468	17	15	0,25	0,23

Subcuenca	Área (km²)	Pp media anual Amphos21 (mm/año)	Pp media anual CR2Met escalado (mm/año)	Caudal de Pp Amphos21 (m³/s)	Caudal de Pp CR2Met escalado (m³/s)
12	1.499	26	24	1,24	1,14
13	214	18	15	0,12	0,10
14	777	20	20	0,49	0,49
15	378	16	16	0,19	0,19
16	275	12	11	0,10	0,10
17	1.618	14	14	0,72	0,74
			TOTAL	29,02	30,14

Fuente: Elaboración propia.

II.3.2.2 Escorrentía superficial

La disponibilidad de agua superficial en la cuenca Salar de Atacama en forma de escorrentía se debe principalmente a las precipitaciones y al deshielo en las zonas cordilleranas de la cuenca. Esta variable se ha estimado con anterioridad a partir de la precipitación media anual utilizando métodos como el propuesto por DGA-DIHA PUC (2009). Alternativamente se puede recurrir a un modelo de base física que incorpore de manera distribuida los procesos de precipitación, infiltración y escorrentía, considerando las variaciones topográficas y de clima, así como las distintas coberturas de suelo presentes en el área de estudio. Esta será la estrategia que se utilizará en la etapa siguiente de este proyecto debido a que permitirá evaluar la respuesta del sistema hidrológico a los cambios en su respuesta a las variaciones en el clima esperadas bajo escenarios de cambio climático. Tal como se presentará más adelante, se esperan cambios tanto en los patrones de temperatura y precipitación en el área de la cuenca, los cuales podrían afectar tanto la oferta como demanda de agua para distintos usuarios de agua, así como el balance de agua en el área del núcleo del salar hacia el futuro.

La metodología empleada para estimar la escorrentía superficial utilizado en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) se genera a partir de estimar la fracción de precipitación que no se ha infiltrado ni evaporado luego de llegar a la superficie. Para estimar esta escorrentía neta se considera la siguiente relación (Ecuación *5*).

$$Q_i = C_{e,i} \cdot Pp_i \cdot A_i \qquad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

Q_i = Caudal medio anual de escorrentía superficial de la cuenca "i" (l/s).
$C_{e,i}$ = Coeficiente de escorrentía de la cuenca "i".
Pp_i = Precipitación media anual sobre la cuenca "i" (mm/año).
A_i = Área de la cuenca "i" (km²).

Cabe destacar que la metodología de la DGA-DIHA PUC (2009) considera ajustar el factor de escorrentía ($C_{e,i}$) para mantener consistencia con las unidades físicas de las variables de la Ecuación 5. Los coeficientes de escorrentía utilizados con el fin de determinar los caudales superficiales de cada subcuenca en el Salar de Atacama se encuentran establecidos en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) y se presentan en la Tabla II-4.

Tabla II-4: Coeficientes de escorrentía utilizados por zona

Zona	CE (-)
Subcuencas aportantes al Salar	0,14
Subcuencas del Salar	0,02

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

Tal como se mencionó al principio de este capítulo, el método para determinar la escorrentía en cada subcuenca requiere conocer la distribución espacial de la precipitación media anual, la cual fue determinada mediante un gradiente espacial de precipitaciones, el cual se presenta en la Figura II-8. La metodología expuesta anteriormente permite obtener los caudales de escorrentía por subcuenca expuestos en la Tabla II-5.

Tabla II-5: Escorrentía media anual

Subcuenca	Área (km²)	Precipitación media anual (mm/año)	Caudal (l/s)
1	1.196	119	631
2	754	105	353
3	1.444	96	616
4	504	92	206
5	137	23	14
6	1.502	80	530
7	2.584	49	564
8	1.444	66	426
9	296	32	42
10	1.918	29	247
11	468	17	34
12	1.499	26	174
13	214	18	17
14	777	20	20
15	378	16	8

Subcuenca	Área (km²)	Precipitación media anual (mm/año)	Caudal (l/s)
16	275	12	4
17	1.618	14	30
Total	17.007	48*	3.884

*Corresponde al promedio anual de precipitaciones en toda cuenca.
Fuente: Comité de Minería No MetálicaAmphos21 (2018)

Los resultados de caudales de escorrentía superficial por subcuenca obtenidos utilizando esta metodología son reportados en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), para los cuales se entrega un total aproximado de 3.884 l/s, el cual tiene la capacidad de escurrir superficialmente y en parte infiltrarse al acuífero a lo largo del cauce o desembocar superficialmente al Salar de Atacama para terminar finalmente infiltrándose o siendo evaporada.

A continuación, se entregan más antecedentes respecto de mediciones de la escorrentía superficial en forma de caudal por estaciones fluviométricas y aforos esporádicos. Se entregan antecedentes adicionales en la estación San Pedro en Cuchabrachi dada la relevancia que tiene la información registrada en esta estación que se ha utilizado en ejercicios previos para calibrar parámetros de determinación de escorrentía superficial.

II.3.2.2.1 Estaciones fluviométricas y aforos

La cuenca del Salar de Atacama cuenta con 7 estaciones fluviométricas con registros semicontinuos hasta 2016 y 5 puntos de aforos sistemáticos parciales cuya ubicación se muestra en la Figura II-10, las cuales corresponden a las estaciones analizadas en el balance hídrico de la cuenca Salar de Atacama (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018). A nivel de completitud de registros de las estaciones fluviométricas, se seleccionaron aquellas estaciones que tuviesen más de un 30% de registros para el periodo 1971-2016[26]. El criterio establece la completitud del 100% si es que el número de días con registro es equivalente o mayor al valor obtenido cuando se pondera el periodo definido Ω (que puede ser 30 días en el caso de análisis mensual o 365 para análisis a escala anual) con un escalar β (que oscila entre 0 y 1), de lo contrario la calidad de la serie para el periodo definido es el número efectivo de días dividido por el producto descrito y expresado en %. De esta forma se obtiene las condiciones expresadas en la Ecuación 6.

[26] Para efectos del análisis de completitud se consideró la base de datos utilizada en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), sin perjuicio de que los valores de caudal analizados consideran la actualización de esta serie a diciembre de 2019.

$$Completitud = \begin{cases} 100\% \; si \; días \geq \Omega * \beta \; [Registro \; completo] \\ (\frac{días}{\Omega * \beta}) * 100\% \; si \; días < \Omega * \beta \; [Registro \; incompleto] \end{cases}$$ Ecuación 6

En el caso de los registros de las estaciones fluviométricas se tiene que Ω = 365 y β = 0,8. Vale decir se considera año completo con 365 y calidad 100% si es que existen al menos 365*0,8 = 292 días con registros (continuos o discontinuos). La Figura II-11 muestra lo expuesto para las principales estaciones fluviométricas de la cuenca.

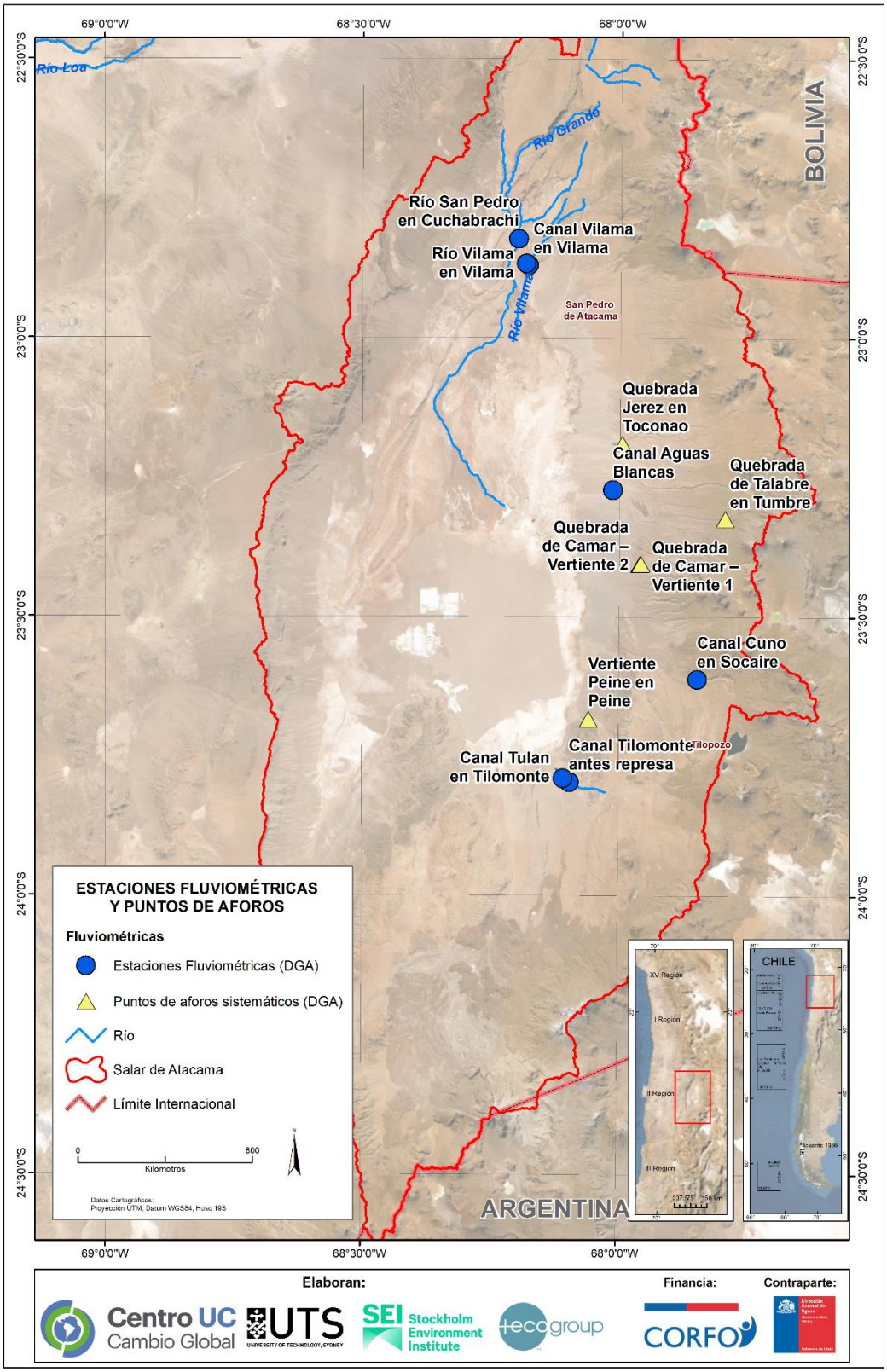


Figura II-10: Estaciones fluviométricas y puntos de aforos esporádicos
Fuente: Elaboración propia

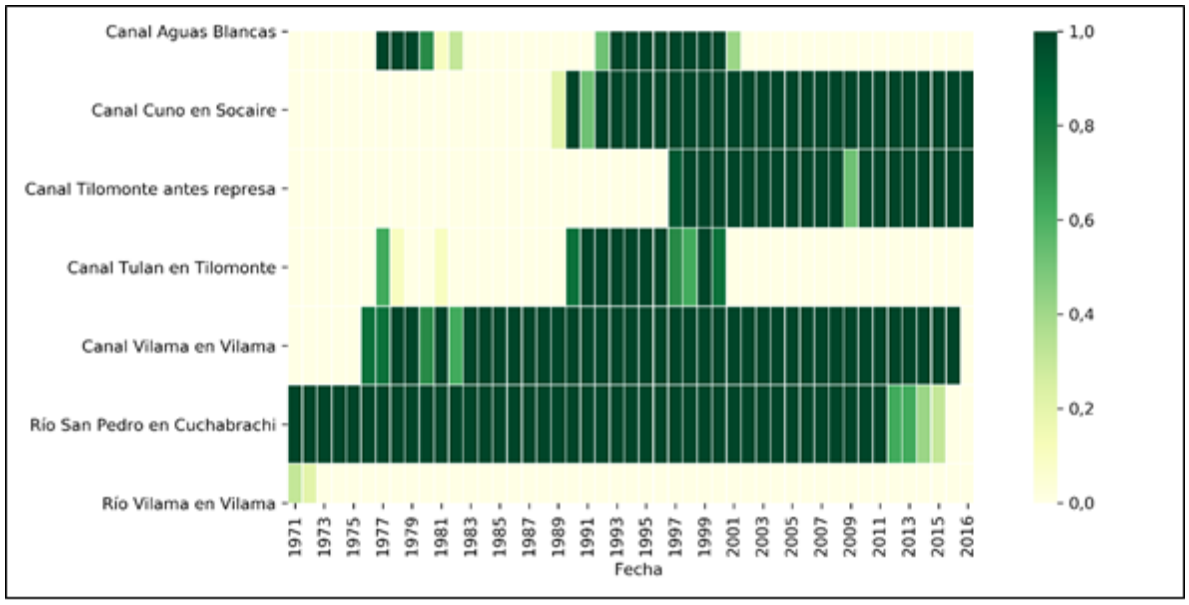


Figura II-11: Disponibilidad de la información fluviométrica

Fuente: Elaboración propia en base a Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

A partir de los registros de estaciones fluviométricas catastrados e indicados en la Tabla II-6 se obtuvieron los caudales promedios mensuales de cada estación ordenados por año hidrológico de la cuenca, el cual se considera entre diciembre y enero. Para esto se tomó como base la información contenida en el estudio Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), la cual fue actualizada a diciembre de 2019. Una vez obtenidos los caudales medios mensuales de cada estación, se elaboraron las curvas de variación estacional de cada estación fluviométrica, ajustando una función de distribución de probabilidad tipo Log-Normal o Normal para los registros que tuvieran suficiente información. Las curvas de variación estacional obtenidas en el presente diagnóstico se muestran desde la Figura II-12 a la Figura II-17 asociadas a un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia.

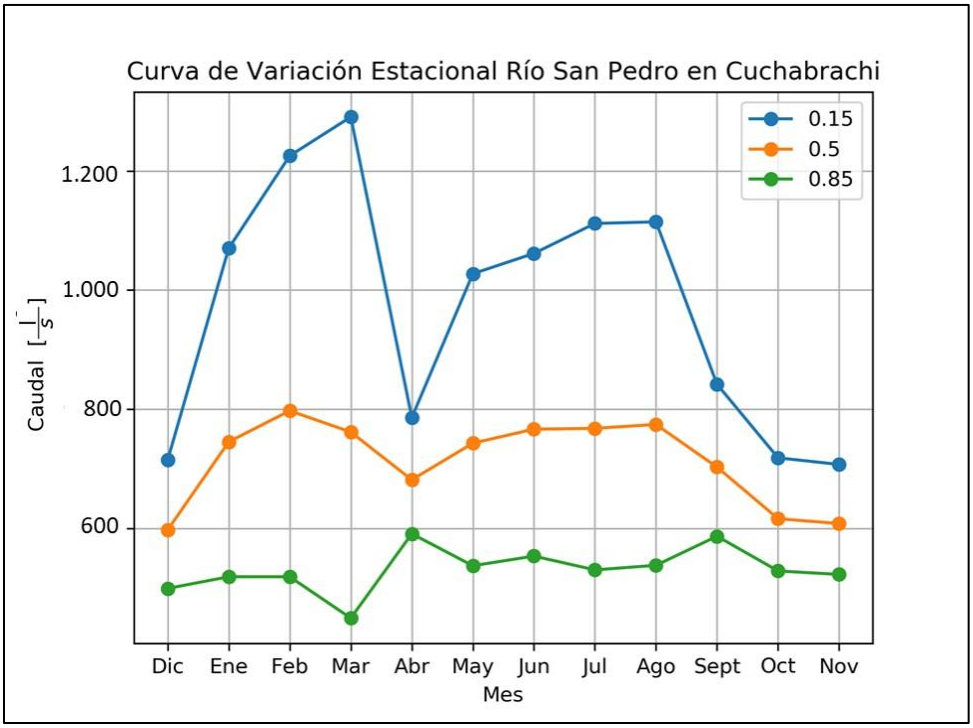


Figura II-12: Curva de variación estacional San Pedro en Cuchabrachi para un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia.

Fuente: Elaboración propia

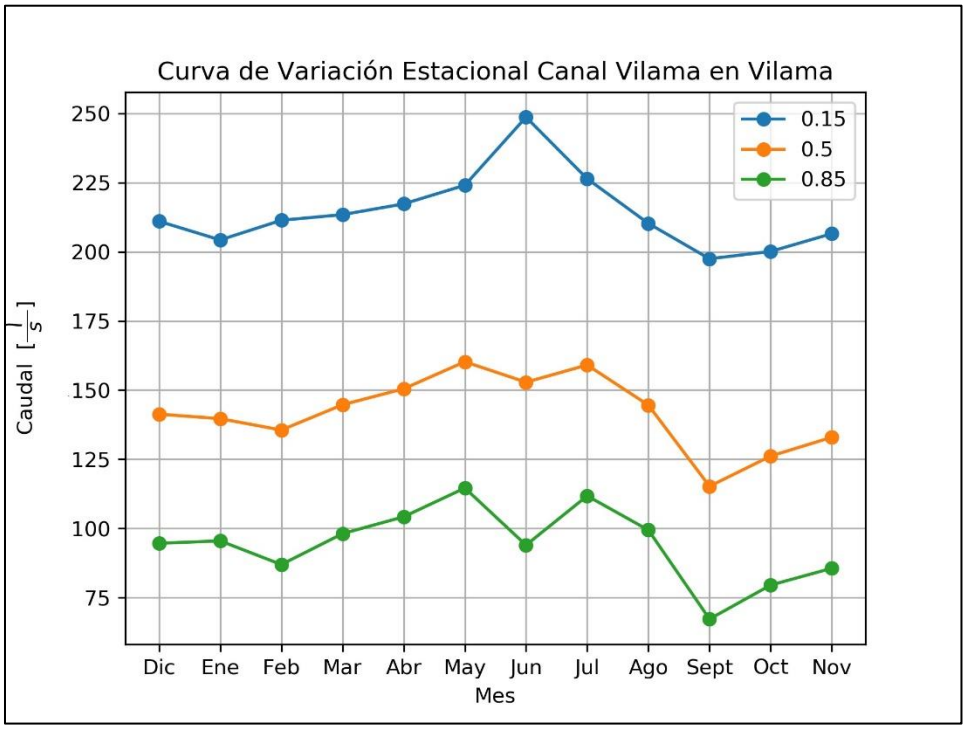


Figura II-13: Curva de variación estacional Canal Vilama en Vilama para un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia.

Fuente: Elaboración propia

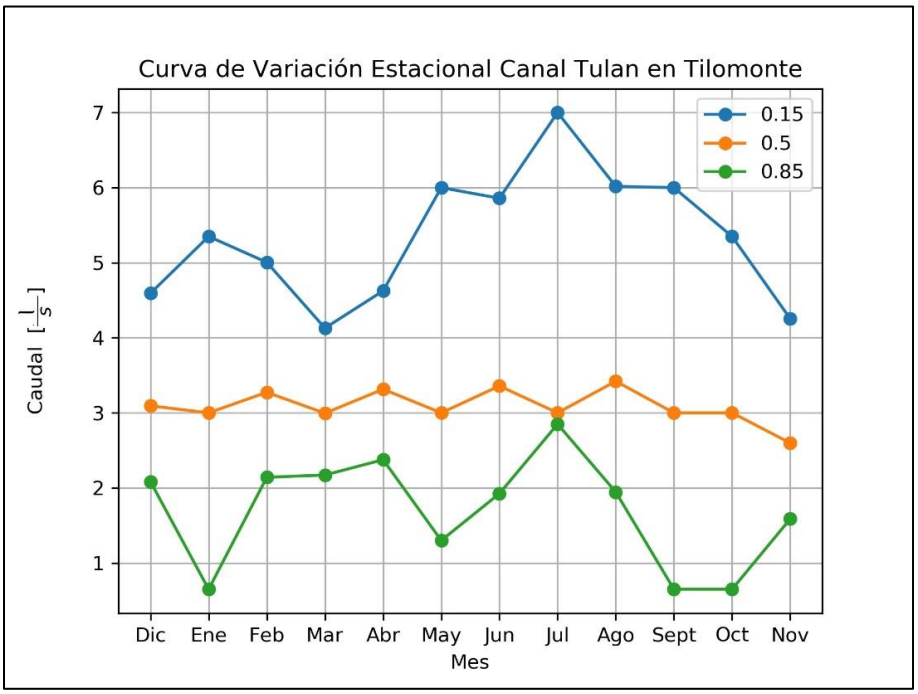


Figura II-14: Curva de variación estacional Canal Tulán en Tilomonte para un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia.

Fuente: Elaboración propia

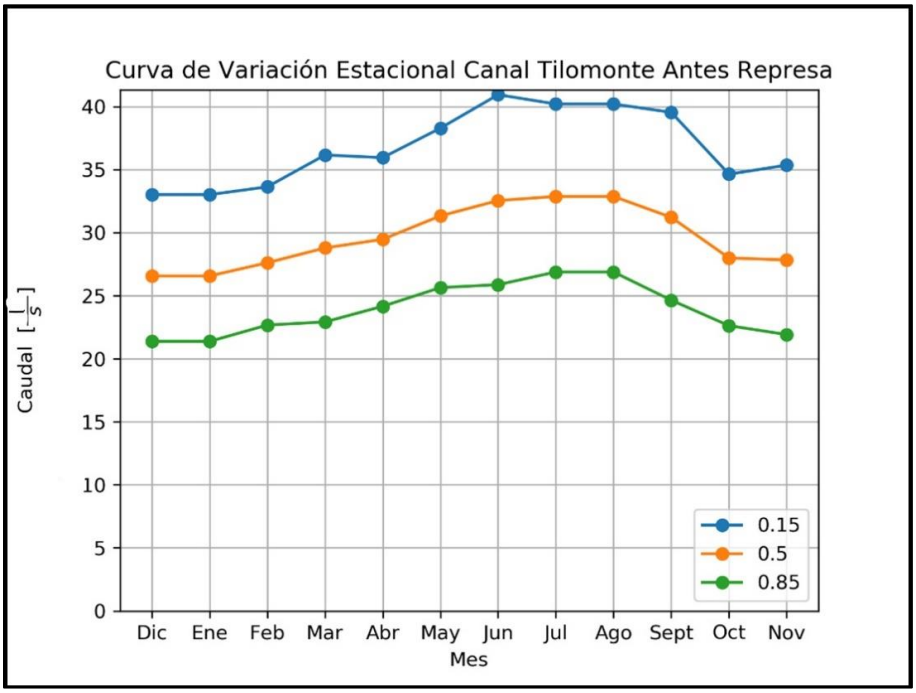


Figura II-15: Curva de variación estacional Canal Tilomonte Antes Represa para un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia.

Fuente: Elaboración propia

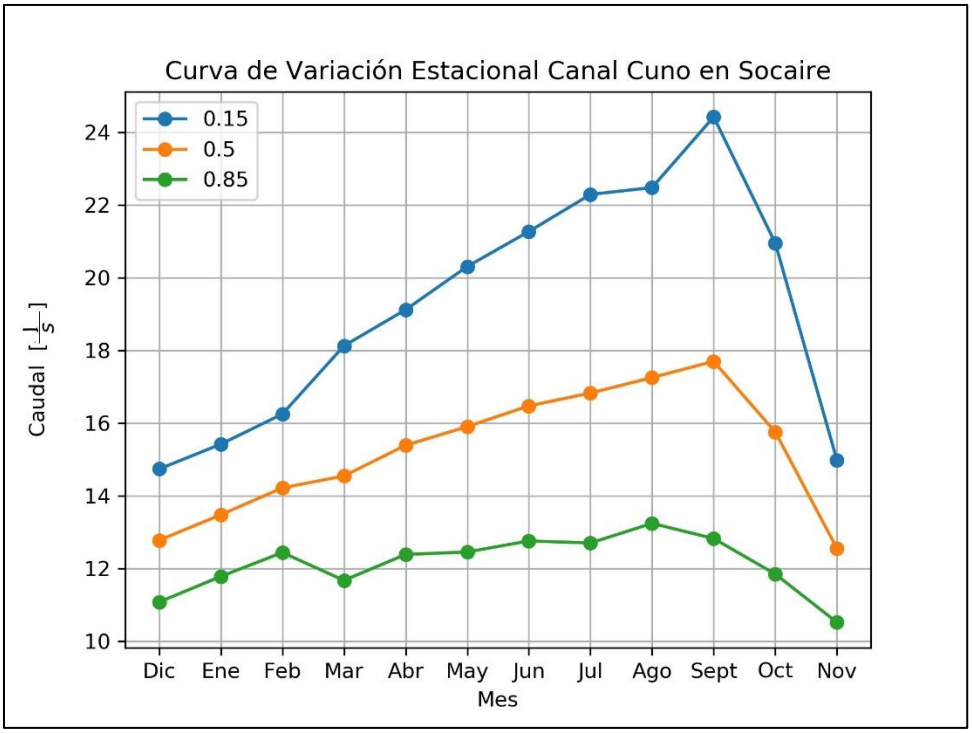


Figura II-16: Curva de variación estacional Canal Cuno en Socaire para un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia.

Fuente: Elaboración propia

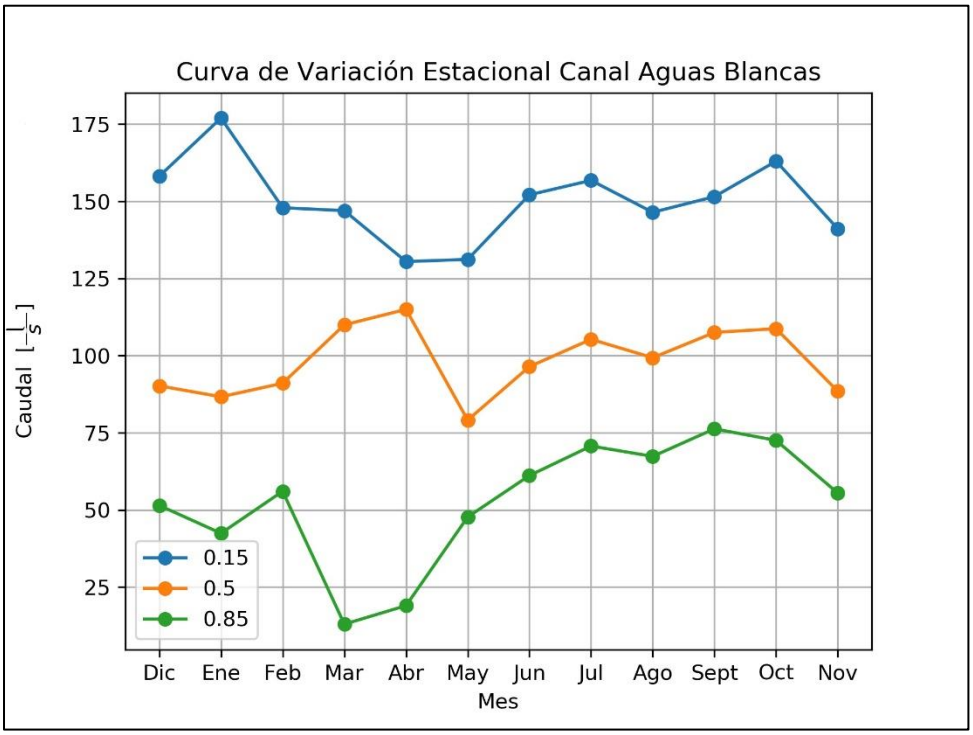


Figura II-17: Curva de variación estacional Canal Aguas Blancas para un 15%, 50% y 85% de probabilidad de excedencia.

Fuente: Elaboración propia

Tabla II-6 Caudales medios mensuales en estaciones fluviométricas (en l/s)

Mes	Canal Aguas Blancas	Canal Cuno en Socaire	Canal Tilomonte antes represa	Canal Tulán en Tilomonte	Canal Vilama en Vilama	Río San Pedro en Cuchabrachi
Diciembre	100	136	27	29	149	800
Enero	99	143	28	36	148	888
Febrero	92	149	30	31	155	1.033
Marzo	90	158	30	35	160	688
Abril	88	164	32	32	168	809
Mayo	105	170	33	38	166	825
Junio	113	175	34	40	168	855
Julio	106	179	34	39	154	865
Agosto	113	186	32	29	128	714
Septiembre	116	164	29	29	137	624
Octubre	96	127	29	29	144	615
Noviembre	101	129	27	33	151	607

Fuente: Elaboración propia a partir de información DGA.

La información de aforos puntuales reportados en el estudio CNR (2014) realizados en algunas quebradas y áreas no instrumentadas de la cuenca, permite mejorar la caracterización de los caudales en distintos puntos de la cuenca. A partir de los registros de caudales medidos en dichas estaciones, se observa que la mayoría corresponde a escorrentías menores a 100 l/s, las cuales responden a lluvias estivales y en menor medida a la respuesta a las precipitaciones de invierno. Se caracterizan relevantes flujos base en las áreas intermedias de la cuenca del Río San Pedro y Río Grande en el área norte de la cuenca. Los estadígrafos de caudales de aforo, tanto de la DGA como de la campaña de medición de CNR (2014), se muestran en la Tabla II-7.

Tabla II-7: Caracterización de aforos de caudales puntuales medidos en la cuenca.

Aforo	Promedio (l/s)	Mínimo (l/s)	Máximo (l/s)
Vertiente Peine En Peine	7,5	1	15
Quebrada De Camar - Vertiente 1	6	1	18
Quebrada De Camar - Vertiente 2	12	2	20
Quebrada De Talabre En Tumbre	12	1	40
Quebrada De Jerez En Toconao	60	11	82
Quebrada Zapar	7	-	-
Quebrada Potor	30	-	-
Quebrada Socor	6	-	-

Fuente: Elaboración propia y aforos extraídos de CNR (2014)

II.3.2.2.2 Caudales naturalizados en San Pedro en Cuchabrachi

Si bien la estación de San Pedro en Cuchabrachi tiene la mayor serie histórica de registros fluviométricos, su uso para correlacionar con otros caudales en la cuenca del Salar de Atacama es complejo debido a que la variación de dicho flujo depende fuertemente de procesos hidrológicos como infiltraciones y afloramientos propios de esta subcuenca (el Capítulo II.3.2.2.3) y que la subcuenca de la localidad de San Pedro de Atacama se encuentra intervenida por extracciones de agua para distintos usos. Para subsanar esto, en el estudio de CNR (2014) se generaron series sintéticas de escorrentía superficial para la estación fluviométrica de San Pedro en Cuchabrachi.

La metodología consiste en correlacionar la escorrentía anual con la precipitación anual, en aquellos años que se cuenta con información completa. Posteriormente se procedió a distribuir la escorrentía anual según la distribución mensual de los caudales, de esta manera se ajustó un modelo del siguiente tipo:

$$E_s = f(Pp_t\ ,\ Pp_{t-1}) \qquad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

E_S = Escorrentía anual (mm/año)
Pp_t = Precipitación del año t (mm/año).
Pp_{t-1} = Precipitación del año t-1 (mm/año).

La distribución mensual en aquellos años sin información se realizó mediante la distribución mensual de la escorrentía anual en los años que se cuenta con información en San Pedro en Cuchabrachi. De esta forma se obtienen los caudales medios anuales naturalizados generados sintéticamente (Figura II-18). Es importante destacar que el periodo de tiempo considerado en este gráfico, solo incluye la ventana de tiempo usada en el proceso de naturalización de los caudales en la estación y no toda la disponibilidad de datos considerados en este estudio.

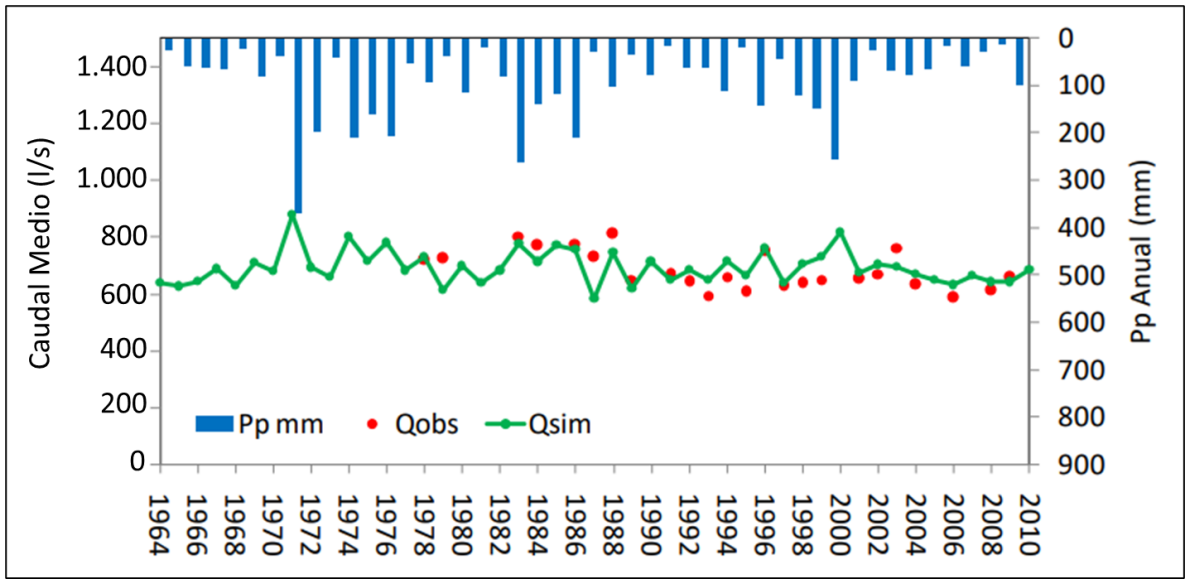


Figura II-18: Caudales medios anuales en San Pedro en Cuchabrachi generados sintéticamente(verde) versus observados (rojo)
Fuente: CNR (2014).

Luego, al ponderar por la razón de caudales medios mensuales de un año que sí se cuenta con información fluviométrica mensual para la estación fluviométrica San Pedro en Cuchabrachi, se obtuvieron los caudales medios mensuales en dicho punto.

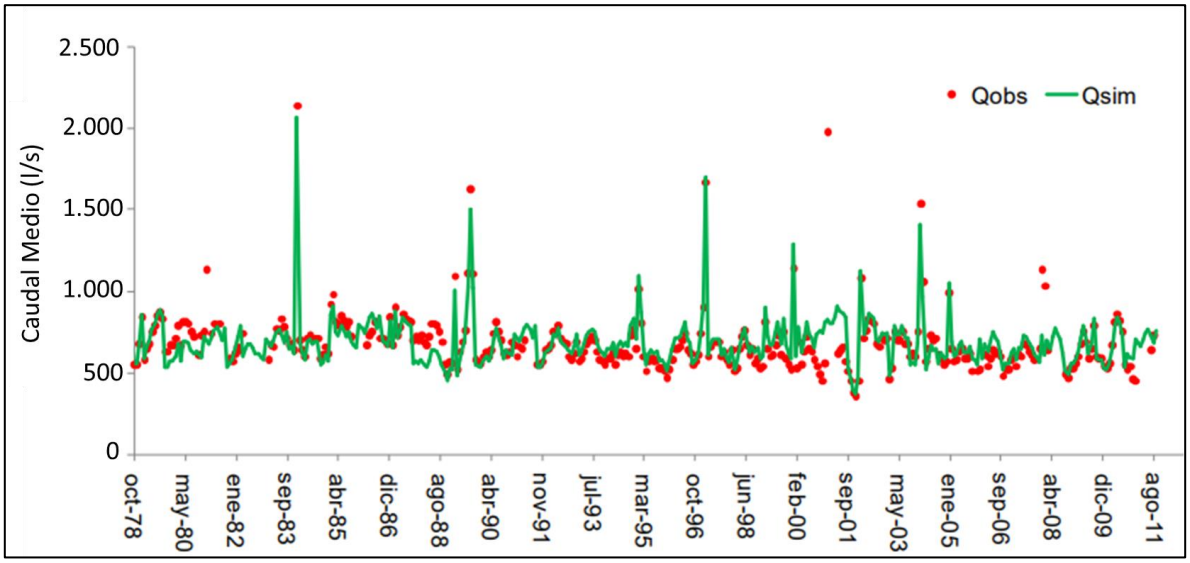


Figura II-19: Caudales medios mensuales generados sintéticamente (verde) versus observados (rojo)
Fuente: CNR (2014).

Cabe mencionar que los caudales simulados no incorporan las extracciones realizadas aguas arriba del Río Grande y que subestiman la producción real de la cuenca, por lo que CNR (2014) corrigió la serie de caudales medios mensuales sintéticos sumándoles el caudal extraído por riego, de esta forma la expresión para corregir dicho caudal queda dada por:

$$Q_{SPCN} = \mathrm{Q_{SPC}} + \mathrm{Q_r}$$ Ecuación 8

Donde:
Q_{SPCN} = Caudal naturalizado en San Pedro en Cuchabrachi (l/s).
Q_{SPC} = Caudal en San Pedro en Cuchabrachi sin extracciones (l/s).
Q_r = Caudal de riego (l/s).

El caudal de riego mensual se estima como la demanda antrópica efectiva en el Río Grande, aguas arriba del Río San Pedro de Atacama.

A modo de diagnóstico, se observa que los caudales obtenidos para estimar la escorrentía superficial en el balance hídrico de la cuenca Salar de Atacama (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018), y los cuales fueron presentados en la Tabla II-5, mantienen el orden de magnitud de los registros fluviométricos y de los aforos presentados en esta sección, validando tanto la metodología utilizada como los resultados obtenidos. Cabe destacar que los procesos de deshielo no fueron considerados en el balance hídrico consolidado de la cuenca Salar de Atacama (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018), pero sí son analizados en otros estudios de balance hídrico (DGA, 2010 y DGA-U Chile-PUC, 2017). Este componente de la hidrología en las áreas de las cabeceras de cuencas, en particular en la de San Pedro en Cuchabrachi, ha sido descrito en otros trabajos y hay evidencia empírica de que existe acumulación de nieve a partir del análisis de imágenes satelitales en el marco del estudio.

II.3.2.2.3 Interacción entre ríos y acuíferos

Tal como se constató a partir de los antecedentes expuestos en la Etapa I, los principales afluentes al Salar de Atacama corresponden a los ríos San Pedro y Vilama (Figura II-20). Estos ríos presentan un escurrimiento permanente y se caracterizan por poseer un área aportante mayor que las quebradas que drenan al Salar de Atacama. Los principales tributarios del Río San Pedro son el Río Grande y el Río Salado, mientras el principal tributario del Vilama es el Río Puritama. El escurrimiento de estos ríos en las subcuencas de la zona norte del Salar de Atacama se encuentra influenciado por su interacción con los acuíferos, la cual presenta zonas de infiltración, donde se produce una recarga desde el río al acuífero, alternadas con zonas de afloramientos, donde el acuífero recarga al río. La interacción entre el río y el acuífero en estas zonas es dinámica en el tiempo y para evaluar este comportamiento se deben realizar campañas de aforo.

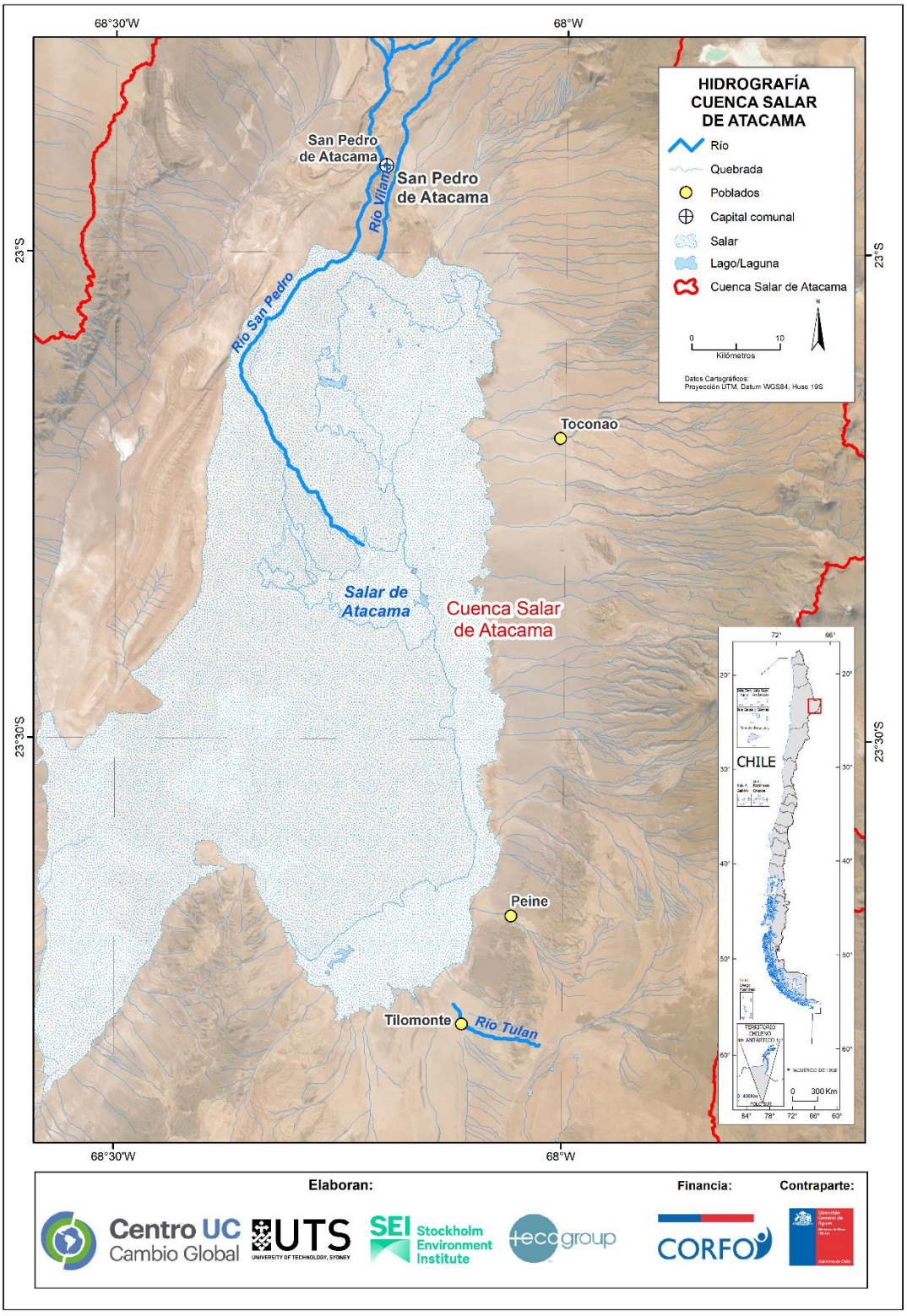


Figura II-20: Hidrografía de la cuenca del Salar de Atacama, indicando sus principales afluentes y poblados.

Fuente: Elaboración propia.

La interacción entre los ríos mencionados y el sistema subterráneo se presenta en CNR (2014) a partir de aforos realizados en 1997 y 2013 en la cuenca del Río San Pedro, aguas arriba de la estación de aforo San Pedro en Cuchabrachi. La Figura II-21 muestra las zonas de infiltración y afloramiento de los ríos mencionados anteriormente catastradas durante 1997, donde se observa que las principales recargas por infiltración provienen desde aguas arriba de la estación Río San Pedro en Cuchabrachi, y se producen principalmente en el Río Grande, Río Jauna y Río Salado, mientras que el mayor afloramiento desde el sistema subterráneo se produce aguas abajo de la confluencia entre el Río San Pedro, Río Grande y Río Salado.

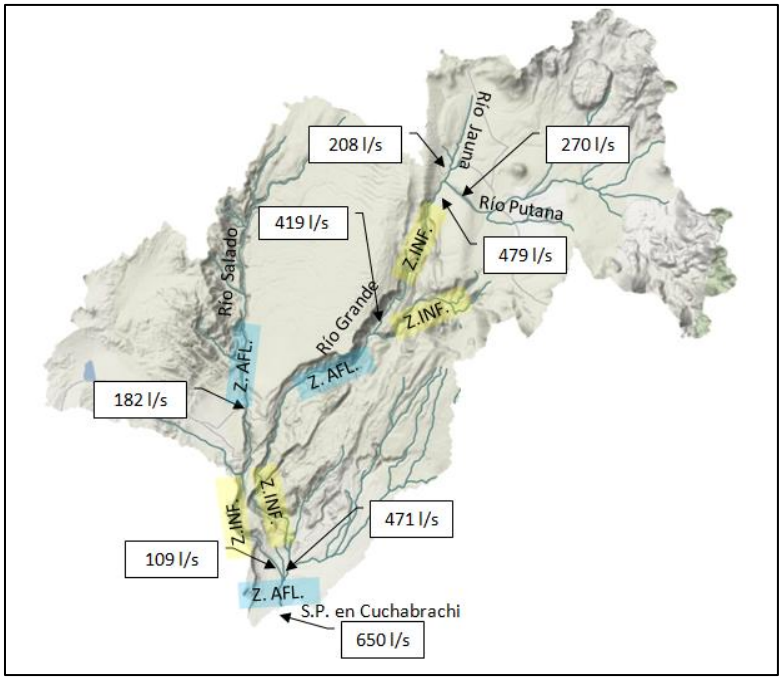


Figura II-21: Zonas de infiltración y afloramiento del Río San Pedro, obtenidas a partir de campañas de aforo de septiembre de 1997.
Fuente: CNR (2014)

A su vez, la Figura II-22 muestra los resultados obtenidos a partir de la campaña de aforo de 2013 (CNR, 2014), donde se observa que se mantienen las zonas de interacción entre los ríos y acuíferos, pero cambia la magnitud de las zonas preferentes donde se producen los flujos de infiltración y afloramientos. Cabe destacar que la principal infiltración aguas arriba de la confluencia de los ríos Grande, Río Salado y Río San Pedro produce afloramientos aguas abajo, los que componen parte importante del flujo base del caudal, manteniendo el caudal medio mensual registrado en la estación del Río San Pedro en Cuchabrachi.

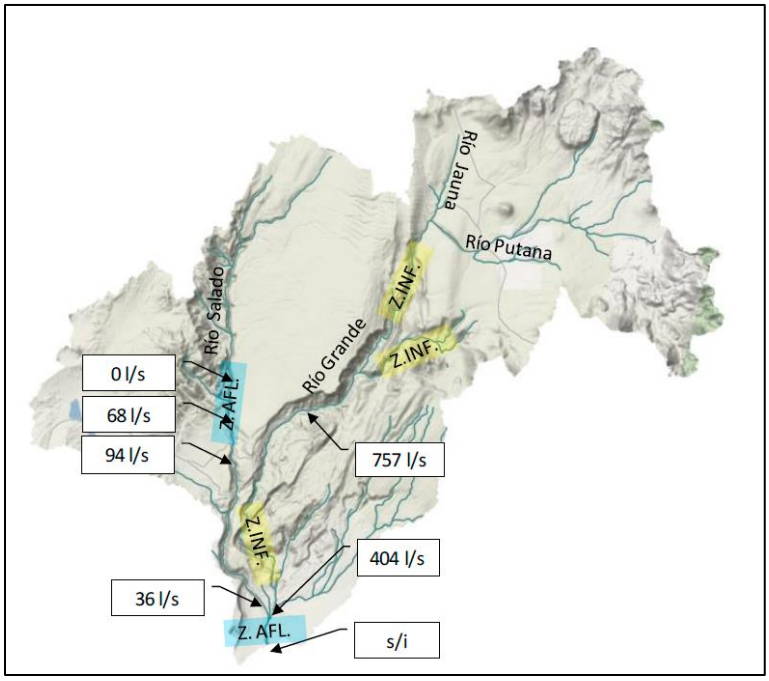


Figura II-22: Zonas de infiltración y afloramiento obtenidas a partir de campañas de aforo de septiembre de 2013.
Fuente: CNR (2014)

Aguas abajo del punto de control de la estación de San Pedro en Cuchabrachi, el Río San Pedro genera un delta en su desembocadura, conformado por depósitos aluviales, mientras que el Río Vilama se infiltra y desaparece al sur de la localidad de San Pedro de Atacama, debido a la actividad extractiva y a la mayor conductividad hidráulica de la zona de desembocadura.

Aguas abajo del delta del Río San Pedro se observan afloramientos en forma circular (Figura II-23), los cuales dejan en evidencia la existencia de un movimiento de flujos verticales, los cuales se ven favorecidos por tres fenómenos: el primero corresponde la recarga superficial del río hacia el acuífero originada aguas arriba, lo que se suma a una mayor conductividad hidráulica de las zonas fracturadas del acuífero de esta zona (ver Capítulo I.4.3.4) y por último un gradiente de densidad producto de la concentración de sales de las aguas subterráneas en el Salar de Atacama que ha sido estudiado especialmente en torno a los sistemas lagunares de mayor relevancia en el Salar de Atacama (ver Figura II-24).

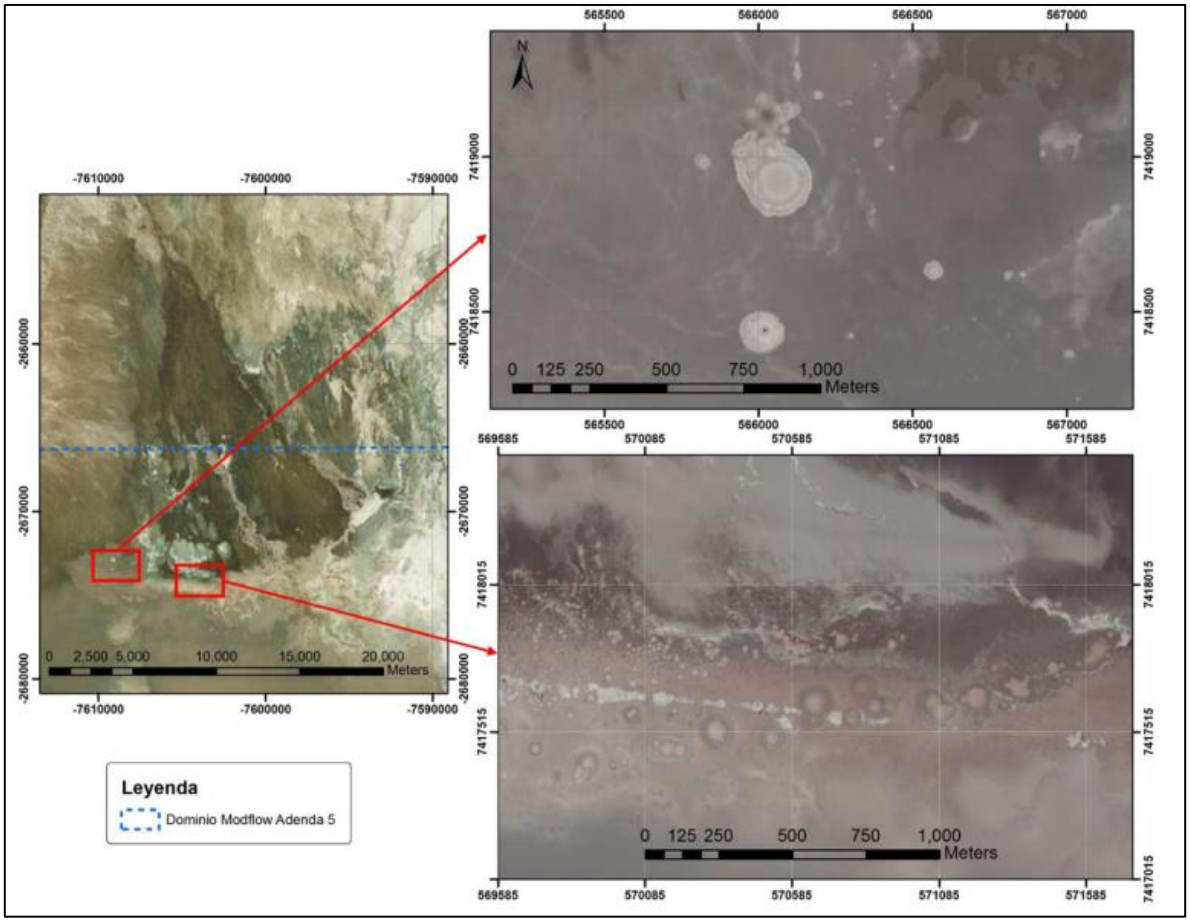


Figura II-23: Afloramientos en el Delta del Río San Pedro.
Fuente: SGA (2015)

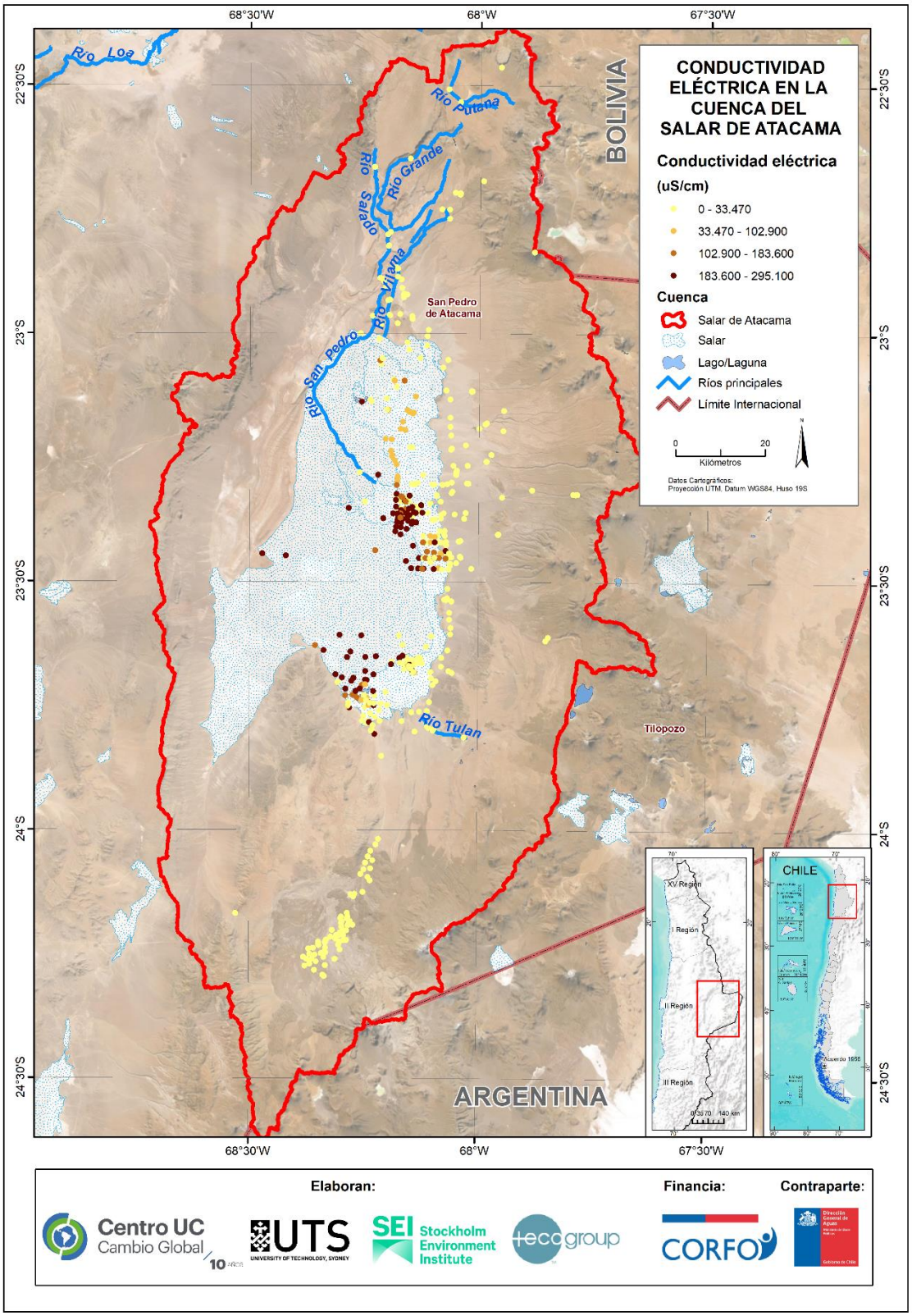


Figura II-24: Monitoreo de conductividad eléctrica en la cuenca del Salar de Atacama
Fuente: Elaboración propia en base a Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

El Río Tulán corresponde al otro río principal afluente al Salar de Atacama en su zona sur de acuerdo a lo catastrado en el Informe 1 de este proyecto (Figura II-20). A partir del análisis de imágenes satelitales en distintas épocas del año, se observan zonas con vegetación hacia aguas arriba de la estación DGA Canal Tulán en Tilomonte, las cuales se alimentan del caudal de escurrimiento de este río y desaparecen en su totalidad en el punto de infiltración del río.

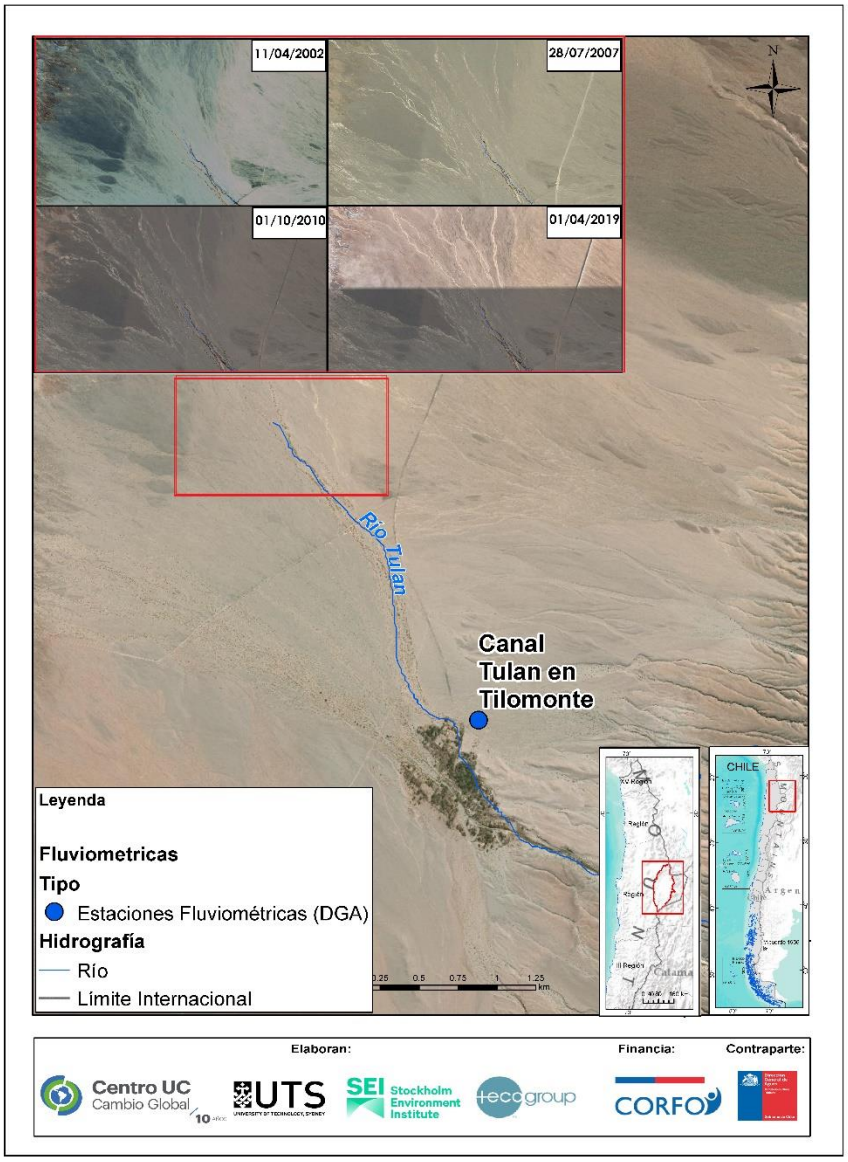


Figura II-25: Imágenes satelitales entre 2002 y 2019 de la zona de infiltración del Río Tulán
Fuente: Elaboración propia

II.3.2.3 Evaporación

Las salidas por flujos evaporativas superficiales presentes en la cuenca Salar de Atacama se dividen en evapotranspiración desde zonas cubiertas por vegetación y evaporación de

precipitaciones. La metodología utilizada para estimar la evaporación presentada en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) consiste en calcular dichas tasas a partir de los registros de evaporación de tanque y distribuir dichos flujos en la cuenca a partir de gradientes de evaporación elaborados en función de mediciones de evaporación regionales.

II.3.2.3.1 Evapotranspiración

La información utilizada por Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) para estimar la evapotranspiración en zonas con cobertura de vegetación corresponde a la red de monitoreo de evaporación en el área de estudio, la cual comprende información de estaciones de evaporación de tanque tanto de propiedad de la DGA e información pública de registros de instituciones privadas, considerando registro tanto dentro como en zonas adyacentes de la cuenca Salar de Atacama. Estas estaciones se describen en la Tabla II-8.

Tabla II-8: Estaciones de evaporación de tanque consideradas en el análisis.

Código BNA	Nombre Estación	Lat	Long	Elevación (m s.n.m.)	Fuente
02104010-K	Chiu-Chiu	-22,3381	-68,6367	2.524	DGA
02105015-6	Turi	-22,2411	-68,2880	3.070	
02105016-4	Linzor	-22,2300	-68,0227	4.100	
02105017-2	Toconce	-22,2595	-68,1733	3.310	
02105021-0	Caspana	-22,3370	-68,2122	3.260	
02105022-9	El Tatio	-22,3714	-68,0133	4.370	
02110013-7	Calama	-22,4497	-68,9044	2.300	
02112009-K	Coya Sur	-22,3942	-69,6225	1.250	
02500016-1	Toconao Experimental	-23,1892	-67,9977	2.500	
02500019-6	Socaire	-23,5873	-67,8925	3.251	
02500020-K	Peine	-23,6845	-68,0580	2.460	
02510006-9	San Pedro de Atacama	-22,9056	-68,2002	2.450	
02660001-4	Monturaqui	-24,3417	-68,4353	3.430	
02710002-3	Baquedano	-23,3339	-69,8398	1.032	
02710003-1	Antofagasta	-23,5978	-70,3867	50	
-	Planta SCL (agua salina)	-23,6262	-68,3334	2.306	SGA (2015)
-	Planta SCL (salmuera)	-23,6262	-68,3334	2.306	SGA (2015)

Código BNA	Nombre Estación	Lat	Long	Elevación (m s.n.m.)	Fuente
-	Chaxas SQM	-23,2913	-68,1884	2.307	SGA (2015)
-	Salar SQM	-23,5361	-68,4024	2.306	SGA (2015)

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

La Figura II-26 muestra la completitud de la información de registros de evaporación de balde, utilizados para estimar las salidas de agua superficial del balance hídrico de la cuenca desarrollado por Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

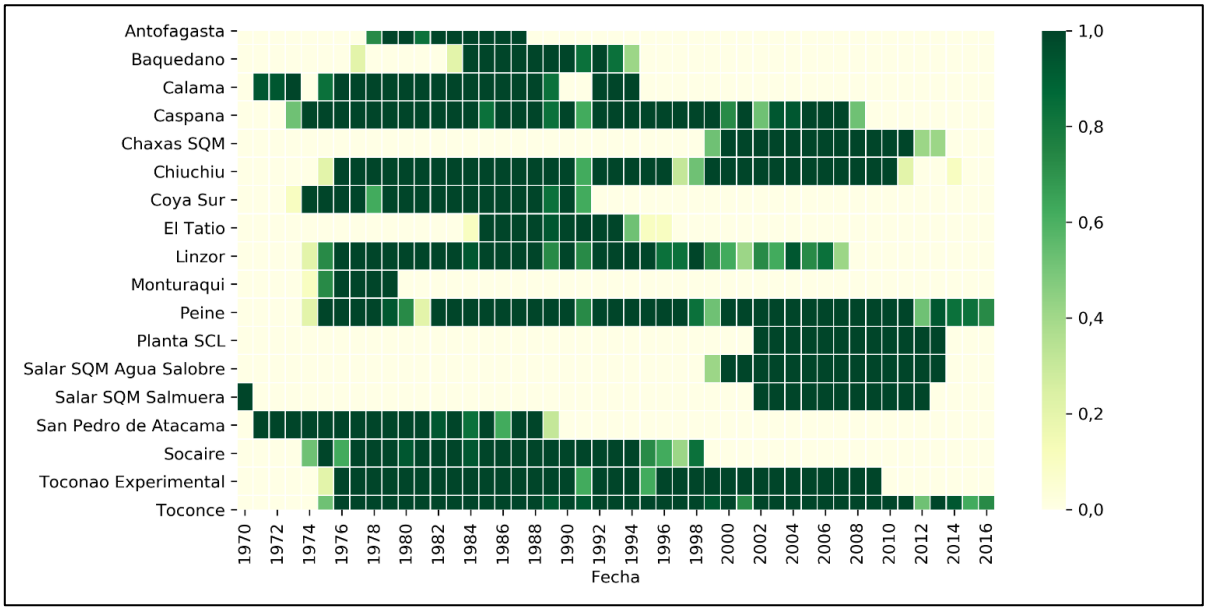


Figura II-26: Disponibilidad de los registros de evaporación.

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

A partir de la información recopilada de registros de evaporación de bandeja media mensual, se calculó el promedio de la tasa de evaporación de balde de manera mensual y se graficaron dichas series en función del mes correspondiente, ordenados por año hidrológico, identificando cada estación de medición. Estos resultados se grafican en la Figura II-27. De esta forma, la metodología de estimación del balance hídrico de la cuenca (Comité de Minería No Metálica-Amphos, 2018), permite evaluar la variación de la tasa de evaporación en el tiempo.

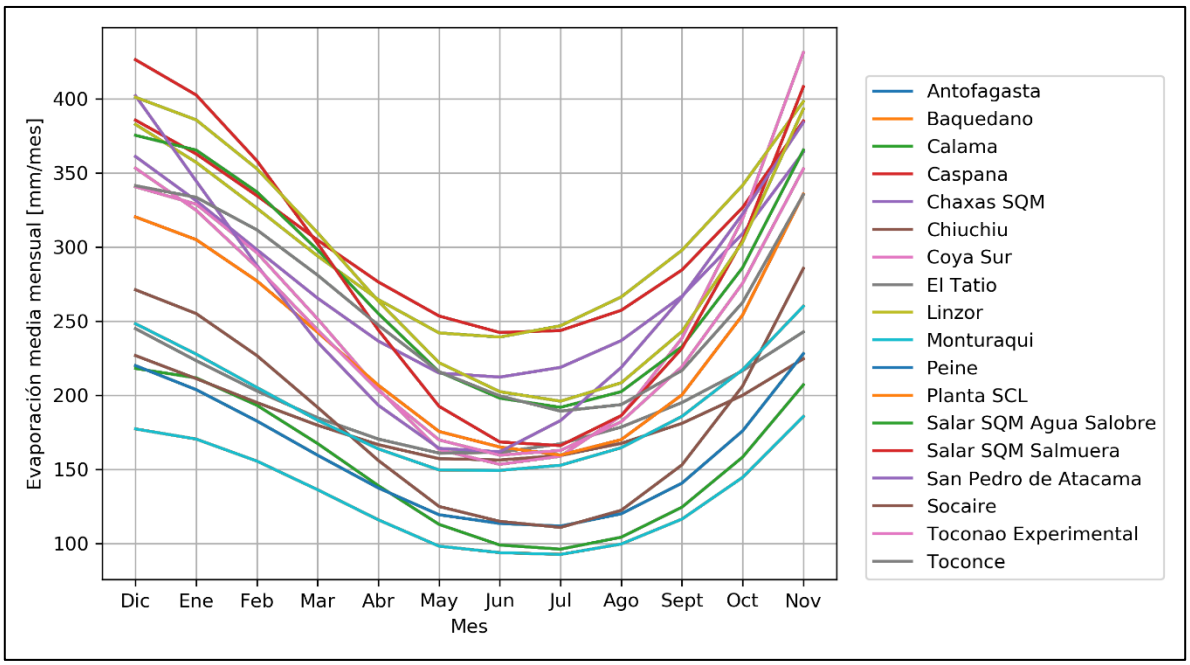


Figura II-27: Tasas de evaporación media mensual en estaciones DGA.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

A partir de la tasa de evaporación media presentada en la Figura II-27 se observa una variación estacional de este flujo debido a la variación de la radiación solar a lo largo del año. Cabe destacar que la evaporación de las estaciones Linzor y Antofagasta presentan una baja tasa de evaporación media mensual debido a que la evaporación es menor en la parte baja y la parte alta del norte de Chile, esto es bajo los 1.000 m.s.n.m. y sobre los 3.000 m.s.n.m., respectivamente.

Gradientes de evaporación

Una vez determinada la tasa evaporación media mensual calculada en base a los registros puntuales de estaciones de medición de evaporación de tanque de la DGA y privadas, se debe distribuir dicha tasa en toda la cuenca, según la metodología expuesta en el acápite II.3.2.3. El balance hídrico de la cuenca Salar de Atacama desarrollado en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) utiliza para ello el gradiente de evaporación promedio anual en función de la altura presentado en el informe de DGA-DIHA PUC (2009), el cual se obtuvo a partir de registros de estaciones de evaporación de tanque de la I, II, III y XV región, y se presenta en la Figura II-28.

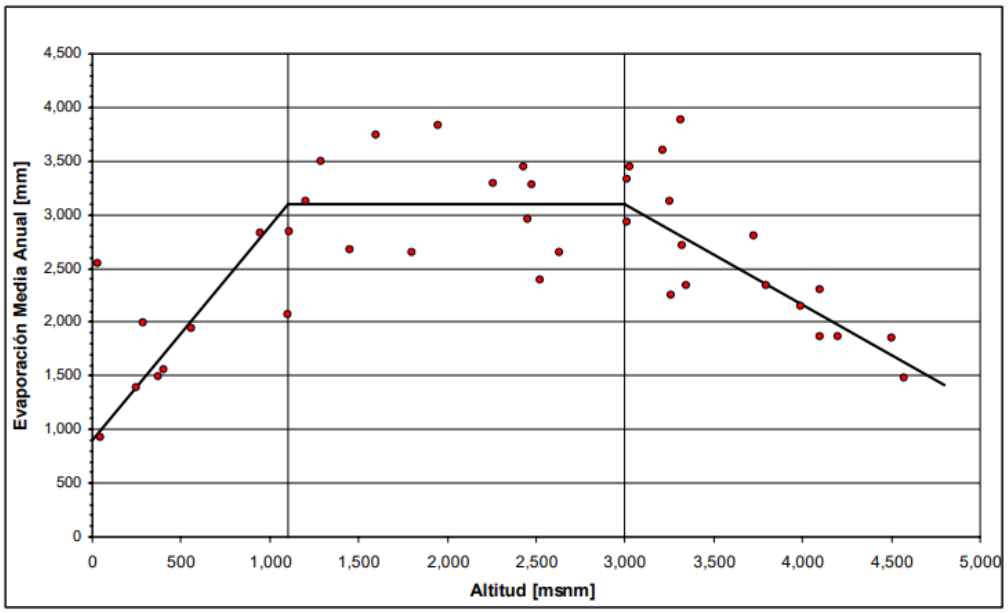


Figura II-28: Gradiente de evaporación media anual.
Fuente: DGA-DIHA PUC (2009)

De esta forma, se obtiene una relación para estimar la evaporación de bandeja en función de la altura para la cuenca Salar de Atacama. Luego, la división de la cuenca en intervalos de elevación topográfica (bandas) permite distribuir la tasa evaporación en toda la cuenca Salar de Atacama en función de una misma altura.

Cabe mencionar que el uso de este gradiente de evaporación media anual tiene aplicabilidad a escala regional, con el motivo de realizar el balance hídrico de la cuenca completa. Solo en el caso de requerir en las etapas posteriores de este estudio de un análisis de la evaporación a nivel local, se cuenta con información adicional de gradientes de evaporación locales en la cuenca del Salar de Atacama, presentados en los estudios de SGA (2015) y Golder (2017). La información complementaria proveniente de estos estudios con las tasas de evaporación a nivel mensual en relación con la altura, considerando las estaciones de la Tabla II-8, se muestran de la Figura II-29 a la Figura II-31

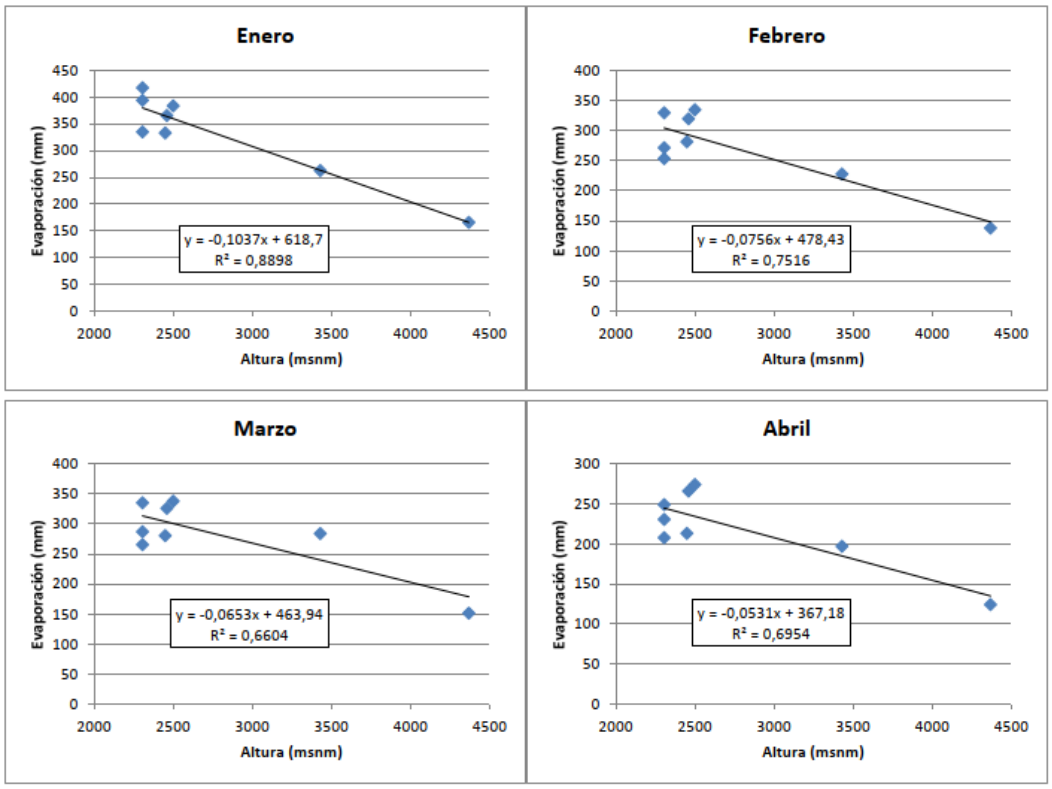


Figura II-29: Gradientes altitudinales de evaporación mensua de enero a abril.
Fuente: SGA (2015)

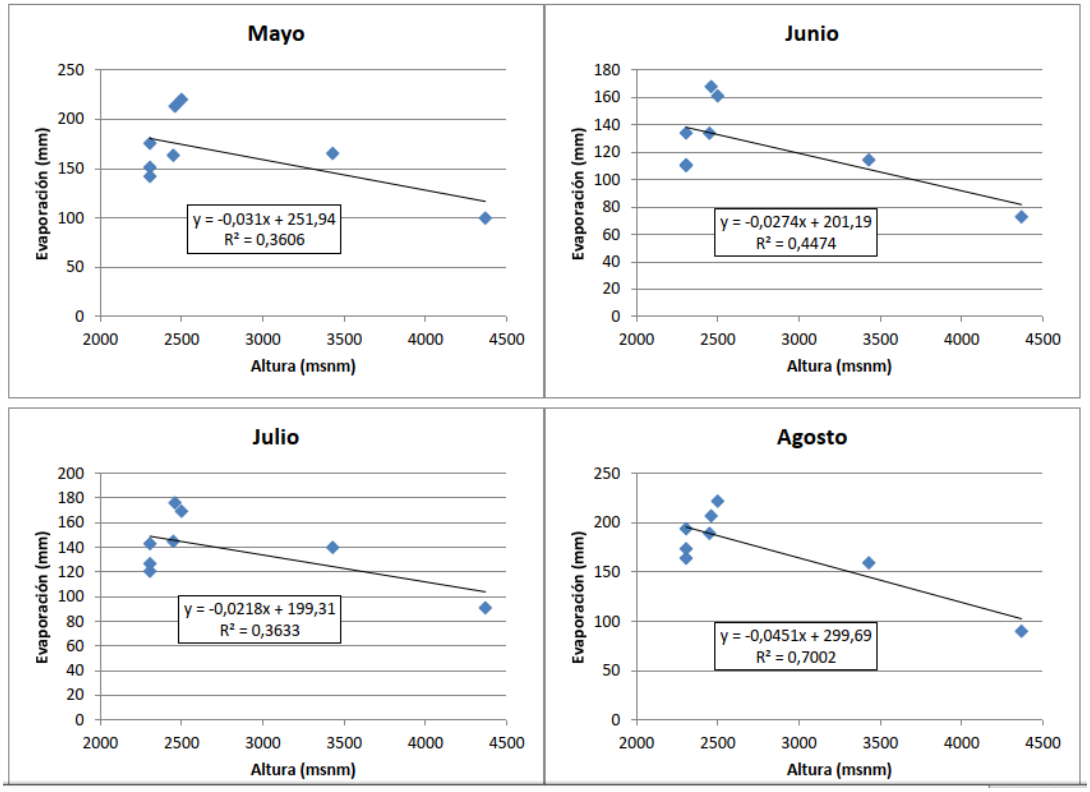


Figura II-30: Gradientes altitudinales de evaporación mensual de mayo a agosto.
Fuente: SGA (2015)

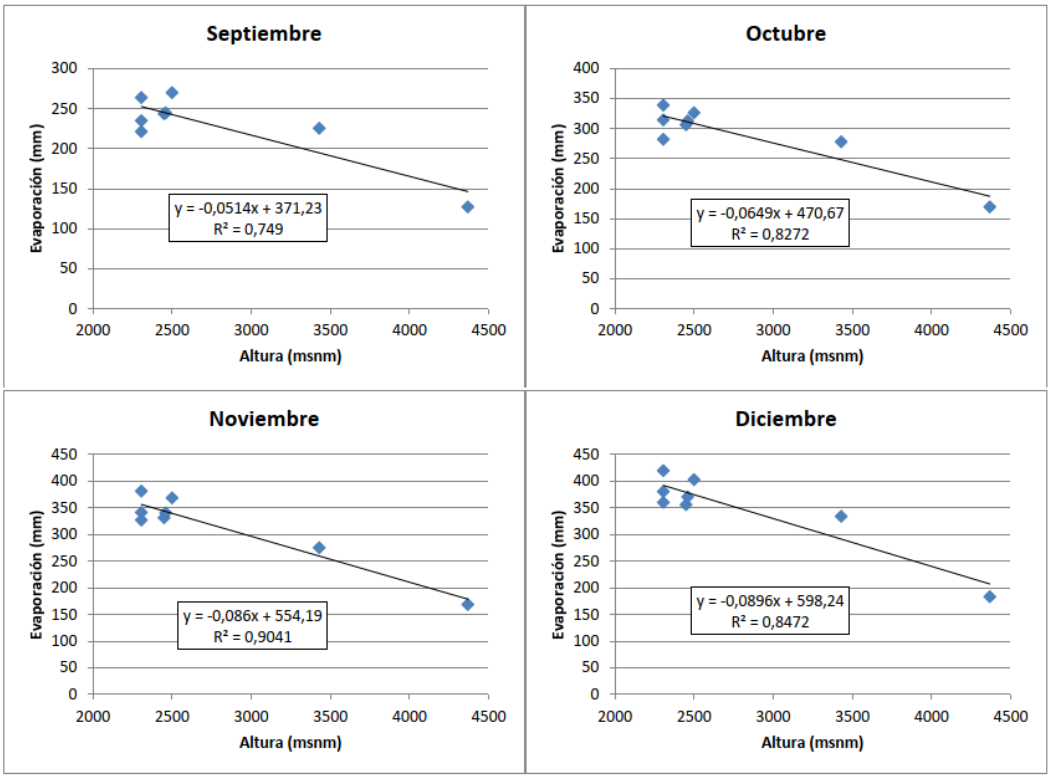


Figura II-31: Gradientes altitudinales de evaporación mensual de agosto a diciembre.
Fuente: SGA (2015)

Adicionalmente, el estudio de Golder (2017) elaboró un gradiente de evaporación media anual en función de la altura para las estaciones de medición de evaporación de bandeja presentadas en la Tabla II-8,cuyo resultado se muestra en la Figura II-32.

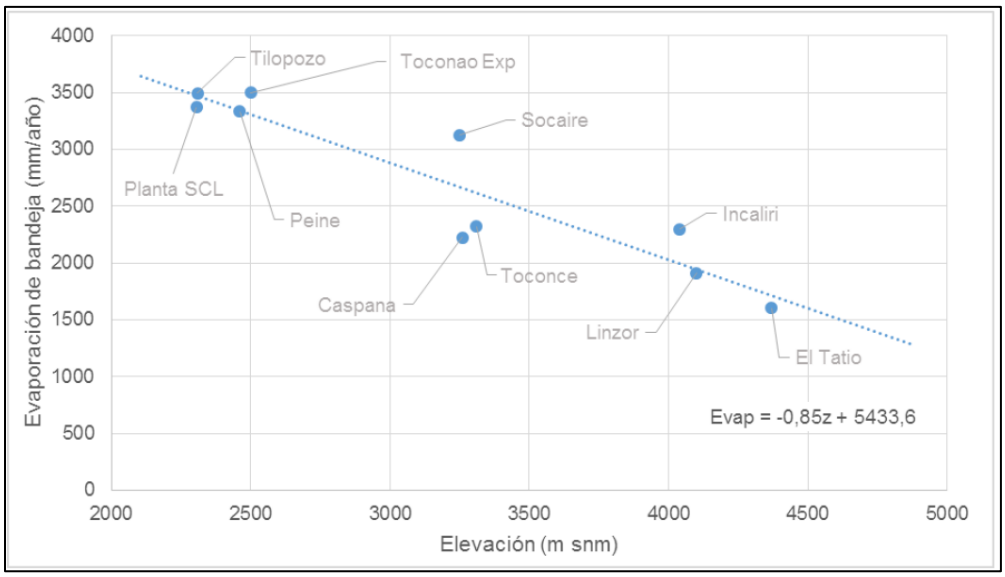


Figura II-32: Gradiente de evaporación media anual.
Fuente: Golder (2017)

La metodología del balance hídrico de la cuenca (Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)) contempla relacionar la tasa de evaporación de balde registrada con la evapotranspiración potencial de las zonas cubiertas por vegetación presentes en la cuenca mediante la Ecuación 9.

$$ET_0 = ET_{bandeja} * K_p \qquad \text{Ecuación 9}$$

Donde:
ET_0 = Evapotranspiración potencial (mm/día)
$ET_{bandeja}$ = Evaporación de bandeja medido (mm/día)
K_p = Coeficiente de bandeja.

La estimación de los flujos evapotranspirativos del balance de la cuenca del Salar de Atacama (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018) considera los coeficientes de bandeja (K_p) presentados en el estudio de Golder (2017). Dichos valores se obtuvieron dividiendo la evapotranspiración de referencia calculada a partir de la ecuación Penman-Monteith (Monteith, 1965), por las mediciones de las estaciones mencionadas en la Tabla II-8. Los factores resultantes de esta operación matemática se presentan en la Tabla II-9.

Tabla II-9: Coeficientes de bandeja mensuales

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
kev	0,67	0,66	0,70	0,64	0,66	0,66	0,70	0,72	0,64	0,68	0,67	0,66

Fuente: Golder (2017)

Estos valores de referencia están en línea con lo indicado por DGA en el Balance Hídrico Nacional (1986) para la II región, en donde se propone un coeficiente constante para todo el periodo de 0,65. Por lo anterior el estudio de Golder (2017) considera un coeficiente de bandeja redondeado de 0,7. Este valor se encuentra además en línea con los valores referenciales propuestos por el Boletín FAO N°56 para condiciones de baja humedad relativa del aire e instalaciones de tanque sin cobertura vegetal relevante en los alrededores.

A partir de la estimación de la Evapotranspiración potencial es posible obtener la Evapotranspiración de cultivo (ET_c), la cual representa la salida de agua desde el perfil de suelo por una cobertura vegetal bajo condiciones estándar, según se presenta en la Ecuación *10*.

$$ET_c = ET_0 * K_c \qquad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración de cultivo (mm/día).
ET_0 = Evapotranspiración potencial de referencia (mm/día).
K_c = Coeficiente del cultivo

La metodología del balance hídrico en la que se basa este diagnóstico (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018), requiere determinar las áreas que cubren estos sectores que constituyen flujos de salidas de agua del sistema asociadas a la evapotranspiración de áreas vegetadas. El estudio antes mencionado determinó estas áreas a partir del análisis de imágenes satelitales, identificando zonas cultivadas, vegas y bofedales. Se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (Tucker, 1979) para toda la superficie de interés (cuenca y subcuencas de estudio). Este parámetro corresponde a un indicador calculado a partir de imágenes satelitales, en base a los valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda, que es ampliamente utilizado para discriminar cubiertas vegetales. Se basa en que la respuesta espectral de la vegetación muestra un claro contraste entre el espectro del Rojo y el Infrarrojo Cercano (IRC).

El cálculo del NDVI considera la utilización de una fórmula con dos bandas del espectro electromagnético, una en la región del espectro visible y otra en la del infrarrojo cercano (IRC). La expresión de cálculo para este índice corresponde a la Ecuación 11.

$$\mathrm{NDVI} = (\mathrm{IRC} - \mathrm{R}) / (\mathrm{IRC} + \mathrm{R})$$

Ecuación 11

Donde:

$NDVI$ = Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.
IRC = Reflectividad en el infrarrojo cercano.
R = Reflectividad en el espectro rojo visible.

En términos prácticos, la aproximación metodológica consistió en la descarga y proceso de imágenes de la misión espacial LANDSAT 8 de la NASA (1999) y el posterior cálculo de la diferencia entre la reflectividad de la banda del infrarrojo cercano (banda 4) y la banda del espectro rojo visible (banda 3) de las imágenes satelitales. Los valores obtenidos para el NDVI, que varían entre -1 y 1, permiten clasificar la vegetación respecto a su densidad y/o vigor vegetativo (Weier y Herring, 2000) debido a la respuesta diferencial de las hojas al espectro del infrarrojo cercano respecto al rojo dada la actividad de fotosintética de la clorofila. A partir de este comportamiento, es posible utilizar el índice NDVI como proxy de las características y actividad vegetal. Valores altos de NDVI podrán corresponder a condiciones de mayor vigor y/o densidad vegetal, mientras que valores bajos se asocian a vegetación con menor actividad fotosintética producto de estrés o enfermedad, o a una menor densidad vegetal y por tanto, mayor proporción de suelo desnudo en el área analizada.

En el caso del modelo conceptual desarrollado para el Salar de Atacama por Comité de Minería No Metálica-Amphos (2018), los tipos de vegetación clasificados corresponden a dos categorías para representar distintos tipos de cobertura según el valor de NDVI obtenido. Valores bajos (entre 0,2 y 0,4) se asociaron a vegetación dispersa o poco vigorosa y valores de NDVI altos (mayores a 0,4) a vegetación abundante o vigorosa. Áreas con un índice NDVI menor a 0 corresponden a cuerpos de agua. Las áreas cubiertas por vegetación clasificadas en base al índice NDVI junto con las salidas por evapotranspiración determinadas en CORFO-Amphos21 (2018) se presentan en la Tabla II-10.

Tabla II-10: Cobertura vegetacional por tipo

Clase	Área Total (Km^2)	Coeficiente de cultivo	Tasa de Evapotranspiración (mm/d)	Evapotranspiración calculada (l/s)
Vegetación abundante o vigorosa	9,8	1,00	4,89	557
Vegetación dispersa o poco vigorosa	40,3	0,50	2,44	569

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

La salida total por evapotranspiración desde las coberturas vegetales presentes en la cuenca estimada a partir de estos antecedentes es de 1.126 l/s tanto para el periodo bajo régimen natural y con extracción (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018). Esto a la luz de que las salidas por evapotranspiración no están relacionado a las posibles variaciones en el nivel freático producto de extracciones en el núcleo del salar.

Un complemento a la caracterización de la cobertura vegetal y que permitirá refinar la caracterización de las salidas de agua a partir de la evapotranspiración en la cuenca del Salar de Atacama, lo constituye el trabajo de Zhao et al., (2016). Este trabajo caracteriza la cobertura de la tierra de todo el país al año 2014 con una resolución de 30 metros, a partir de la integración y análisis de diversas fuentes de información. Entre ellas se encuentran imágenes satelitales Landsat, MODIS, información cartográfica nacional, y modelos digitales de elevación. La Tabla II-11 presenta una agrupación de clases de cobertura de suelo propuesta para la cuenca del Salar de Atacama a partir de las categorías originales del trabajo de Zhao et al., (2016).

Tabla II-11: Categorías de cobertura de suelo presentes en la cuenca del Salar de Atacama

Tipo de Cobertura	Categoría Zhao	Área total en la cuenca (ha)
Suelos arenosos y rocosos (+ superficies impermeables)	920, 930, 800	1.532.147
Matorrales (incl. Arborescentes y otros matorrales áridos)	400 (410, 420, 450)	79.108
Cuerpos de agua	610	10.153
Salares	910	68.280
Pastizales	300 (320, 330)	3.369
Cultivos (huertos, otros cultivos y barbecho + Plantaciones + Bosque Nativo)	100 (130, 140, 150)	1.720
Humedales	500 (510, 530)	310

Fuente: Modificado a partir de Zhao et al. (2016)

A partir de esta caracterización en términos de las áreas de las distintas coberturas, se podrá refinar la estimación de salidas por evapotranspiración desde ellas, con un mayor grado de diferenciación entre los distintos tipos de cobertura vegetal y por tanto, de las tasas de evapotranspiración correspondientes. Esto a partir del uso de valores referenciales de Kc específicos para estas coberturas en condiciones áridas, tanto para cultivos (Allen et al., 2006) como coberturas naturales, tal como se presenta a continuación.

Consumo de agua por ecosistemas

Estudios previos como los de SGA (2015) y Salazar et al., (1999) han avanzado en esta caracterización, definiendo coeficientes de cultivo a nivel mensual necesarios para determinar los consumos de agua por evapotranspiración (Ecuación *10*) para las coberturas de vegas y bofedales identificadas en la cuenca a partir del análisis de imágenes satelitales. La Tabla II-12 presenta la serie mensual de coeficientes de cultivo a considerar para estas coberturas.

Tabla II-12: Coeficientes de cultivo asociados a en vegas y bofedales

Tipo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Vega	0,63	0,63	0,63	0,56	0,41	0,41	0,41	0,56	0,56	0,56	0,63	0,63
Bofedal	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fuente: Fuente: SGA (2015) a partir de Salazar et al., (1999)

Para las zonas con presencia de árboles y otras coberturas asociadas a áreas agrícolas, el mismo estudio de SGA (2015) identifica valores referenciales para vegetación en terrenos áridos. En particular se adoptó un valor de Kc de 0,95 para cultivos, considerando que parte importante de las áreas cultivadas corresponden a praderas. Para el caso de las forestaciones se utilizó un valor de 0,3 a partir de valores de referencia para condiciones áridas.

Dados estos valores, el consumo total de cada elemento identificado queda determinado para el área oriente del Salar (Figura II-33) por el producto simple entre dichas áreas por la tasa de evapotranspiración de referencia correspondiente a la altura respectiva, con los coeficientes de cultivos de evapotranspiración de la Tabla II-12. De esta forma, el caudal evapotranspirado por los ecosistemas se presenta en la Tabla II-13. El remanente de la evaporación y evapotranspiración se produce en la zona del núcleo del Salar de Atacama.

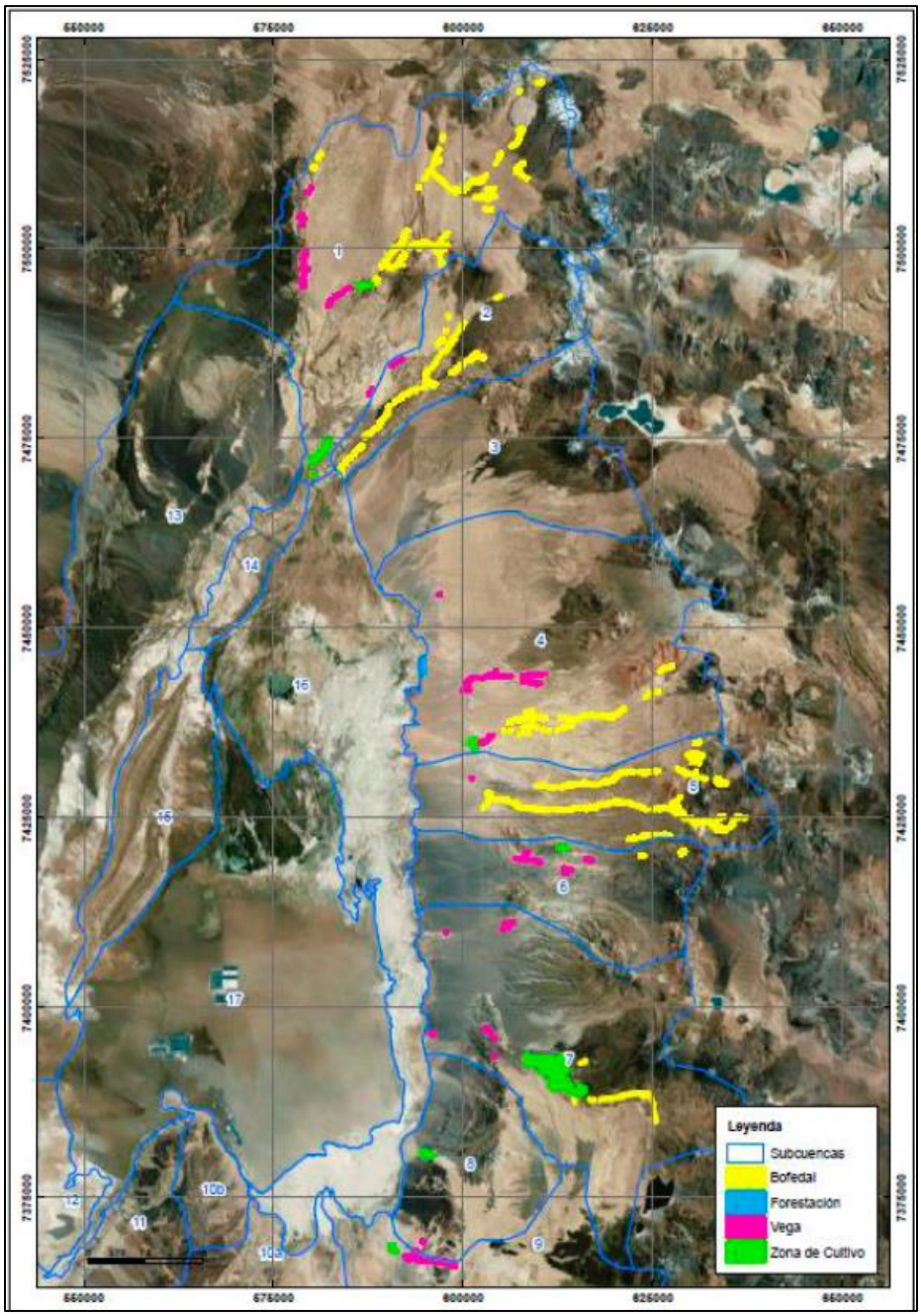


Figura II-33: Cobertura vegetal detectada en las subcuencas aportantes de la vertiente oriental del Salar de Atacama.
Fuente: SGA (2015)

Tabla II-13: Salidas por vía evapotranspiración de agua de los ecosistemas en el núcleo y en la zona este del Salar de Atacama

EVT Cultivos (l/s)	EVT Vegas (l/s)	EVT Bofedales (l/s)	EVT Forestaciones Tamarugos (l/s)	EVT Total zona oriental (l/s)
150	60	360	80	655

Fuente: SGA (2015)

Cabe destacar que el valor calculado de 1.125 l/s para el flujo total de salidas de agua por evapotranspiración correspondiente a vegas, bofedales y forestaciones (principalmente tamarugos), es consistente con las salidas evapotranspirativas determinadas en el balance consolidado de la cuenca del Salar de Atacama de Amphos21 (2018), el cual corresponde a 1.126 l/s.

Una fuente adicional de información respecto a coeficientes de cultivos a considerar para esta región considerando los distintos tipos de vegetación presente en la cuenca se obtiene de librerías de cultivos/coberturas vegetales incluidas en el modelo WEAP-MABIA. El Método MABIA es una simulación diaria de transpiración, evaporación, requisitos y programación del riego, crecimiento y rendimiento de cultivos, incluyendo módulos para estimar la evapotranspiración de referencia y la capacidad de retención de agua en el suelo. Esta aproximación utiliza el método de K_c 'dual', como se describe en el documento de riego y drenaje de la FAO Nº 56 (Allen, et al., 2006), en el que el valor de K_c se divide en un coeficiente de cultivo 'basal', K_{cb}, y un componente separado, K_e, que representa la evaporación de la superficie del suelo. Para las coberturas vegetacionales naturales y las asociadas a los cultivos presentes en la cuenca, se considera una serie mensual de coeficientes de cultivo (K_c, Figura II-34).

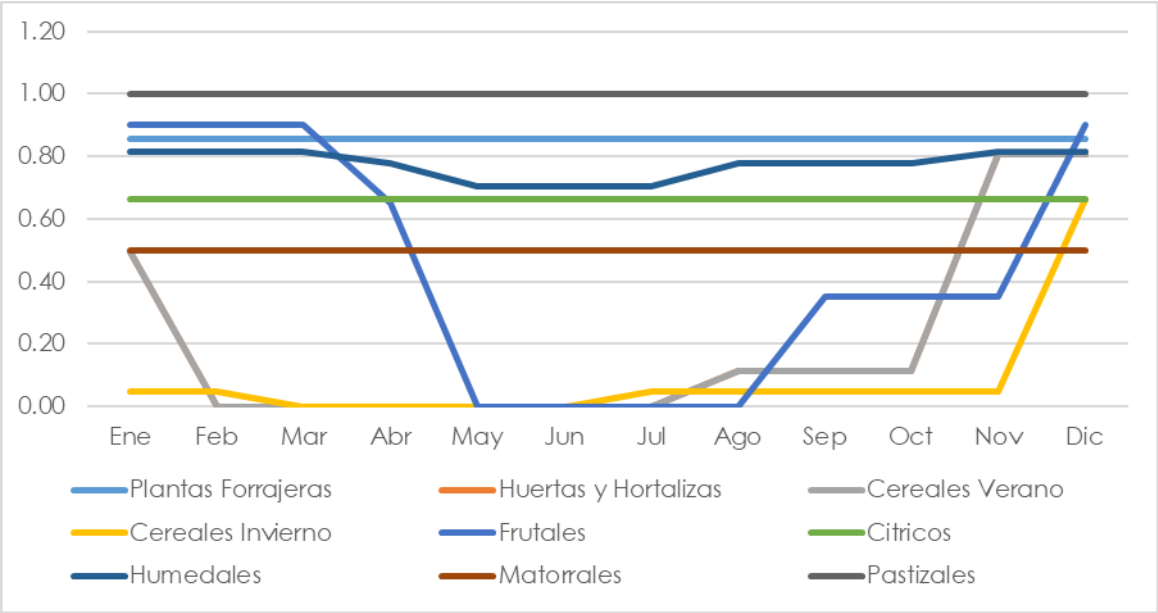


Figura II-34: Coeficientes de cultivo (Kc) ajustados a partir de modelo MABIA para condiciones de aridez.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos WEAP-MABIA

II.3.2.3.2 Evaporación directa de las precipitaciones

La evaporación directa de la precipitación corresponde a la fracción del caudal de entrada por precipitación que se evapora directamente antes de infiltrarse al suelo o ser utilizado por la vegetación. La metodología para determinar la evaporación directa de las precipitaciones consiste en conocer los demás términos del balance hídrico y despejar la evaporación directa que satisface el balance. Se este modo, el balance hídrico de la cuenca Salar de Atacama (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018) determina que la proporción del flujo de precipitación media anual total de la cuenca Salar de Atacama corresponde aproximadamente a 22.253 l/s, de la cual se evapora aproximadamente un 77%.

II.3.2.4 Recarga de acuíferos

El caudal de infiltración o recarga al sistema subterráneo se produce de acuerdo a principalmente tres fenómenos, la infiltración por precipitación directa e infiltración por escorrentía desde distintas áreas de la cuenca, y la infiltración del caudal superficial al núcleo del acuífero. La metodología empleada para estimar los caudales de entrada de agua subterránea corresponde a la misma metodología de la DGA-DIHA PUC (2009), la cual se presenta en este capítulo. Estos lineamientos establecen que el caudal de infiltración producto de la precipitación directa y la recarga lateral de cuencas depende de la precipitación media anual mediante un coeficiente de infiltración directa y otro coeficiente de infiltración lateral, respectivamente. De esta forma, los caudales de infiltración por precipitación directa y por recarga lateral a cada cuenca "i" quedan dados por la Ecuación *12* (DGA-DIHA PUC, 2009):

Recarga por infiltración de precipitación directa

$$RD_i = CID_i \cdot Pp_i \cdot AD_i \cdot FR_i \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

RD_i = Recarga por precipitación directa de la cuenca "i" (l/s).
CID_i = Coeficiente de infiltración directa de la cuenca "i".
Pp_i = Precipitación media anual sobre la cuenca "i" (mm/año).
AD_i = Área aportante de la cuenca "i" por precipitación directa (km^2).
FR_i = Factor de reducción de las precipitaciones de la cuenca "i".

Recarga lateral por infiltración de precipitación

$$RL_i = C_{e,i} \cdot CIL_i \cdot Pp_i \cdot AD_i \cdot FR_i \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

RL_i = Recarga lateral por precipitación de la cuenca "i" (l/s).
$C_{e,i}$ = Coeficiente de escorrentía de la cuenca "i".
CIL_i = Coeficiente de infiltración por recarga lateral de la cuenca "i".
Pp_i = Precipitación media anual sobre la cuenca "i" (mm/año).
AD_i = Área aportante de la cuenca lateral no acuífera "i" (km^2).
FR_i = Factor de reducción de las precipitaciones de la cuenca "i".

Cada subcuenca contiene varias litologías diferentes. La distribución de la litología en superficie de cada subcuenca fue elaborada por Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), mientras que los coeficientes de escorrentía propuestos para regiones semiáridas se encuentran en DGA-DIHA PUC (2009), los cuales resultan aplicables en la cuenca del Salar de Atacama debido a su clima (Köppen, 1936). Estos coeficientes clasificados según permeabilidad correspondiente a distintas litologías se clasificaron en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) y se muestran en la Tabla II-14.

Tabla II-14: Coeficientes de infiltración para cuencas altiplánicas

Permeabilidad según litología	Ce
Alta	0,30
Media a Alta	0,25
Media	0,20
Media Baja	0,15
Baja	0,10
Muy Baja	0,05

Fuente: DGA-DIHA PUC (2009)

Estos distintos coeficientes de infiltración directa y de infiltración por recarga lateral distribuidos por cada subcuenca se encuentran establecidos en el estudio de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), los cuales fueron obtenidos en base a los lineamientos de la DGA-DIHA PUC (2009). Dichos valores se presentan en la Tabla II-15, de acuerdo a la unidad hidrogeológica que fue descrita en el primer informe de este proyecto.

Tabla II-15: Porcentaje de cobertura de área según factor de infiltración

UH	CL	Porcentaje del área de cada subcuenca cubierta por litología																
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0,30	1	13	10	21	21	19	2	4	18	0	3	0	0	11	2	0	0
2	0,24	5	2	10	22	11	12	29	13	18	52	32	42	54	88	92	41	60
3	0,30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	39
4	0,12	8	2	42	0	29	1	10	38	1	17	64	9	4	0	3	59	1
5	0,12	70	45	21	36	38	16	23	12	30	31	2	38	41	1	0	0	0
6	0,05	16	38	17	20	0	52	35	34	32	0	0	11	0	0	0	0	0

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

Una vez que se ha clasificado la capacidad de infiltración por subcuenca de acuerdo a los coeficientes de infiltración por precipitación directa y recarga lateral, se proceden a calcular los caudales de infiltración de cada una de las dos componentes, recarga directa y lateral por multiplicación simple de acuerdo a la Ecuación *12* y Ecuación *13*, las cuales son agregadas por subcuenca en la Tabla II-16. Así, la recarga del sistema subterráneo a partir de los procesos de infiltración, tanto de manera directa sobre el área acuífera del salar, así como indirecta desde las zonas no-acuíferas en desde las cuencas laterales, suman un total de 2.912 l/s.

Tabla II-16: Infiltración por escorrentía distribuida por subcuencas

Parámetro	Subcuenca																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Precipitación (mm/año)	119	105	96	92	23	80	49	66	32	29	17	26	18	20	16	12	14
Área acuífera (km^2)	168	129	902	222	85	479	1099	791	112	1.332	465	772	127	777	382	278	1.633
Área no acuífera (km^2)	1.037	632	555	287	53	1.038	1.506	666	186	605	8	741	89	7	0	0	0
CID	0,17	0,28	0,17	0,27	0,20	0,27	0,21	0,16	0,26	0,21	0,16	0,22	0,23	0,25	0,24	0,17	0,26
CIL	0,11	0,09	0,09	0,09	0,12	0,07	0,08	0,07	0,08	0,12	0,12	0,10	0,12	0,12	0,09	0,09	0,07
Per-D (l/s)	110	118	466	174	13	330	367	268	30	257	40	140	17	121	45	17	197
Per-L (l/s)	58	26	21	11	1	24	26	13	2	9	0	9	1	0	0	0	0
Infiltración por precipitación (l/s)	169	144	487	185	13	355	392	281	32	266	40	149	17	121	45	17	197

CID: Coeficiente de infiltración en zona acuífera; CIL: Coeficiente de infiltración en zona no-acuífera; Per-D: Percolación directa; Per-L: Percolación lateral.

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amhpos21 (2018)

Tal como se indicó anteriormente, sumado al aporte de infiltración directa sobre el acuífero y desde las cuencas laterales, debe considerarse la fracción de la escorrentía superficial que recarga el sistema subterráneo. El estudio de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) cuantifica para un régimen natural un caudal total de escorrentía estimado de 3.884 l/s, una parte importante (65%, equivalente a 2.530 l/s) se infiltra a lo largo de los cauces aportando a la recarga del acuífero.

II.3.3 Balance hídrico a nivel superficial

El balance hídrico superficial comprende los procesos de precipitación, escorrentía superficial, evaporación, variación del almacenamiento en la zona de raíz y recarga al sistema subterráneo. De esta forma, el balance hídrico superficial de la cuenca Salar de Atacama queda dado por la siguiente expresión:

$$Pp - E - Q_e - R = \frac{\Delta V}{\Delta t} \qquad \text{Ecuación 14}$$

Donde:
Pp = Entrada al sistema por precipitación (l/s).
E = Evaporación (l/s).
Q_e = Escorrentía superficial (l/s).
R = Recarga al sistema subterráneo (l/s).
ΔV = Variación del almacenamiento en el perfil de suelo (l).
$\Delta\, t$ = Unidad de tiempo considerada para el balance (s).

Los valores estimados para las entradas y salidas que considera el balance hídrico del sistema superficial se presenta en la Tabla II-17.

Tabla II-17: Balance hidrico superficial actual*

Entradas (l/s)		Salidas (l/s)	
Precipitación	29.000	**Percolación**	2.900
		Caudal de escorrentía	3.900
		Evaporación	22.200
Total entradas	29.000	**Total salidas**	29.000
* Se incluye el efecto de aumento en evaporación asociado al riego de cultivos			

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

II.3.4 Entradas y salidas de agua y salmuera a nivel subterráneo

Esta sección analiza tanto las entradas de agua al sistema subterráneo, como la evolución de los niveles de las lagunas en la frontera del núcleo del Salar de Atacama.

II.3.4.1 Entradas al sistema subterráneo

El caudal de entrada al sistema subterráneo corresponde a la componente de recarga por precipitación en las salidas del sistema hídrico superficial, la cual se encuentra compuesta de la recarga directa sobre el área con presencia de acuíferos, así como también la proveniente de las cuencas laterales. Asimismo, es necesario considerar las entradas asociadas a la infiltración de la escorrentía superficial provenientes de la infiltración a lo largo del cauce y el caudal entrante al núcleo del Salar como caudal superficial, tal como fue presentado en el Capítulo II.3.2.4.

II.3.4.2 Salidas y evaporación del nivel freático

En esta sección se presenta la evaporación que se produce desde la superficie freática somera y en las lagunas presentes en el Salar de Atacama. Se debe tener en cuenta que la evaporación depende de la elevación del nivel piezométrico, por lo que se puede distinguir entre evaporación en régimen natural sin explotación de salmuera y un escenario de explotación de salmuera, debido a que esto provoca un descenso del nivel freático del núcleo del salar. La tasa evaporativa del suelo se reduce a medida que el nivel freático del acuífero disminuye. La metodología del balance hídrico considera clasificar estos escenarios de extracción en una situación promedio en régimen natural, previo al 2000, y otra entre 2000 y 2018 para el escenario con extracción de salmuera, debido a que es el período con información disponible a la fecha (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018).

La información disponible considerada en el balance hídrico de la cuenca (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018) para calcular la evaporación directa del nivel freático del sistema de acuíferos del Salar de Atacama corresponde a mediciones de domos y lisímetros obtenidas a partir de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), Golder (2017), SGA (2015), S. Kampf (2002), Hydrotechnica (1988) y Mardones, L. (1986), cuya disposición espacial se presenta en la Figura II-35 y sus coordenadas geográficas correspondientes en la Tabla II-18.

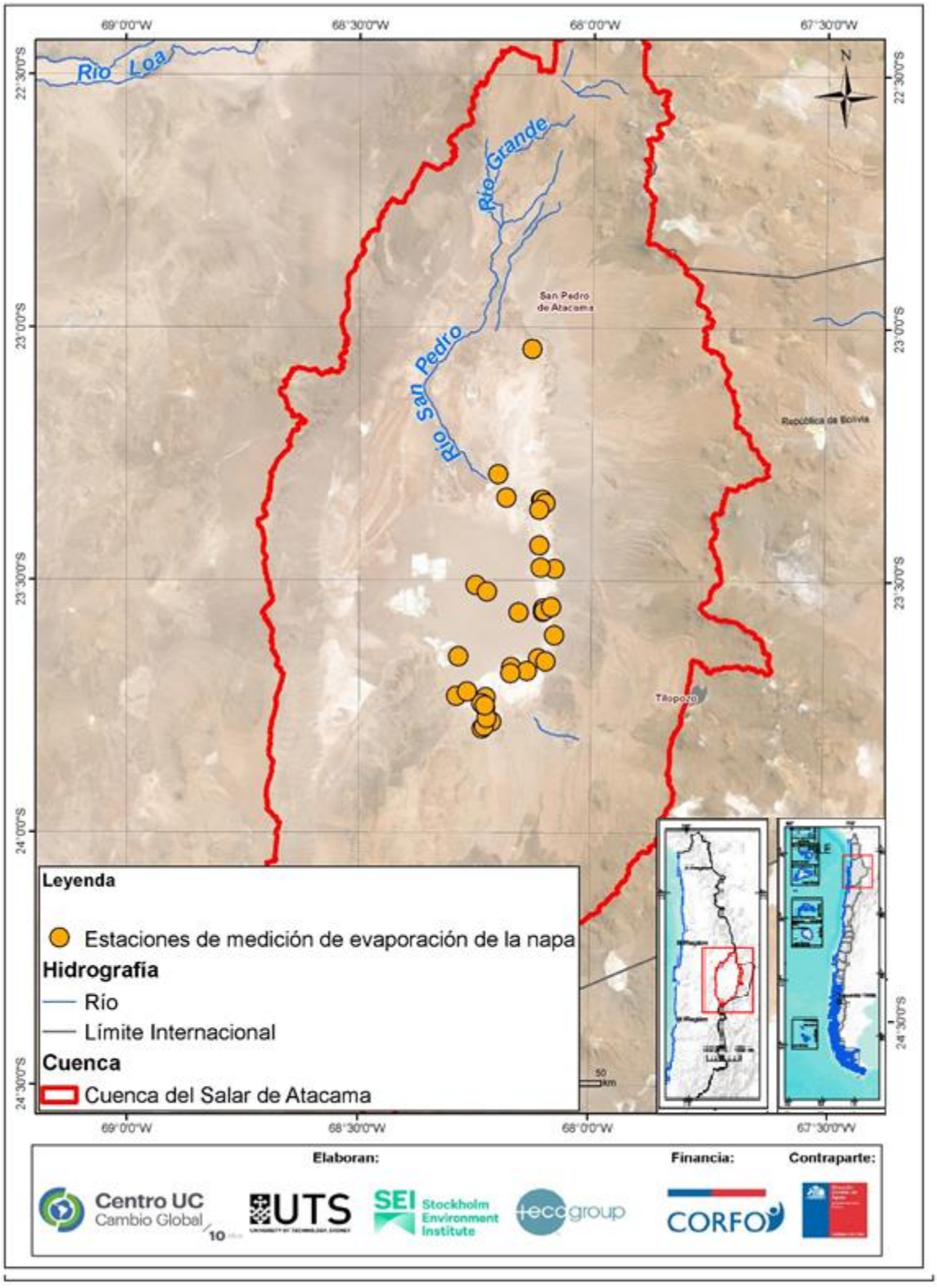


Figura II-35: Ubicación de medición de evaporación desde la napa en el Salar de Atacama
Fuente: Elaboración propia con datos de SGA (2015)

Tabla II-18: Estaciones de medición de evaporación de la napa en el Salar de Atacama

Estación	Lat.	Lon
Estación_2	-23,3367	-68,1840
Estación_4	-23,3419	-68,1091
Estación_5	-23,3413	-68,1070
Estación_6	-23,5562	-68,1033
Estación_7	-23,4774	-68,0798
Estación_8	-23,2909	-68,2023
Estación_8700	-23,3367	-68,1840
Estación_8710	-23,3419	-68,1091
Estación_8720	-23,3413	-68,1070
Estación_8730	-23,3413	-68,1070
Estación_8740	-23,5562	-68,1033
Estación_8750	-23,5562	-68,1033
Estación_8770	-23,4774	-68,0798
Estación_8791	-23,2909	-68,2023
Estación_8792	-23,5106	-68,2489
EVT-10	-23,5639	-68,1561
EVT-11	-23,5629	-68,1042
EVT-12	-23,5613	-68,1010
EVT-13	-23,6522	-68,2855
EVT-15	-23,6549	-68,1138
EVT-16	-23,6611	-68,0982
EVT-17	-23,6729	-68,1713
EVT-20	-23,7325	-68,2263
EVT-21	-23,7528	-68,2274
EVT-22	-23,7808	-68,2141
EVT-23	-23,6799	-68,1380
EVT-9	-23,5236	-68,2252
L1	-23,7947	-68,2346
L2	-23,7947	-68,2346
L3	-23,7300	-68,2899
L4	-23,7300	-68,2899
L5	-23,7458	-68,2318
L6	-23,7458	-68,2318
PZ-12	-23,7301	-68,2896
PZ-16	-23,7448	-68,2360
PZ-7	-23,7807	-68,2141
TP-2	-23,7900	-68,2295
TPDV-8	-23,7210	-68,2670
TPZ-12	-23,7732	-68,2245
LZA10-1	-23,7484	-68,2278
LZA7-1	-23,5612	-68,1015

Estación	Lat.	Lon
LZA7-2	-23,6096	-68,0797
LZA3-1	-23,4754	-68,1097
LZA3-2	-23,4311	-68,1127
LZA12-2	-23,5535	-68,0866
LZA12-3	-23,0426	-68,1296
LZA12-1	-23,3481	-68,0998
LZA3-3	-23,3608	-68,1132
LZA9-1	-23,6846	-68,1731

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

Curvas de evaporación de suelo

La evaporación directa del suelo del Salar de Atacama consiste un factor preponderante en el balance hídrico del acuífero. Para estimar la evaporación desde el suelo existen curvas que relacionan la tasa de evaporación en función de la profundidad del nivel freático, cuya relación depende de: 1) la salinidad (densidad) del agua evaporada, 2) la permeabilidad del suelo y 3) la morfología de las costras salinas (Kampf et al. 2005).

Uno de los estudios más citados para determinar la función de estas curvas para obtener la evaporación desde el suelo en el Salar de Atacama, y que se utiliza en la metodología del balance hídrico de la cuenca (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018) corresponde al de Mardones (1986), quien definió 13 zonas de evaporación en el salar, según sea la profundidad del agua, la litología y las características de la costra salina. Posteriormente, se han desarrollado estudios en los cuales se presentan curvas de evaporación y profundidad para las 13 zonas evaporativas del Salar de Atacama. Los antecedentes utilizados para estimar la evaporación la evaporación desde el suelo en el Salar de Atacama que utiliza el balance hídrico de la cuenca (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018) corresponden a los siguientes:

- DGA 1986 - Balance Hidrológico Nacional: II Región.
- DICTUC 2004b - Modelo Hidrogeológico del Núcleo del Salar. EIA SQM Salar S.A.
- DICTUC 2009 - Medición de la Evaporación Mediante el Método del Domo.
- Muñoz et al. (2004) construyó un set de 4 curvas según la expresión propuesta por Philip (1957), a partir de mediciones de lisímetros efectuadas por Mardones (1986). Cada curva se asoció a las zonas de evaporación definidas por Mardones (1986). Las curvas se construyeron a partir de 4 a 15 mediciones en cada curva y no se realizó una diferenciación clara entre los datos recopilados durante los meses con alta y baja evapotranspiración potencial. La Figura II-36 muestra un ejemplo de estas curvas.
- SGA (2015): en este estudio se presentaron curvas estimadas a partir de mediciones con domos realizados en 23 puntos, durante 7 campañas desarrolladas entre los años 2013

y 2014. Tienen la ventaja de estar definidas en 13 de las 16 zona de evaporación definidas por DGA/GCF (2010), a partir de las zonas definidas por Mardones (1986). Pese a lo anterior, la mayoría de las curvas se definieron considerando sólo 4 mediciones tomadas en un único punto. Finalmente, se debe destacar que este estudio presenta mediciones en el núcleo del salar, las que son menores a 0,50 mm/d.

- Golder (2017): Este informe clasifica la evaporación de suelo en base a la estratificación salina, limos salinos y sulfatos granulares del sector Tilopozo de la zona Marginal. Las curvas se obtuvieron a partir de mediciones de 6 lisímetros y 9 campañas de domos, desarrolladas entre abril de 2011 y septiembre de 2015. Cada curva está construida con un elevado número de datos.

- CSIC (2017): En este estudio se definieron las curvas de evaporación contra profundidad para 4 de las 13 zonas de evaporación de Mardones, a partir de 84 mediciones de domos y lisímetros registradas durante el año 2015. Así, cada curva definida integra un elevado número de mediciones. Para el resto de las zonas de evaporación, el estudio propuso una curva promedio, construida a partir de las 84 mediciones registradas.

El informe de Golder (2017) realiza una comparación de las curvas de evaporación de los estudios mencionados anteriormente, la cual se muestra en la Figura II-36, mientras que la última comparación de estas relaciones con información actualizadas se presenta en la Figura II-37.

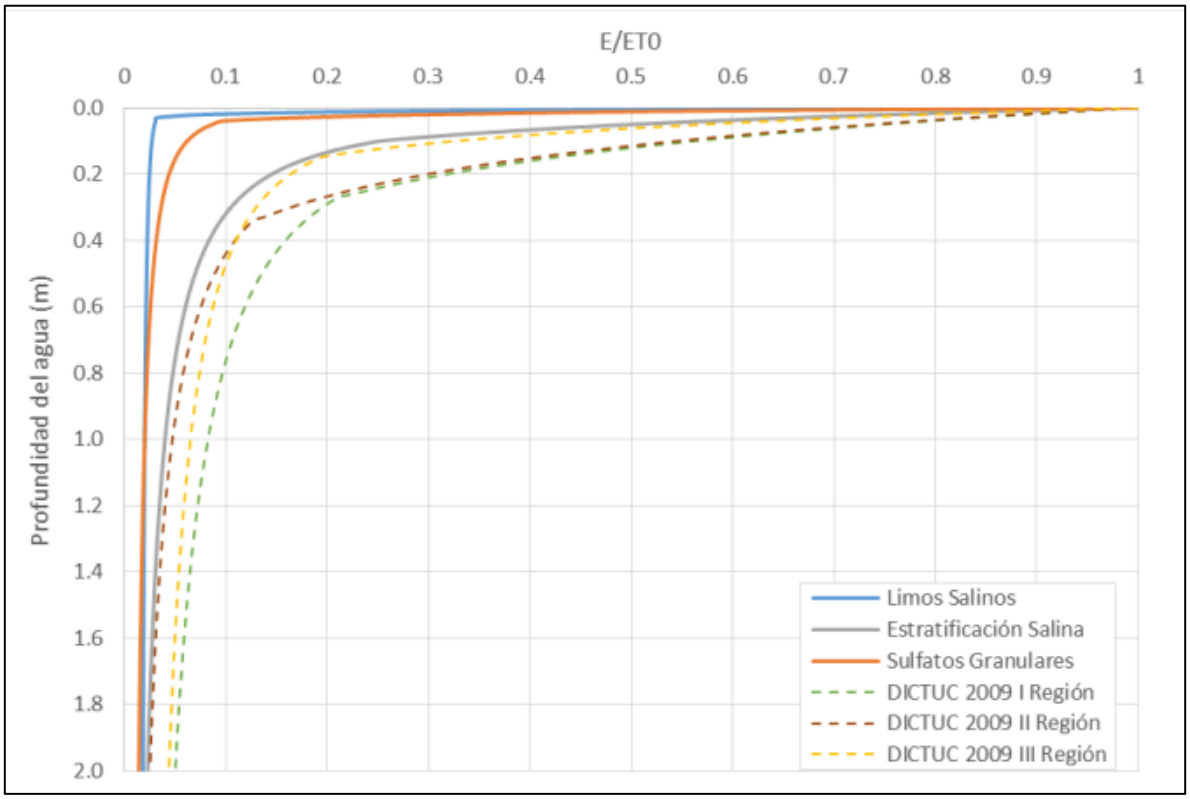


Figura II-36: Comparación de curvas de evaporación de suelo hasta 2017.
Fuente: Golder (2017)

Para conocer la dependencia de la tasa de evaporación con la profundidad a la cual se ubica el nivel freático, es necesario realizar un ajuste a las curvas de evaporación y profundidad. Para esto, los 49 puntos de medición de evaporación desde del nivel freático en la zona Marginal y núcleo con la información más actualizada se grafican en la Figura II-37, junto a la relación funcional que identifica esta dependencia.

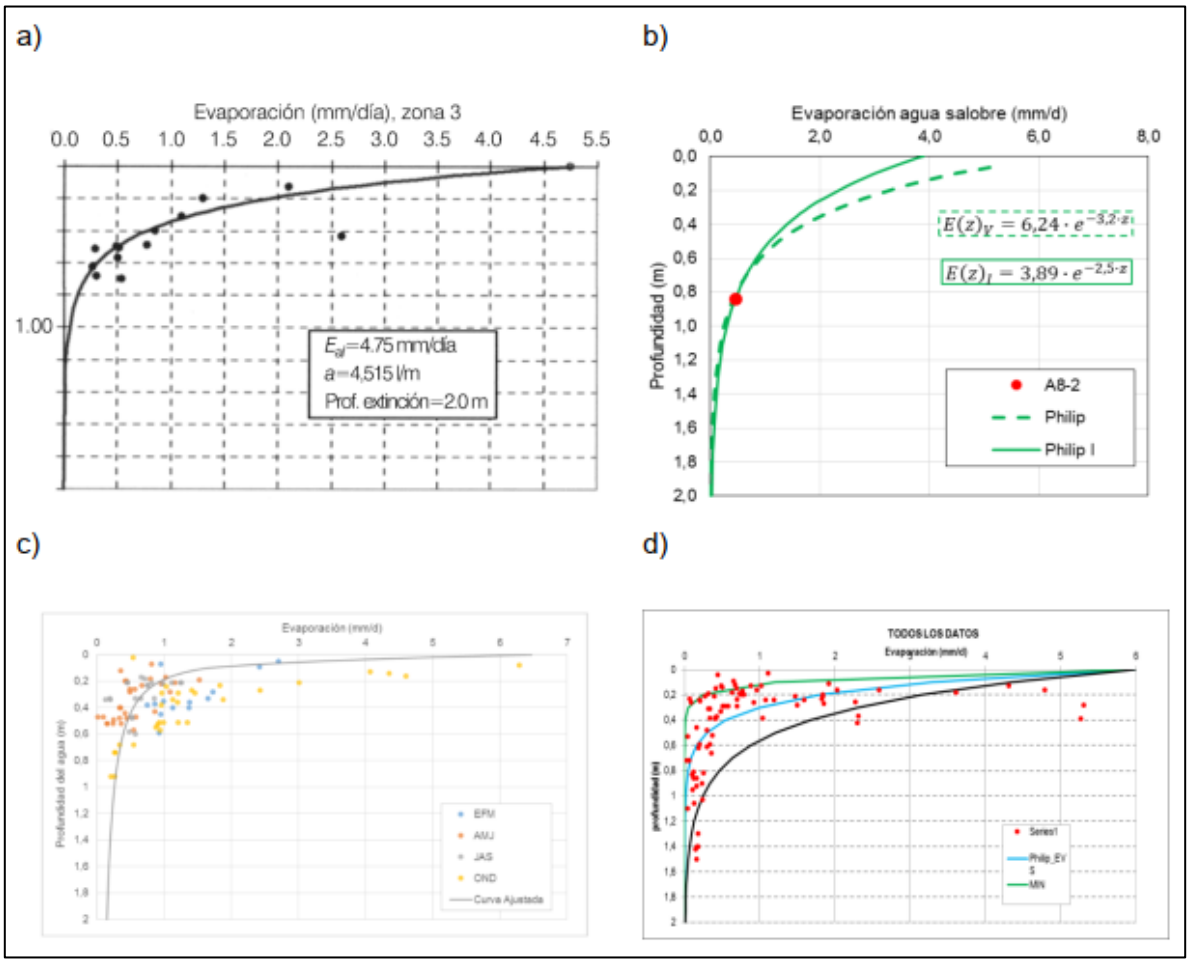


Figura II-37: Comparación de curvas de evaporación de suelo hasta 2017.
Fuente: a) Muñoz et al. (2004), b) SGA (2015), c) Golder (2017), d) CSIC (2017).

La metodología del balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018) utiliza 3 curvas de evaporación elaboradas a partir de mediciones con domos Golder (2017), y las clasifica de acuerdo al tipo de suelo con contenido de sales. Esta subdivisión corresponde a suelos con estratificación salina (costra salina suave, denominado ZE1), limos salinos (costra salina clástica, denominados ZE2) y sulfato granular (costra de halita y yeso denominado ZE3). Las relaciones obtenidas se muestran desde la Ecuación 15 a la Ecuación 17.

$$Zona\ 1: E(z) = ET_0 \begin{cases} e^{-13{,}70z} & z < 0{,}10\ m \\ 0{,}04\ z^{-0{,}8} & \geq 0{,}10\ m \end{cases}$$ Ecuación 15

$$Zona\ 2: E(z) = ET_0 \begin{cases} e^{-114{,}89z} & z < 0{,}03\ m \\ 0{,}02z^{-0{,}13} & \geq 0{,}03\ m \end{cases}$$ Ecuación 16

$$Zona\ 3: E(z) = ET_0 \begin{cases} e^{-58{,}25z} & z < 0{,}04\ m \\ 0{,}02\mathrm{z}^{-0{,}49} & \geq 0{,}04\mathrm{m} \end{cases}$$ Ecuación 17

Según lo anterior, se obtienen rangos de evaporación por cada banda de elevación de la cuenca. La metodología empleada para el cálculo de la evaporación directa desde el Salar que contempla el balance hídrico de la cuenca (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018) se describe a continuación:

1. Se obtienen imágenes satelitales del satélite de exploración Landsat 8 (USGS (2018)). Según la ubicación del pixel de la imagen, se determinó si la celda corresponde al sector salino o no.
2. A partir del índice de brillo de la imagen se determinó si corresponde a una laguna. De ser así se utilizó una evaporación máxima igual a la evaporación potencial. Si no corresponde a una laguna, se determina si corresponde a vegetación, calculando el índice NDVI. De ser así se determina su tasa de evapotranspiración.
3. En caso de que el pixel no se clasifique como de vegetación, se evaluó a partir del índice de humedad el rango de profundidad característico del pixel (banda de profundidad) y se determinó una curva de evaporación en función del índice de brillo y su ubicación.
4. Con la curva de evaporación elegida y cada profundidad determinada se calculó la tasa de evaporación correspondiente estimando la profundidad del nivel freático en base a imágenes satelitales.
5. Se calculó el flujo de evaporación de cada pixel de acuerdo a la Ecuación 18:

$$F_i = C \cdot A_i \cdot Ev_i$$ Ecuación 18

Donde:

F_i = flujo evaporativo de la celda "i" de la imagen satelital (l/s).
C = Factor de conversión de unidades.
A_i = área de la celda "i" (km^2).
Evi = Tasa de evaporación de la celda "i" (mm/día).

6. Se estima la evaporación directa neta del total del salar como la suma ponderada de los flujos evaporativos.

$$F_{neta} = \sum_{i=1}^{N} F_i$$

Como la tasa de evaporación directa desde el suelo en la zona del Salar de Atacama depende de la profundidad del nivel freático, la cual posee una dependencia de la extracción de agua salobre y salmueras del salar, es necesario distinguir entre la tasa de evaporación de suelo previo a las extracciones y durante ellas. A partir de la metodología descrita (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018), se estimó la evaporación directa desde el Salar de Atacama para dos períodos, antes de las extracciones (período previo a 1990) y durante su extracción (período entre 2000 y 2018). El rango de las salidas evaporativas desde el salar reportadas por dicho estudio se presentan en la Tabla II-19.

Tabla II-19: Evaporación promedio en el Salar de Atacama

Período	Evaporación promedio en el salar (l/s)
Previo a 1990	5.050 a 6.300
Entre 2000 y 2018	4.450 a 5.550

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

II.3.4.3 Extracciones de agua dulce y salmuera

En la cuenca del Salar de Atacama existen derechos de agua subterránea otorgados, los cuales se cuantifican a partir de la información oficial disponible en la DGA actualizada al 2020. Los derechos de agua subterránea para la cuenca se muestran en la Tabla II-20.

Tabla II-20: Derechos de agua subterránea otorgados para la cuenca del Salar de Atacama

Clasificación de la Naturaleza del Agua	Caudal (l/s)
Subterránea	3.873,3

Fuente: Catastro público de aguas DGA (Diciembre 2019)

A partir de la información proporcionada por la DOH (2020), se estima que las salidas por consumo de agua potable rural son del orden de 52 l/s, lo cual es consistente con el valor estimado en el balance hídrico de la cuenca (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018), para el cual se considera un consumo permanente producto de otras extracciones antrópicas de agua potable de un total de 50 l/s. Las salidas producto de las extracciones de agua dulce contempladas en el balance hídrico de la cuenca (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018) se encuentran entre 1.450 l/s y 1.600 l/s, mientras que las extracciones de salmuera varían entre 950 l/s a 1.050 l/s.

II.3.5 Balance hídrico a nivel subterráneo

El balance hídrico subterráneo comprende los procesos de la recarga del sistema superficial, las salidas evaporativas y las extracciones antrópicas. La diferencia entre las entradas y salidas de agua generar una variación del almacenamiento del sistema de

acuíferos de la cuenca Salar de Atacama. De esta forma el balance hídrico subterráneo queda dado por la siguiente expresión:

$$R - Ev - Ex = \frac{\Delta S}{\Delta t} \qquad \text{Ecuación 19}$$

Donde:
R = Recarga proveniente del sistema superficial (l/s).
Ev = Evaporación del nivel freático (l/s).
Ex = Extracciones antrópicas (l/s).
$\Delta S/\Delta t$ = Variación del almacenamiento el sistema de acuíferos (l/s).

Como ya se mencionó en este capítulo, la evaporación del nivel freático depende de la profundidad de este bajo la superficie, por lo que el balance del sistema subterráneo requiere distinguirse en el escenario natural, que considera un balance igual a 0 dada la condición endorreica de la cuenca, del escenario actual con extracciones, en donde existen salidas de agua asociada a la extracción de salmuera. La Tabla II-21 presenta los flujos de entrada y salida del sistema subterráneo del balance hídrico del sistema subterráneo en régimen natural obtenido de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

Tabla II-21: Balance hídrico subterráneo de la cuenca para un escenario de régimen natural

Entradas (l/s)		Salidas (l/s)	
Recarga por percolación (directa e indirecta)	2.600 a 3.200	**Evaporación en el salar***	5.050 a 6.300
		Evapotranspiración en áreas con vegetación	1.000 a 1.250
Recarga por escorrentía superficial	3.500 a 4.300	**Extracciones antrópicas salmuera**	50
Total entradas	6.100 a 7.500	**Total salidas**	6.100 a 7.600
* Se considera un régimen natural de balance del acuífero, sin disminución de las tasas de evaporación producto de nivel freático más profundo asociado a la explotación de salmuera.			

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

Se observa que en el período histórico en régimen natural el sistema hídrico de la cuenca Salar de Atacama se encuentra en equilibrio, es decir, la recarga por precipitación se iguala a las salidas del sistema subterráneo. Por otro lado, la Tabla II-22 presenta valores referenciales del balance hídrico subterráneo obtenido por Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018), el cual considera menores tasas de evaporación desde el salar al existir una disminución en el nivel freático, explicado por la inclusión de mayores extracciones antrópicas de salmuera y el uso de agua fresca por las faenas mineras.

Tabla II-22: Balance hídrico subterráneo de la cuenca en régimen de explotación (periodo 2000-2018).

Entradas (l/s)		Salidas (l/s)	
Recarga por percolación (directa e indirecta)	2.600 a 3.200	**Evaporación en el salar**	4.450 a 5.550
		Evapotranspiración en áreas con vegetación	1.000 a 1.250
		Extracciones antrópicas salmuera	950 a 1.050
Recarga por escorrentía	3.500 a 4.300	**Extracción minera neta de agua fresca**	1.450 a 1.600
Total entradas	6.100 a 7.500	**Total salidas**	7.850 a 9.450

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

A modo de diagnóstico, a partir de los valores obtenidos en el balance hídrico subterráneo (Comité de Minería No Metálica-Amphos21, 2018), el análisis indica que este sistema presenta una variación de almacenamiento (periodo 2000-2018) de entre 1.750 (l/s) a 1.950 (l/s). Respecto de lo anterior, en las siguientes figuras se presenta el registro de niveles piezométricos en los pozos de extracción de agua dulce Mullay-1 (Figura II-38), Allana (Figura II-39) y Camar-2 (Figura II-40).

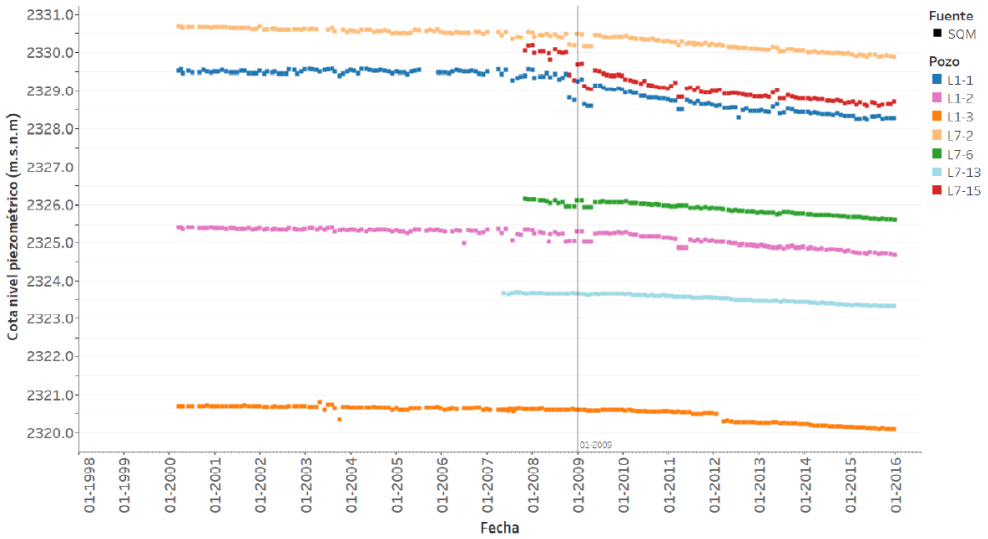


Figura II-38: Evolución temporal de la cota piezométrica en el acuífero aluvial Salar de Atacama (inmediaciones del Pozo Mullay-1).

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

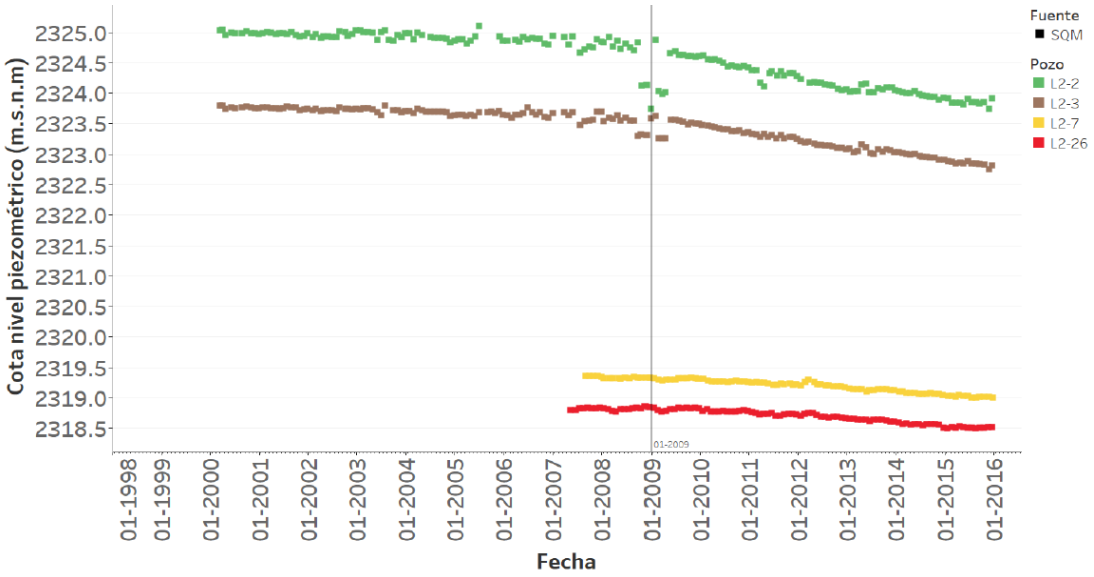


Figura II-39: Evolución temporal de la cota piezométrica en el acuífero aluvial Salar de Atacama (inmediaciones del Pozo Allana).

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

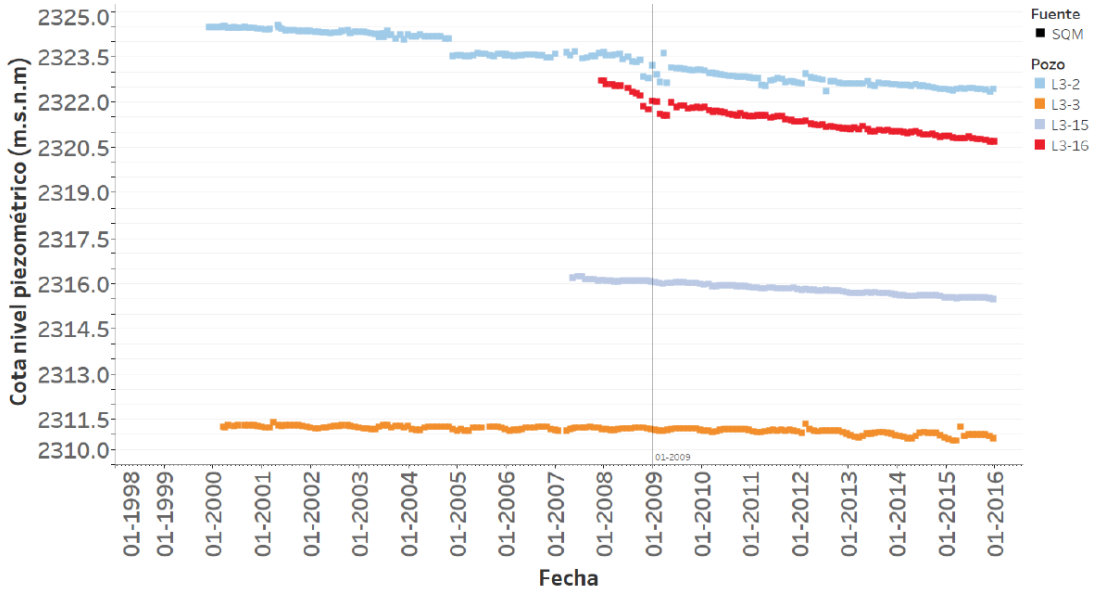


Figura II-40: Evolución temporal de la cota piezométrica en el acuífero aluvial Salar de Atacama (inmediaciones del Pozo Camar-2).

Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

II.4 Demanda de agua sectorizado

II.4.1 Introducción

En este capítulo se describen los antecedentes que permitan caracterizar el nivel de actividad y consumo de agua para distintos sectores y sistemas existentes en la cuenca Salar de Atacama. Se incluyen consumos para satisfacer necesidades básicas y de saneamiento de la población, necesidades para actividades productivas y necesidades de los ecosistemas que están presentes en la cuenca.

II.4.2 Consumo de agua para satisfacer necesidades básicas de la población de agua potable y saneamiento

En la Etapa I se entregó una caracterización demográfica a nivel provincial para la región de Antofagasta, y además a nivel comunal para la comuna de San Pedro de Atacama, debido al traslape geográfico de esta comuna con la cuenca Salar de Atacama. De acuerdo con el censo realizado el año 2017 (INE, 2017), la población total en esta comuna alcanzó los 10.996 habitantes, con una distribución equitativa entre población rural (49,8%) y urbana (50,2%). A esta población de residentes, se suma además una población flotante a lo largo del año producto de la actividad turística en la zona. A pesar de que ambos grupos (residentes y visitantes) hacen uso del mismo sistema de abastecimiento de agua potable en la cuenca, el impacto de la población flotante sobre el consumo para cubrir sus necesidades básicas será analizado en el Capítulo II.4.3.3.

En la cuenca Salar de Atacama no existen empresas sanitarias para el suministro de agua potable. Sin embargo, si existen sistemas formales de distribución a través de 5 sistemas de Agua Potable Rural (APR), ubicados en las localidades de Toconao, Socaire, San Pedro de Atacama (Comité de Agua Potable Rural de San Pedro de Atacama o CAPRA), Río Grande, y Peine respectivamente (ver Figura *II-41*). La operación de estos sistemas de APR se describen en la Etapa I. A continuación, se analiza la información útil para caracterizar los consumos de agua asociados a la población en la cuenca Salar de Atacama.

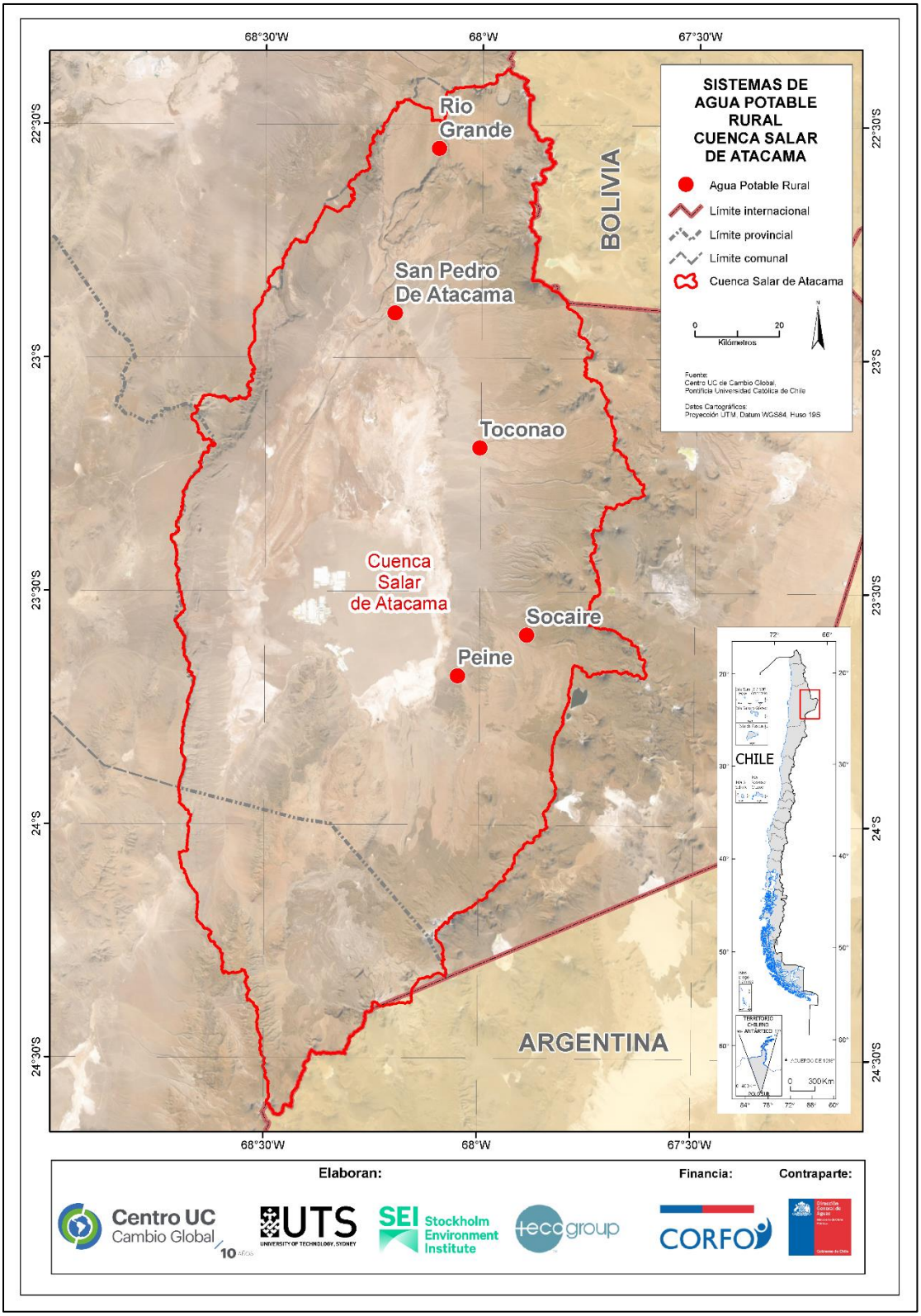


Figura II-41: Ubicación de Comités de APR en la cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración propia en base a información DOH (MOP).

La población total conectada a estos sistemas formales de distribución de agua potable alcanza los 7.600 habitantes aproximadamente o 2.502 hogares (MIDEPLAN, 2017), con los volúmenes mensuales de consumo de agua que se muestran en la Tabla II-23. El resto de la población en la comuna que no está conectada a un sistema formal de APR, que alcanza los 336 hogares, se abastece de agua potable mediante sistemas informales como: pozos (37 hogares), camión aljibe (184 hogares), y ríos o vertientes (115 hogares).

Tabla II-23: Volúmenes mensuales suministrados por APRs en la Cuenca del Salar de Atacama

Sistemas de APR Cuenca del Salar de Atacama		
Localidad	**Volumen (m^3/mes)**	**Caudal (l/s)**
Río Grande	2.160	0,8
Peine	5.910	2,3
Socaire	3.960	1,5
San Pedro de Atacama	82.994	32
Toconao	13.000	5
Total	**108.024**	**41,6**

Fuente: (DOH, 2020), información proporcionada para este informe.

A pesar de que no existe la suficiente cantidad de datos para trazar la evolución histórica del consumo de los sistemas APR, si es posible obtener una estimación de la dotación acorde con la distribución presentada en la Tabla II-23 (108.024 m^3/mes). Dado que este abastecimiento agrega tanto el entregado a los residentes permanentes de la comuna, como a los turistas, ambos deben ser considerados en el cálculo de la dotación. En cuanto a los turistas, estos pueden ser aproximados a partir de las pernoctaciones en la comuna de durante el año 2017 (506.259 pernoctaciones) de acuerdo a INE (2017). Suponiendo que no existe estacionalidad en el turismo (i.e., dichas pernoctaciones distribuyen de forma uniforme a lo largo del año), entonces estas equivalen a 1.387 habitantes permanentes. Sumando estos visitantes a la población comunal residente (10.996 habitantes) y asumiendo que el consumo per cápita de la población residentes es igual a la población visitantes se tiene entonces una dotación promedio de 287 l/hab/día.

II.4.3 Consumo de agua para fines productivos

Este capítulo contiene el diagnóstico realizado para el consumo de agua del sector agrícola, minero y turístico de la cuenca Salar de Atacama.

II.4.3.1 Consumo de agua en la agricultura

Tal como fue presentado en la Etapa I, la caracterización de la demanda agrícola proviene de distintas fuentes, particularmente de estudios desarrollados para la Comisión Nacional de Riego (CNR) que se complementan con otros estudios e información de caracterización del uso del suelo. Estas distintas fuentes permiten caracterizar la superficie que tiene

actividades agrícolas, el tipo de cultivos y la demanda de agua para riego de estos cultivos.

Respecto a la actividad agrícola en el área de estudio, el territorio cercano a la localidad de San Pedro de Atacama concentra la mayor cantidad de hectáreas regadas, esto principalmente debido a la disponibilidad de agua desde el Río San Pedro y sus afluentes, así como otros cursos superficiales desde donde son abastecidos los cultivos. La Figura II-42 muestra la ubicación de las distintas áreas agrícolas en la cuenca del Salar de Atacama de acuerdo con las coberturas de suelo clasificadas como "cultivo" (Zhao et al., 2016), las cuales abarcan una superficie de 1.720 ha. En la Figura II-43 se visualizan estas áreas de cultivo y los sistemas de canales cercanos en torno al poblado de San Pedro de Atacama.

A pesar de que la superficie total agrícola que se reporta en el censo agrícola (1.367 ha, Tabla II-24) es diferente al total identificado por Zhao et al. (2016), esta información es relevante dado que es necesario, para efectos de este estudio, el conocer la distribución espacial tanto de las áreas agrícolas, como de otras coberturas de suelo presentes en la cuenca. De manera complementaria, se contrastó con la cobertura de predios del sector asociado a los Ayllus en torno a San Pedro de Atacama (CNR-ARRAU, 2014), siendo este similares en extensión y ubicación.

La Tabla II-24 presenta la estructura de cultivos presentes en la cuenca de San Pedro de Atacama y la demanda hídrica calculada por CNR-AMPHOS21 (2017) considerando los requerimientos mensuales para cada cultivo según la superficie cuantificada en el Censo Agropecuario de 2007.

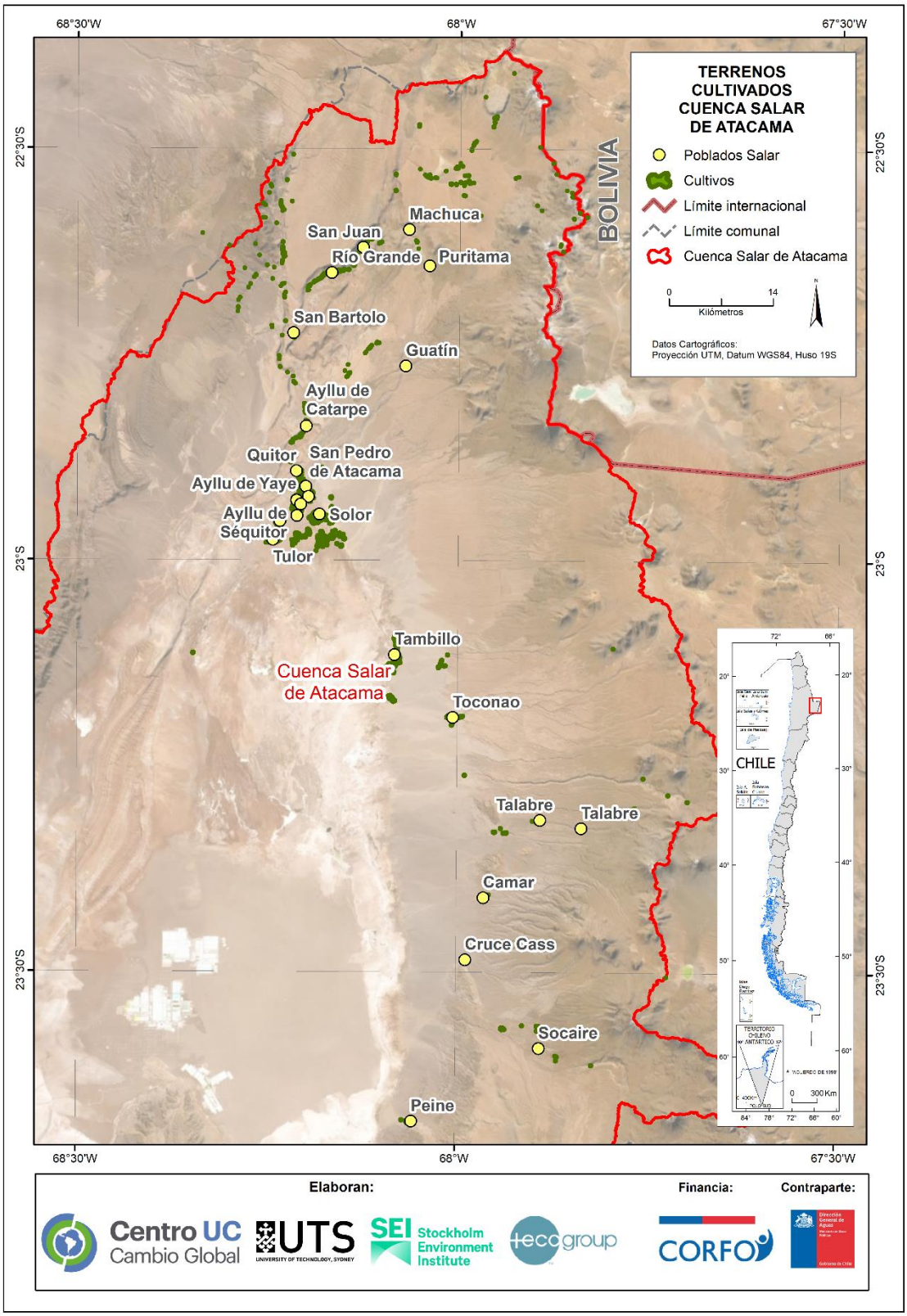


Figura II-42: Terrenos cultivados en la cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Zhao et al. (2016)

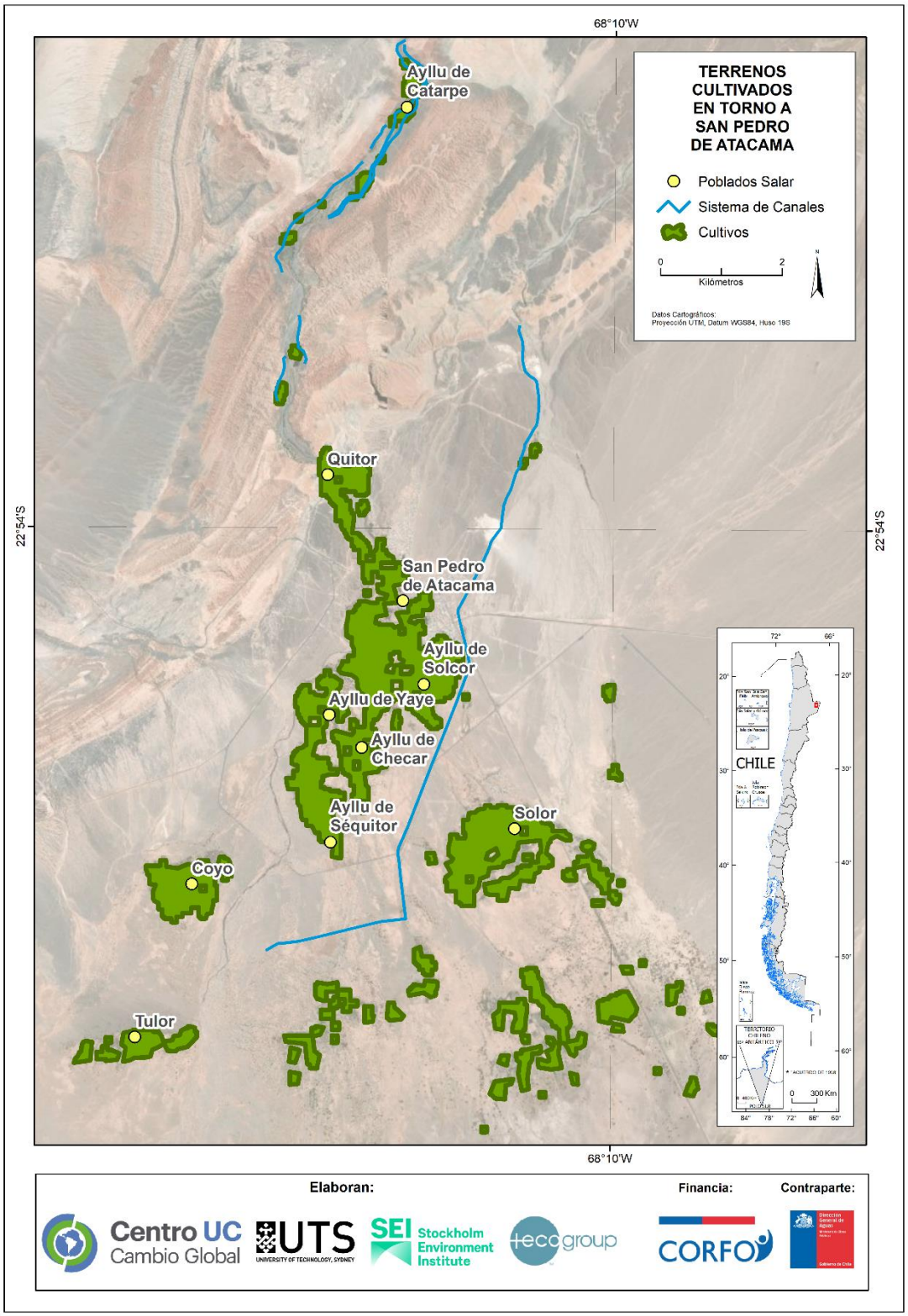


Figura II-43 Áreas agrícolas y sistema de canales cercanos en torno a San Pedro de Atacama. Fuente: Zhao et al. (2016) y Cobertura de Canales CNR

Tabla II-24: Categorización de cultivos agrícolas presentes en la comuna de San Pedro de Atacama y necesidades hídricas (m³/mes).

Cultivo	Sup (ha)	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Total
Otros Cereales	-	333	571	628	809	944	1.097	832	407	-	-	-	-	5.621
Cebada Forrajera	-	3.877	3.363	7.773	9.635	9.848	8.649	-	-	-	-	-	-	43.145
Papa	5	8.378	13.991	16.845	19.407	18.564	14.394	-	-	-	-	-	-	91.579
Quínoa	9	32.766	27.361	31.597	45.632	55.967	65.092	70.856	48.501	-	-	-	-	377.773
Trigo Blanco	23	1.379	2.364	2.597	3.347	3.905	4.541	3.441	1.684	-	-	-	-	23.258
Centeno (grano seco)	2	33.563	51.815	69.502	75.693	617	41.006	-	-	-	-	-	-	333.278
Maíz (grano seco)	33	20.561	19.621	18.627	23.327	28.927	33.643	33.224	32.608	-	-	-	-	210.539
Ajo	13	1.031	2.164	2.066	2.146	-	-	-	-	-	-	-	-	7.407
Acelga	1	339	647	947	812	-	-	-	-	-	-	-	-	2.746
Cebolla temprana	-	106.522	158.125	210.517	229.788	244.781	-	-	-	-	-	-	-	949.733
Choclo	105	779	694	725	1.526	2.669	3.137	-	-	-	-	-	-	953
Coliflor	1	594	1.248	1.191	1.238	-	-	-	-	-	-	-	-	4.271
Cilantro	1	29.706	2.797	298	24.338	38.868	48.607	56.473	60.303	-	-	-	-	316.065
Haba	19	3.493	-236	128	45	9.263	10.773	13.231	19.491	23.376	23.605	18.134	9.705	135.463
Huerta casera	12	429	1.929	1.963	2.169	2.539	-	-	-	-	-	-	-	903
Lechuga	1	763	342	-30	1.018	301	4.316	5.936	7.621	8.824	7.541	3.005	1.753	44.099
Otras hortalizas	3	302	347	400	435	429	-	-	-	-	-	-	-	1.913
Tomate consumo fresco	-	621	977	931	1.316	1.531	123	-	-	-	-	-	-	6.606
Zanahoria	1	603	475	905	1.251	1.502	1.894	1.369	-	-	-	-	-	7.999
Zapallo temprano y de guarda	1	93	171	243	229	196	105	-	-	-	-	-	-	1.038
Otros industriales	-	50	33	-1	11	73	170	231	330	336	328	268	173	2.003
Flores	-	2.535	2.608	2.808	3.586	4.217	3.504	-	-	-	-	-	-	19.258
Ciruelo japonés	2	322	313	322	439	519	537	585	563	-	-	-	-	36
Damasco	-	47.667	31.866	-891	10.458	70.417	163.794	222.016	317.509	323.664	315.808	25.733	166.598	1.926.236

Cultivo	Sup (ha)	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Total
Huerto casero	106	154.919	127.373	110.602	12.617	150.222	174.713	196.643	211.673	2.146	216.459	205.864	180.481	2.069.719
Limonero	5	1.341	1.567	1.843	2.539	2.971	3.071	3.085	-	-	-	-	-	16.416
Manzano rojo	1	4.898	5.726	6.731	9.275	10.853	1.122	1.127	-	-	-	-	-	59.973
Manzano verde	5	17.515	20.476	24.072	33.168	38.812	40.124	40.304	-	-	-	-	-	214.472
Membrillo	16	7.203	5.923	5.143	5.867	6.985	8.124	9.144	9.842	9.979	10.065	9.572	8.392	96.239
Naranjo	5	1.861	1.521	1.243	1.507	1.833	2.132	266	2.959	2.981	2.908	263	2.168	26.401
Olivo	2	2.753	2.044	152	808	4.066	9.458	1.282	18.335	1.869	18.236	14.656	962	111.638
Otros frutales	6	20.532	24.003	28.218	3.888	45.496	47.034	47.246	-	-633	-633	-	-	250.143
Peral europeo	19	1.611	1.339	995	1.184	1.586	1.845	2.143	2.622	2.655	259	2.343	2.064	22.976
Tuna	1	3.088	4.095	4.929	7.419	8.617	8.843	8.904	6.857	-	-	-	-	52.753
Uva de mesa	5	3.629	5.566	7.335	10.853	12.508	13.162	13.682	-	-	-	-	-	66.736
Tintas viníferas corrientes	5	1.399	2.146	2.828	4.184	4.822	5.074	5.274	-	-	-	-	-	25.725
Blancas viníferas corrientes	2	162	249	328	485	559	588	611	-	-	-	-	-	2.983
Blancas viníferas finas	-	2.048.823	1.728.716	1.551.109	1.712.798	2.017.746	2.346.710	2.726.459	3.032.683	3.093.242	3.018.202	2.765.116	2.386.883	28.428.486
Plantas forrajeras	957	2.566.449	2.279.519	2.145.142	2.418.253	2.866.963	3.078.598	3.488.439	3.773.988	3.697.714	3.615.109	3.278.917	2.767.837	35.976.927
TOTAL (m3/mes)		1.875	1.665	1.567	1.767	2.095	2.249	2.549	2.757	2.702	2.641	2.396	2.022	26.286
Tasa de riego ponderada (m3/ha/mes)		333	571	628	809	944	1.097	832	407	-	-	-	-	5.621

Fuente: CNR-AMPHOS21 2017 a partir de INE, 2007

Nota: No se ha considerado el uso de decimales para facilitar la presentación de resultados en el documento.

El estudio de CNR-ARRAU (2014) desarrolló también un análisis de la estructura de cultivos y demanda de agua por la actividad agrícola asociada a los Ayllus de San Pedro de Atacama (Figura II-43), mediante la realización de encuestas y caracterización de las explotaciones agrícolas de la zona (Tabla II-25).

Tabla II-25: Uso de suelo en área circundante a San Pedro de Atacama.

Cultivo	Superficie	
	Ha	%
Maíz Choclo	134,5	19
Chacra casera	8,1	1,1
Otros cultivos	7,8	1,1
Alfalfa	461,1	65
Otras praderas	14,1	2
Peral	16,9	2,4
Peral/Alfalfa	22,7	3,2
Vid vinífera	3,7	0,5
Huerto frutal	38,7	4
Huerto frutal / Alfalfa	11,4	1,6
Total riego	**709**	**100**
Riego con agua superficial	709	48,1
Forestado	7,9	0,5
Indirectamente productiva	107,7	7,3
Sin uso potencialmente regable	632,3	42,9
Improductiva	17,2	1,2
Total predial	**1474,2**	**100**

Fuente: CNR-ARRAU (2014)

De acuerdo con la información presentada por el Censo Agrícola y Forestal (2007), la superficie regada total en la comuna de San Pedro de Atacama correspondería a 1.467 ha, en donde el sistema principal de riego corresponde al riego gravitacional, incluyendo el método por tendido con un 98 % de la superficie regada (riego por surco es un 1 %) (CNR-ARRAU, 2014) y fracciones muy menores con presencia de riego tecnificado (aspersión o goteo). En relación con las dinámicas de cambio en la estructura agrícola, específicamente en los Ayllus asociados al poblado de San Pedro de Atacama (Figura II-42), las tierras efectivamente regadas o cultivadas han bajado de 1.210 hectáreas en 1964, a 709 en 2014. Esto significa que la superficie potencialmente cultivable se redujo en 280 hectáreas (16%) y la superficie efectivamente cultivada disminuyó en 501 hectáreas (41%), mientras que en el mismo período se reduce el agua disponible para riego en cerca del 50% (Sepúlveda-Rivera et al., 2015).

De acuerdo con el estudio de CNR-ARRAU (2014), considerando una evapotranspiración potencial total anual de 1.120 mm/año para el área de los Ayllus Río San Pedro y los correspondientes coeficientes de cultivo para la matriz presentada anteriormente, las

demandas netas anuales de agua para riego por tipo de cultivo, tasas de riego aplicado por hectárea y tipo de cultivo, así como las demandas brutas según superficie y tipo de cultivo se presentan en la tabla a continuación.

Tabla II-26: Demandas netas, tasa de riego y demanda bruta anual según tipo de cultivo en el área de Ayllus de San Pedro de Atacama.

Cultivo	Demanda neta (mm/año)	Tasas de riego (m3/ha/año)	Demanda Bruta (m3/año)
Maíz choclo	663,9	21.632	2.910.451
Chacra casera	851,0	28.250	227.716
Otros cultivos	502,0	10.109	79.112
Alfalfa	490,7	16.356	7.542.560
Otras praderas	757,0	25.234	356.236
Peral	758,9	25.297	426.651
Peral / Alfalfa	1004,1	33.471	758.726
Vid vinífera	642,8	7.650	28.088
Huerto frutal	694,2	23.140	663.503
Huerto frutal / Alfalfa	939,6	31.321	358.859
		Total (m3/año)	13.351.632
		Tasa de Riego Ponderada (m3/ha)	18.831

Fuente: CNR-ARRAU, 2014

Un aspecto relevante a la hora de determinar las demandas reales por parte de los cultivos, es la consideración de las necesidades adicionales por concepto de lavado de sales desde el suelo con tal de prevenir o aliviar un estrés salino para los cultivos. Esto debido a la alta concentración de sales en el agua de riego, buscando desplazar las sales por debajo del nivel de raíces. La Tabla II-27 muestra la demanda bruta final necesaria en la situación actual, que corresponde a la demanda bruta desde los cultivos, más los requerimientos de lixiviación para los distintos tipos de cultivos presentes. Como conclusión se desprende que la demanda bruta final total actual es de 17,9 Mm³ al año, esto sin considerar pérdidas en el sistema de conducción extrapredial ni el reúso de las aguas.

Tabla II-27: Demanda bruta final actual considerando lámina de agua adicional para lixiviación (m³/mes) y tasa de riego ponderada final en los Ayllus de San Pedro de Atacama (m³/mes).

CULTIVO	Sup (ha)	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	TOTAL
Maíz Choclo	134,5	0	0	0	0	0	233.673	377.947	547.870	678.870	819.944	752.441	493.207	**3.903.952**
Chacra Casera	8,1	24.495	0	0	0	0	18.872	24.570	37.210	48.958	55.993	53.926	39.963	**303.988**
Otros Cultivos	7,8	13.046	18.939	15.246	11.165	11.556	0	0	0	0	16.340	17.938	20.890	**125.121**
Alfalfa	461,1	0	0	0	0	0	0	918.671	1.578.388	1.956.390	2.048.873	1.972.985	1.609.216	**10.084.523**
Otras Praderas	14,1	39.970	29.519	20.686	17.778	21.316	28.900	38.963	47.883	59.350	62.156	59.854	48.818	**475.192**
Peral	16,9	62.525	0	0	0	0	0	30.501	41.654	105.913	121.023	116.541	97.648	**575.805**
Peral / Alfalfa	22,7	84.036	0	0	0	0	0	63.728	95.049	190.900	213.444	205.584	171.226	**1.023.967**
Vid Vinífera	3,7	0	0	0	0	0	2.788	5.038	7.629	11.572	12.119	9.453	7.291	**55.891**
Huerto Frutal	28,7	97.342	0	0	0	0	0	55.019	95.684	143.245	184.029	177.251	137.740	**890.309**
Huerto Frutal / Alfalfa	11,4	38.867	0	0	0	0	0	33.384	57.869	81.574	99.040	95.353	75.075	**481.162**
TOTAL (m3/mes)	**709,0**	**360.280**	**48.458**	**35.933**	**28.943**	**32.872**	**284.234**	**1.547.820**	**2.509.236**	**3.276.772**	**3.632.962**	**3.461.327**	**2.701.074**	**17.919.910**
TOTAL (l/s)		**139**	**18**	**14**	**11**	**12**	**110**	**578**	**968**	**1.223**	**1.356**	**1.431**	**1.008**	**-**
Tasa de Riego Ponderada (m3/ha/mes)		**508,1**	**68,3**	**50,7**	**40,8**	**46,4**	**400,9**	**2.183,0**	**3.539,0**	**4.621,5**	**5.123,9**	**4.881,8**	**3.809,6**	**25.274,0**

Fuente: CNR-ARRAU, 2014

A partir de la comparación de las Tabla II-24 y Tabla II-27, se hacen evidentes las diferencias en los consumos desde la actividad agrícola con algo menos de 36 Mm^3 de demanda al año para toda la cuenca desde el estudio de CNR-AMPHOS21 (2017) y los 17 Mm^3 presentados en el estudio de CNR-ARRAU (2014). Esto se debe principalmente a las diferencias en las áreas consideradas en el análisis de ambos estudios (comuna de San Pedro completa vs Ayllus de San Pedro de Atacama solamente), así como también la estructura de cultivos y caracterización de las explotaciones agrícolas la que en el estudio CNR-ARRAU (2014) considera encuesta a usuarios y una caracterización más detallada de los cultivos en los Ayllus del área de San Pedro de Atacama.

En lo que respecta a los sistemas de aplicación del agua de riego, los predios agrícolas o Ayllus de San Pedro de Atacama mantienen los turnos de riego cada 18 a 22 días (CNR, 2000), los cuales se distribuyen según los derechos de cada regante, los cuales son proporcionales al tamaño de la tierra que posee. Dependiendo del tipo de cultivos se consideran dos horas (trigo, alfalfa, frutales) o tres horas (maíz y hortalizas) por hectárea mediante riego por inundación, el cual permite el lavado de sales de los suelos (Sepúlveda-Rivera et al., 2015). Un aspecto a considerar a la hora de determinar el uso efectivo de agua por parte de los predios agrícolas de las zonas de San Pedro de Atacama, es que el caudal y volumen de agua que se entrega a nivel de predio es irregular. Uno de los factores más importantes tiene relación con la falta de elementos de medición de caudal a nivel de bocatoma, siendo dependiente de la operación manual del celador del canal. A esto se suman las frecuentes intervenciones que usuarios realizan aguas arriba, alterando la distribución del agua en los turnos correspondientes (CNR, 2000), además de limitaciones en términos de la infraestructura de canales, tranques de acumulación, y nivel tecnológico aplicado al riego (CNR-ARRAU, 2014).

II.4.3.2 Consumo hídrico en minería

Tal como fue presentado en la primera Etapa, la minería es la principal actividad económica de la región de Antofagasta. En particular, destaca en la cuenca Salar de Atacama la industria de la minería no metálica, la cual se ha desarrollado en torno a uno de los salares más relevantes del mundo, el Salar de Atacama (COCHILCO, 2013). La operación se centra en la explotación, producción y comercialización de productos que se extraen de la salmuera, como los compuestos de litio (carbonato de litio, hidróxido de litio y cloruro de litio), potasio (cloruro de potasio y sulfato de potasio), y boro (ácido bórico), mediante piscinas de evaporación solar. Por otra parte, pese a que no hay actividad de minería metálica al interior de la cuenca, si existen extracciones de agua fresca por empresas ubicadas fuera de la cuenca y que son consideradas en este apartado.

II.4.3.2.1 Extracciones de salmuera asociado a la minería no metálica

Desde sus comienzos en el año 1977, cuando CORFO constituye 59.820 pertenencias mineras en el Salar de Atacama (denominadas OMA), y en particular estos últimos 15 años, esta industria ha experimentado un crecimiento significativo, el cual se ve reflejado

claramente en el incremento en la producción de carbonato de litio equivalente o LCE[27] (ver Figura II-44). Al 2020, estas pertenencias mineras son explotadas en virtud de contratos firmados entre CORFO y dos operadores privados: SQM Salar S.A. y Albemarle Limitada.

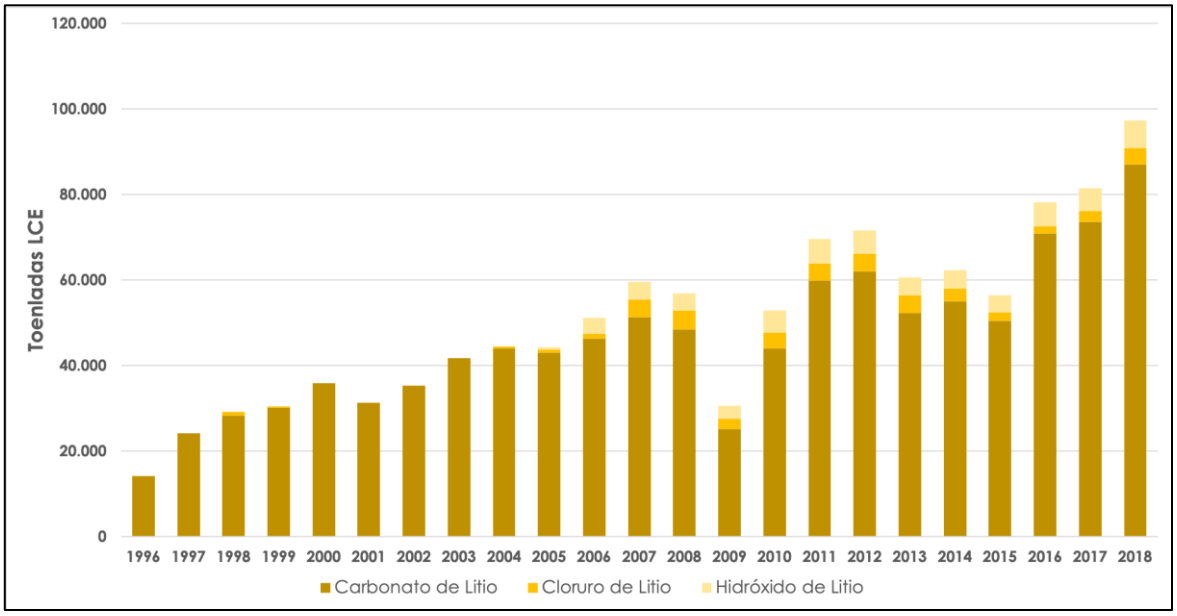


Figura II-44: Evolución de la producción nacional de litio.
Fuente: Elaborado en base al Anuario de la Minería de Chile de cada año publicado por SERNAGEOMIN (2019).

La extracción de salmuera en el núcleo del Salar de Atacama producto de la actividad minera no metálica antes descrita, tiene una relación en el balance hídrico local. Para contextualizar dicho consumo de salmuera, es necesario distinguir entre las autorizaciones ambientales vigentes que regulan las tasas de bombeo para cada operador, las cuales se basan en las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) aprobadas mediante Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA), y la extracción real reportada por cada operador.

La operación de SQM Salar S.A. se basa en la RCA N°226/2006 del proyecto "EIA Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama". Esta regla autoriza una tasa máxima de extracción de salmuera (como valor promedio anual), en función de la cantidad total de salmuera que se reinyecte en bitterns y la reinyección indirecta (i.e., la salmuera que se infiltra desde las tortas de acopio de sales de descarte). Debido a la importante variación en estos valores, el hidrograma de la Figura II-45 solo muestra las extracciones netas de este operador.

[27] Medida de equivalencia entre litio metálico y carbonato de litio, medido como: 1 tonelada de Litio = 5,32 toneladas de LCE.

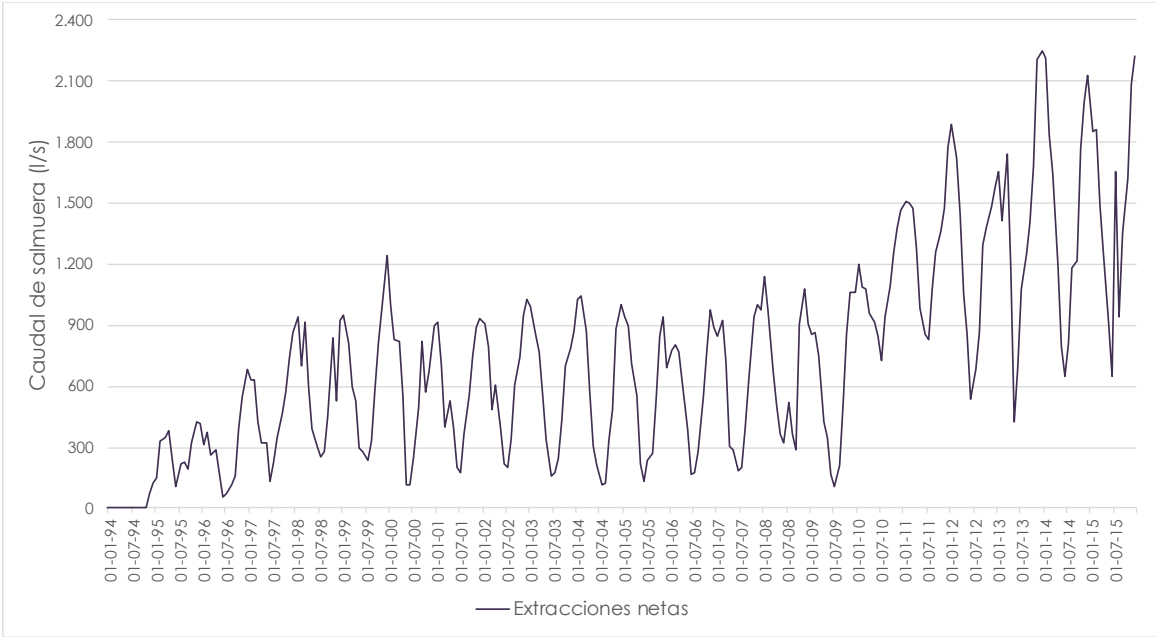


Figura II-45: Extracción neta de salmuera (extracción menos reinyección) por SQM S.A.
Fuente: (Comité de Minería No Matálica-Amphos21, 2018).[28]

La operación de Albermale se basa en la RCA N°021/2016 del proyecto "EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de evaporación Solar en el Salar de Atacama". Este se centró en el aumento progresivo en la extracción de salmuera desde los 142 l/s inicialmente autorizados a 442 l/s, mediante incrementos semestrales de 60 l/s, iniciándose desde la fecha de término de construcción de los pozos del Plan de Alerta Temprana. Al 2020, por tanto, dicha explotación ya se encuentra lograda, explotando así 442 l/s promedio anuales (ver Figura II-46).

[28] Se encuentra en desarrollo un modelo numérico hidrogeológico al año 2021, en base al cual se actualizarán las series de datos de extracciones aquí presentadas. Esto aplica para toda la información que se presenta en esta sección.

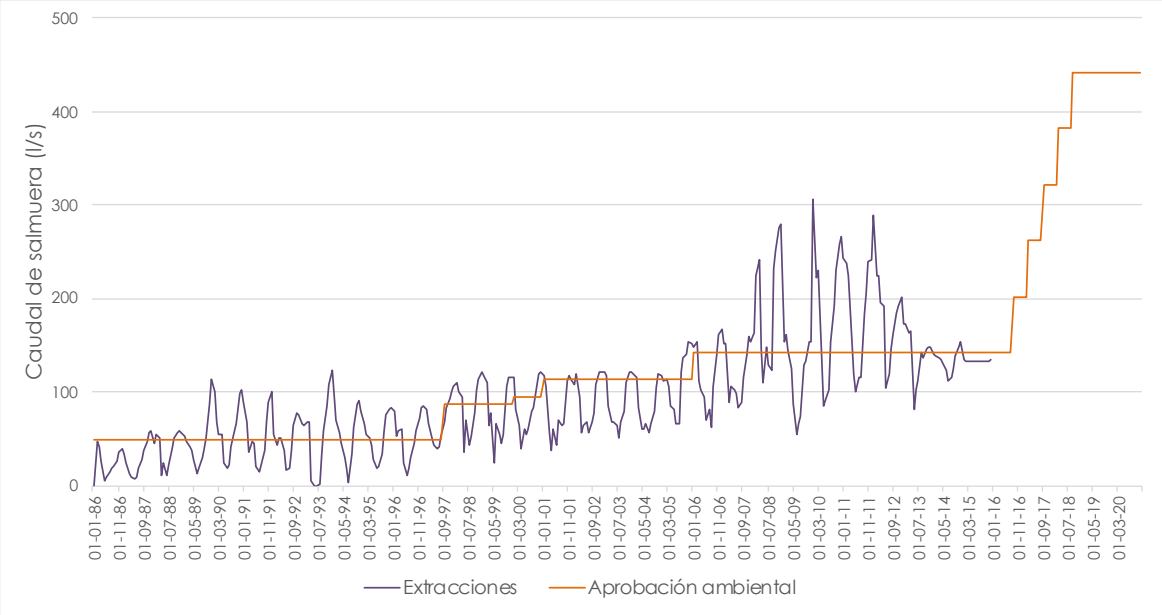


Figura II-46: Extracción neta de salmuera y caudal aprobado por RCA para Albermale.
Fuente: (Comité de Minería No Matálica-Amphos 21, 2018).

II.4.3.2.2 Extracciones de agua fresca asociadas a la minería metálica y no metálica

En cuanto a extracciones de agua fresca (pozos) en la cuenca para la minería (metálica y no metálica), se realiza primero un análisis de los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas presentes en el Catastro Público de Aguas (CPA) de la región de Antofagasta, tomando en cuenta que se ubiquen ya sea (1) dentro de los límites de la comuna de San Pedro de Atacama, o (2) en la cuenca del Salar de Atacama (ver Tabla II-28).

Tabla II-28: Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas para uso minero catastrados en la cuenca del Salar de Atacama.

Nombre Solicitante	Caudal Anual Promedio (l/s)
Compañía Minera Zaldivar SPA	625,3
Minera Escondida Limitada	1.835,8
Minera Spence	450
SQM Salar S.A.	549
Exploraciones San Pedro S.A.	150
Albemarle Ltda.	15

Nota: Se realizó un análisis geoespacial de los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas para refinar el listado obtenido del CPA. Mayor detalle consultar Anexo 2 de la Etapa II.
Fuente: Elaboración propia en base al Catastro Público de Aguas (CPA) de la DGA (Diciembre 2019)

Como se observa en la Tabla II-28, los dos operadores en la cuenca que extraen salmuera (SQM Salar S.A. y Albemarle) también extraen agua fresca para sus operaciones. Además, se suma a este listado Compañía Minera Zaldívar (CMZ) la cual, aunque sus faenas están fuera de los límites de la cuenca (i.e., la empresa extrae agua y la conduce a sus instalaciones), tiene RCA aprobada. Cabe destacar que a partir de diciembre del año 2019 deja de operar la extracción de agua fresca por parte de Minera Escondida dado que cesa su permiso ambiental de extracción. A continuación, se detallan las RCA y los proyectos asociados a las mismas, considerando para estos efectos los históricos, en operación, y en evaluación ambiental.

Minera Escondida Limitada

MEL produce concentrados y cátodos de cobre a través de la explotación de dos rajos abiertos y posteriores procesos de flotación y lixiviación. Toda su actividad productiva (operada por BHP Billiton) se sustenta en la RCA N°0001/1997 del proyecto "Lixiviación de óxido de cobre y aumento de la capacidad de tratamiento del mineral sulfurado". La importancia de este proyecto para los recursos hídricos de la cuenca del Salar de Atacama, radica en que este consideró la extracción de aguas subterráneas desde el campo de pozos en el sector de Monturaqui (zona sur de la cuenca Salar de Atacama), por un período de 21 años (hasta 2019) y a una tasa de 1.400 l/s. Estos recursos son extraídos, impulsados y enviados hasta el sector de las operaciones mineras de MEL mediante un acueducto, donde se integran a la matriz de aguas con que MEL abastece sus operaciones.

Como extensión de la operación del sistema de extracción de aguas subterráneas y de sus faenas, MEL ingresó a evaluación ambiental el proyecto Monturaqui en Junio de 2017, considerando un período de 11 años (entre los años 2020 y 2030, inclusive), y un caudal medio anual de bombeo de 640 l/s durante todo este período. Sin embargo, MEL solo tiene autorización ambiental de extracción de agua dulce hasta diciembre de 2019.

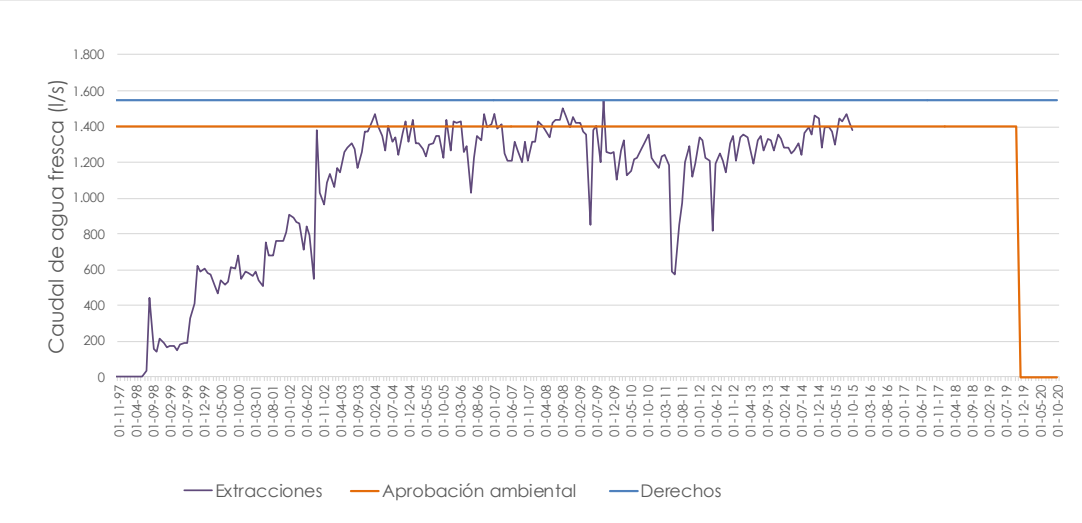


Figura II-47: Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, extracciones de agua fresca, y caudales aprobados ambientalmente (promedio anual) para MEL.
Fuente: Comité de Minería No Matálica-Amphos21 (2018).

Compañía Minera Zaldívar

CMZ inicia sus faenas mineras en la región de Antofagasta con la aprobación del "Proyecto Zaldívar" en 1993 con la RCA N°574/1993. Al igual que MEL, CMZ enfocó sus operaciones principalmente en la producción de cátodos de Cobre (entre otros compuestos y procesos), por un período de 20 años y un caudal aprobado de 500 l/s a ser extraído desde pozos ubicados en el sector de Negrillar (al interior de la cuenca del salar). De allí, el agua es conducida hasta las instalaciones de faenas mediante un acueducto con dos estaciones de bombeo.

Como continuación de este proyecto inicial, en 2010 se aprueba la EIA del proyecto "Modificaciones Faena Minera Zaldívar" y la RCA 47/2010. Con ello, a pesar de que CMZ no modifica la cuota de extracción de aguas subterráneas (500 l/s), si asegura un suministro continuo por un período de 13 años más.

Con el objetivo de extender su operación, ahora hasta el 2031, en Junio de 2018 CMZ presenta el proyecto "Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldívar" al Servicio de Evaluación Ambiental, proyecto que se encuentra en estado de calificación. A diferencia de la anterior extensión, este proyecto si modifica la extracción de aguas subterráneas desde el sector de Negrillar al: (1) disminuir la tasa de bombeo de agua aprobada (500 l/s), a partir de la aprobación del proyecto y hasta mayo de 2025, a un caudal de 212,75 l/s promedio anual; y (2) extender la extracción de aguas desde Negrillar, desde junio de 2025 (inicial) hasta el año 2029, a un caudal de 212,75 l/s promedio anual y, para el período 2030 al 2031, a un caudal de 30 l/s promedio anual.

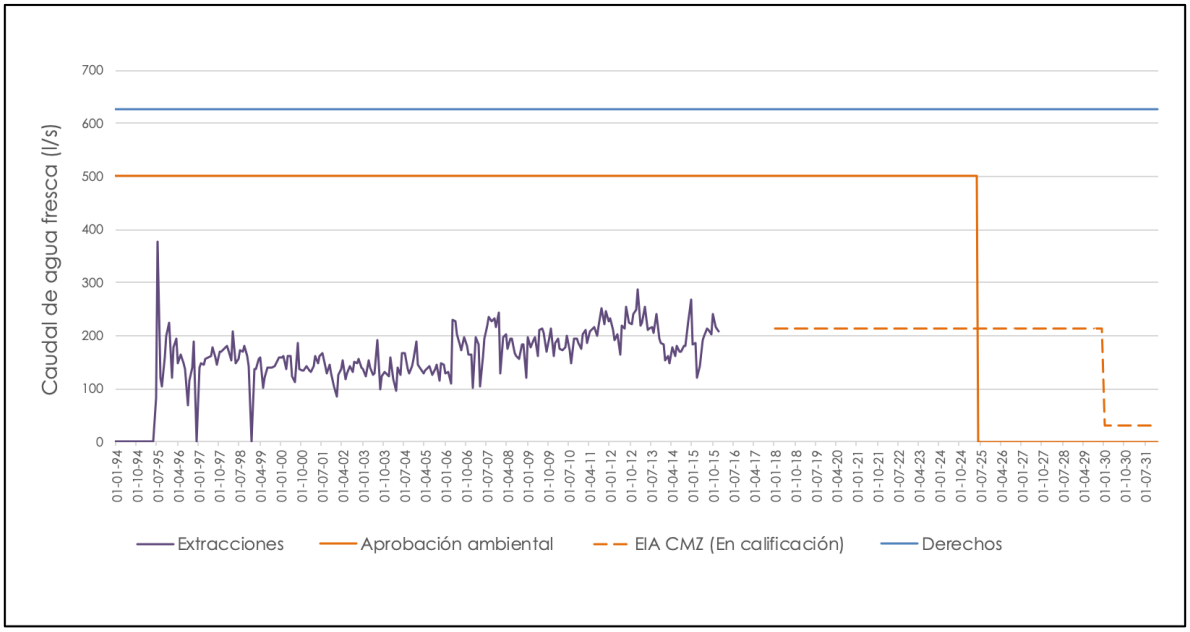


Figura II-48: Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, extracciones de agua fresca, y caudales aprobados ambientalmente (promedio anual) para CMZ.
Fuente: Comité de Minería No Matálica-Amphos21 (2018).

SQM Salar S.A.

La extracción de agua fresca por SQM Salar S.A. para sus operaciones en el salar se sustentan en la RCA N°226/2006 del proyecto "EIA Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama". En esta se permite la explotación de 3 pozos de bombeo de agua industrial (dulce) ubicados en el borde este del salar: Mullay 1, Allana y Camar 2, los cuales tienen derechos constituidos por 40 l/s, 40 l/s y 60 l/s respectivamente (140 l/s en total). Además, se contempla la construcción de tuberías que transporten el agua desde cada pozo a los centros de operación (MOP y SOP), tal y como se realiza actualmente para los dos pozos que ya tiene SQM en operación: Socaire 5B y P2 por 100 l/s en total. Cabe destacar que el resto de los pozos (309 l/s) no cuentan actualmente con una resolución de calificación ambiental para operar. La Figura II-49 resume las extracciones reales de SQM Salar S.A., sus derechos de aprovechamiento de aguas, y la aprobación ambiental vigente.

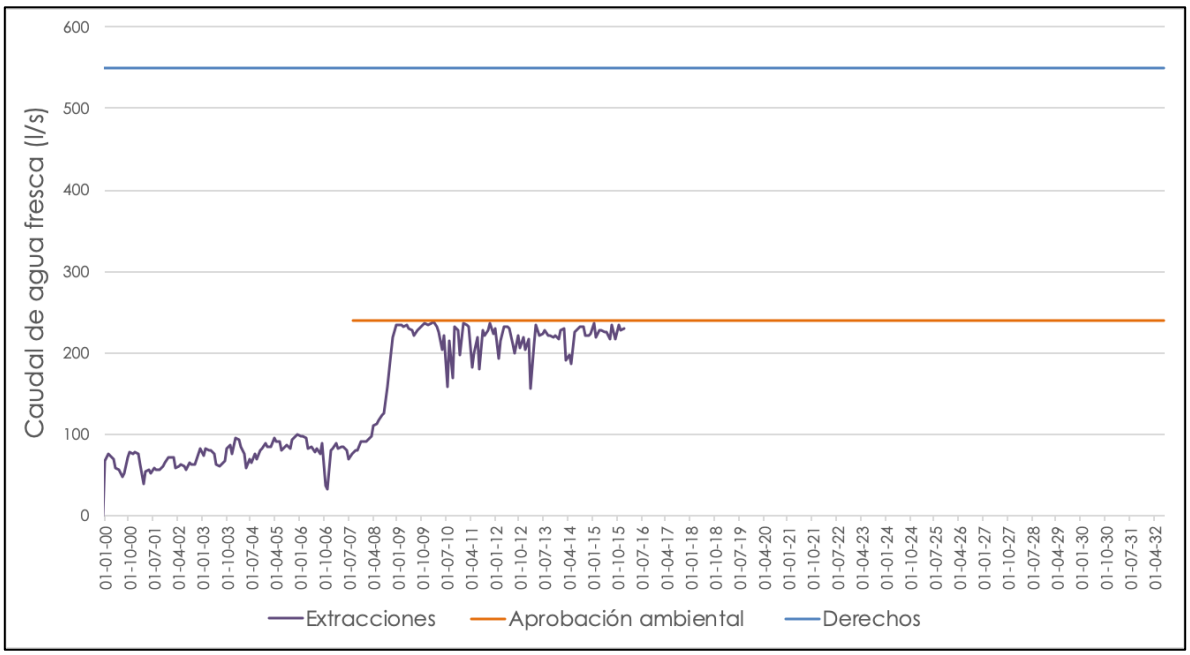


Figura II-49: Derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, extracciones de agua fresca, y caudales aprobados ambientalmente (promedio anual) para SQM Salar S.A.
Fuente: Comité de Minería No Matálica-Amphos21 (2018).

Albemarle Limitada

La RCA N°0403/2013 del proyecto EIA "Proyecto Secador Planta Potasa Rockwood Litio Limitada" consistió en la construcción y operación de una planta de granulación y la operación de una planta de secado en el Salar de Atacama. Ambas instalaciones corresponden a mejoras tecnológicas introducidas para la producción de cloruro de potasio (KCl) seco en la planta salar de Rockwood Litio Ltda. Por una vida útil de 20 años, este proyecto requiere del uso de agua industrial, obtenida de los pozos Tucucaro y Tilopozo cuyos derechos de aprovechamiento de aguas ascienden a 8,5 l/s (Resolución DGA N° 316/1983) y 10 l/s (Resolución DGA N° 453/1996) respectivamente. De esta oferta disponible (18,5 l/s), el proyecto solo demanda un total de 10,9 l/s para sus operaciones.

Por otro lado, en la RCA N°021/2016 del proyecto "EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama", se aprueba la extracción de 6 l/s de agua para uso industrial desde los pozos de Tilopozo y Tucúcaro durante la fase de operación del proyecto, alcanzando con ello un total de 16,9 l/s, tal y como se observa en la Figura II-50.

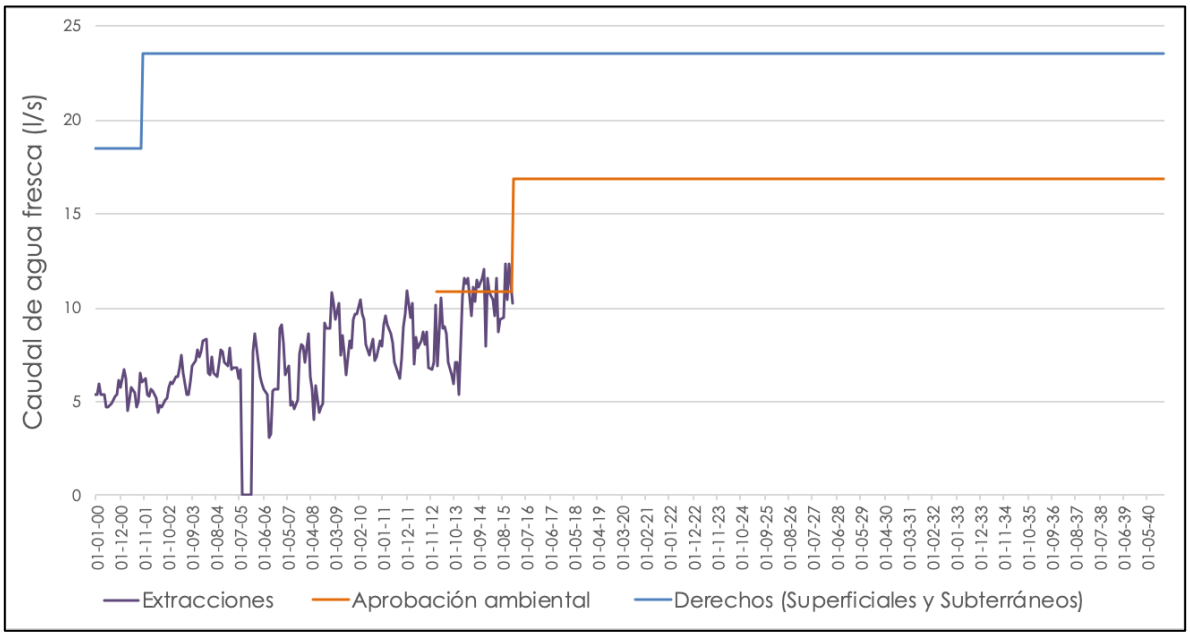


Figura II-50: Derechos de aprovechamiento de aguas, extracciones de agua fresca, y caudales aprobados ambientalmente (promedio anual) para Albemarle.
Fuente: Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018).

Tal y como se observa en los antecedentes presentados, el uso de agua fresca para las operaciones mineras ha tenido cambios a lo largo de años, dado que cada extracción debe ser aprobada ambientalmente por los servicios ambientales competentes. Por ello, cada operador ha debido continuamente ingresar proyectos que permitan ampliar la extracción de agua, y con ello asegurar el suministro para sus operaciones.

II.4.3.3 Consumo de agua asociada a la actividad turística

San Pedro de Atacama, principal poblado de la cuenca, es el destino turístico más reconocido de la región de Antofagasta (SERNATUR, 2014), y uno de los más importantes a nivel nacional. Se suman a este destino una serie de atractivos turísticos con alto valor cultural, ecológico, paisajístico y arquitectónico, los cuales atraen a miles de turistas nacionales y extranjeros cada año.

La importancia del turismo para la dinámica hidrológica-hidrogeológica de la cuenca radica en la demanda de agua potable que se produce por la población flotante (i.e., el consumo básico), la cual debe ser cubierta en gran parte por los sistemas locales de Agua Potable Rural. Para obtener una medida de dicho consumo, se utiliza la dotación obtenida en el Capítulo II.4.2 para la cuenca, junto al crecimiento anual del turismo. Este último es

aproximado a partir de las estadísticas del número de visitantes a la Reserva Nacional Los Flamencos (ver Figura II-51), principal destino turístico de la región y segundo destino turístico más importante del país (SERNATUR, 2014). El resultado se presenta en la Figura II-52.

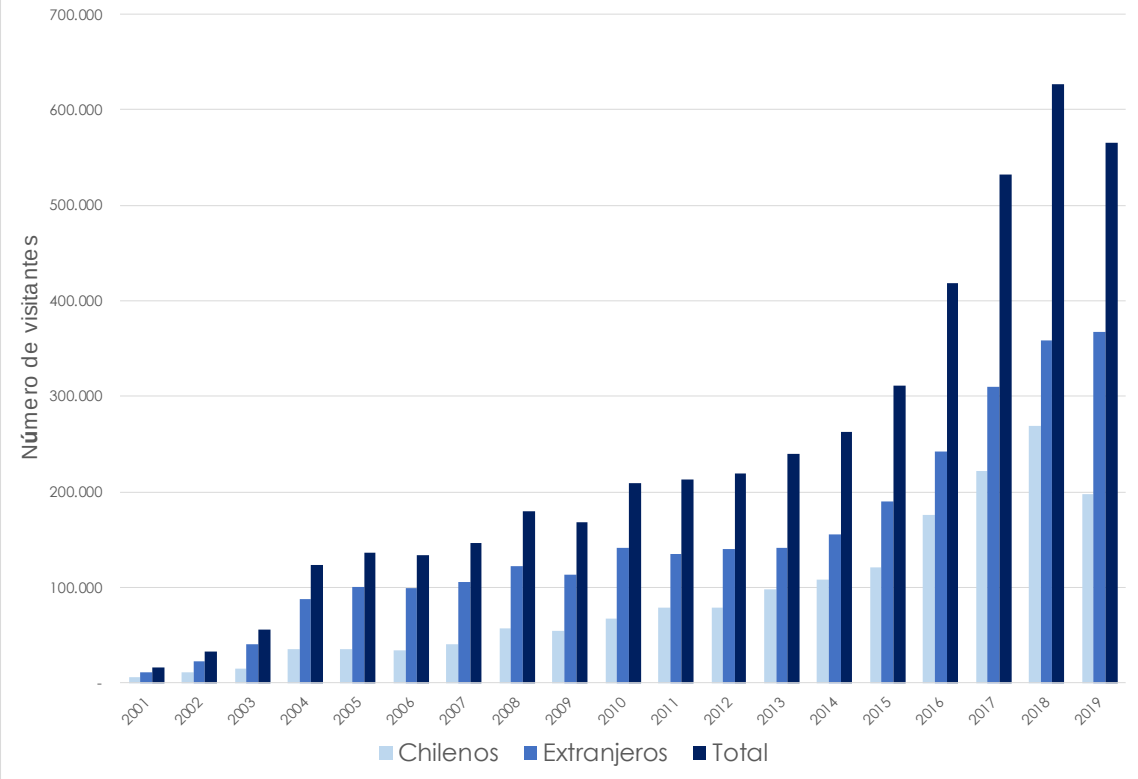


Figura II-51: Número de visitantes a Reserva Nacional Los Flamencos.
Fuente: Elaboración propia en base a Estadísticas de visitación a SNASPE (CONAF, varios años).

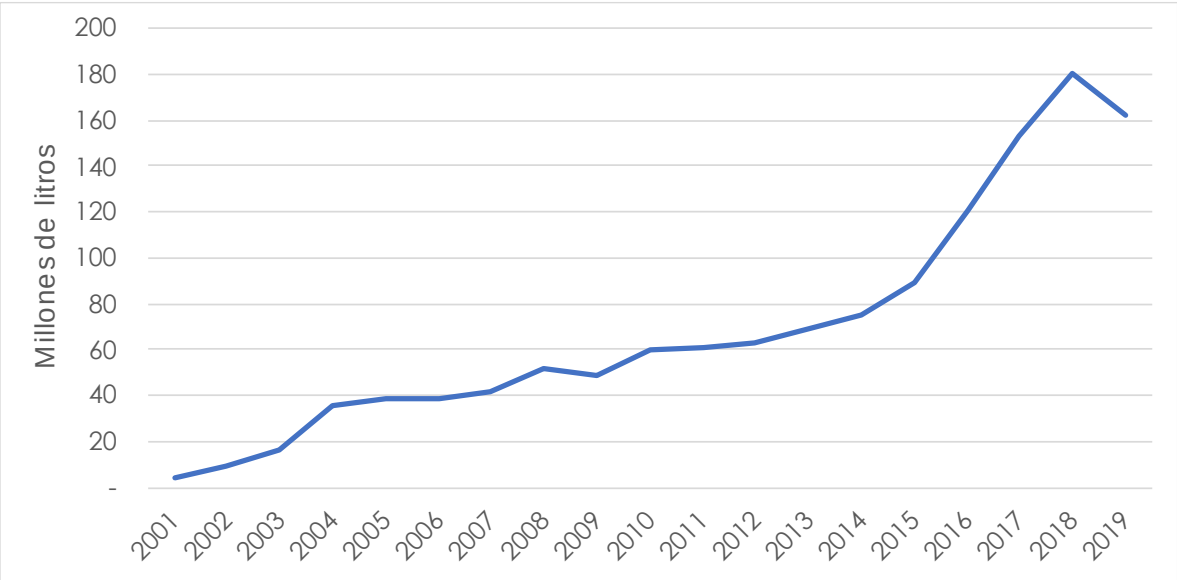


Figura II-52: Consumo histórico de agua asociado al turismo.
Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se observa en los antecedentes presentados, la tendencia histórica de la actividad turística ha sido de un sostenido crecimiento, probablemente producto del efecto combinado del alto valor de los atractivos turísticos locales, y la presencia de una Zona de Interés Turístico en toda el área de San Pedro de Atacama (SERNATUR, 2002). Sin embargo, a medida que dicha actividad crece, también lo hace la demanda por agua potable, incrementando con ello la presión sobre el recurso hídrico local. Cabe destacar que el leve descenso en el registro durante el año 2019 responde a la disminución de las visitas (pernoctaciones) al SNASPE en dicho año.

II.4.4 Necesidades de agua en ecosistemas acuáticos

Los ecosistemas lagunares hipersalinos y de salmueras albergan una importante biodiversidad de fauna, flora y microorganismos, todos adaptados a condiciones extremas. Aquellos sistemas ubicados en la cuenca del Salar de Atacama muestran ser sumamente importantes ya que destacan como sectores de hábitat y reproducción de aves (AMAKÁIK 2017) y como lugares de alta diversidad de microorganismos extremófilos (Dorador et al., 2018).

En las revisiones más recientes (AMAKÁIK 2017a) se menciona la escasez de estudios publicados que apunten a conocer los aspectos hidrológicos, hidrogeológicos, hidroquímicos e hidrogeoquímicos específicos de los sistemas lacustres. De acuerdo con información disponible hasta el momento (Aravena et al, 2019, presentación en congreso) se sugiere que la principal fuente de recarga de estos sistemas lagunares es a través de la recarga del acuífero aluvial. Al mismo tiempo, como se discutió en el Capítulo II.3.2.3.1 y Tabla II-13 de la presente Etapa, la principal salida de agua de los sistemas acuáticos se da por evaporación.

Se describen a continuación algunos aspectos conocidos con respecto a la relación entre las condiciones hidrológicas de estos sistemas lagunares y su relación con factores bióticos y abióticos de los ecosistemas presentes en ellas, y ya descritos en la Etapa I de este proyecto. La ubicación de los sistemas lagunares descritos se presenta en la Figura II-53.

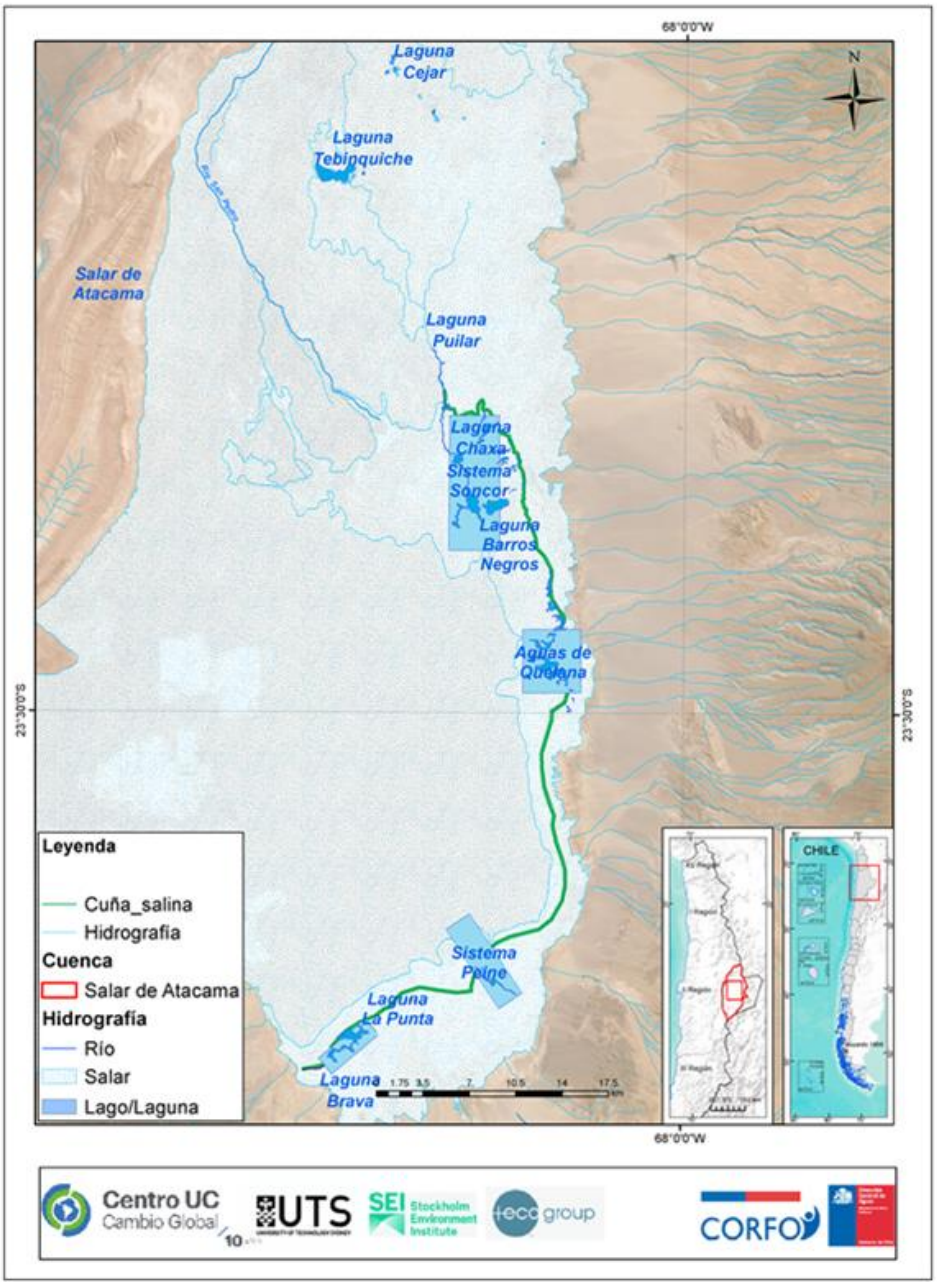


Figura II-53: Sistemas lagunares del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración propia a partir de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018)

II.4.4.1 Santuario de la Naturaleza Laguna Tebenquiche

Recientemente declarado como Santuario de la Naturaleza (ver Etapa I), la Laguna Tebenquiche corresponde a uno de los cuerpos de agua más grandes del Salar de Atacama, localizado en la parte norte del salar, a la altura del pueblo de Toconao (Demergasso et al., 2008; Dorador et al., 2009; Zúñiga et al., 1991).

Se caracteriza como una laguna salina a hipersalina (38-150 g/L (gramos de sal/litro)) (Farías et al., 2014), característica que varía estacionalmente. Presenta una conductividad promedio de 138 mS/cm. Se ha medido un pH moderadamente alcalino de entre 7,4 y 8,6 con concentraciones considerables de cloruros, sodio y sulfatos y en menores proporciones potasio, magnesio y calcio (AMAKÁIK 4).

Esta laguna se caracteriza por una alta diversidad de tapetes microbianos, sin embargo, no existen estudios que reporten relaciones claras entre factores físicos y químicos de la laguna con el componente biótico.

II.4.4.2 Reserva Nacional Los Flamencos

En las siguientes secciones se presentan las descripciones de los sistemas hidrológicos de Soncor y de Aguas de Quelana. Se entrega detalles de los cuerpos de agua que los componen, de dónde proviene el agua que los alimenta, las características de las aguas y los procesos que suceden en la interacción de los diferentes componentes.

II.4.4.2.1 Sistema Hidrológico de Soncor

Este sistema está conformado por tres lagunas: Chaxa, Barros Negros y Puilar. Este sistema se ubica en el norte del salar y se alimenta de los flujos provenientes del norte y este. Estas lagunas se generan debido al cambio del gradiente topográfico al llegar al salar y producto de los flujos subterráneos de agua dulce-salobre que afloran por boyancia producto de diferencias de densidad. Estos flujos subterráneos conforman el canal Burro Muerto, el cual alimenta las lagunas de Barros Negros, Chaxa y Puilar, además de brindar una conexión hidráulica entre estos dos últimos como se muestra en el esquema de este sistema. Según lo concluido en SGA (2015) las lagunas que componen el Sistema Hidrológico de Soncor son alimentadas por agua subterránea que ingresa al sistema proveniente de los acuíferos situados al norte y este. El agua descarga desde el norte a través del canal del Burro Muerto y descarga hacia el sur llegando a la laguna Barros Negros a través de otro canal.

Los datos de piezometría del sistema muestran cómo se alimenta a partir de recarga subterránea de la zona aluvial situada and este y a noreste (Salas et al., 2010). La Figura II-54 muestra la localización de estos sistemas, mientras que la Figura II-55 presenta el esquema conceptual del funcionamiento hidrogeológico de estas lagunas.

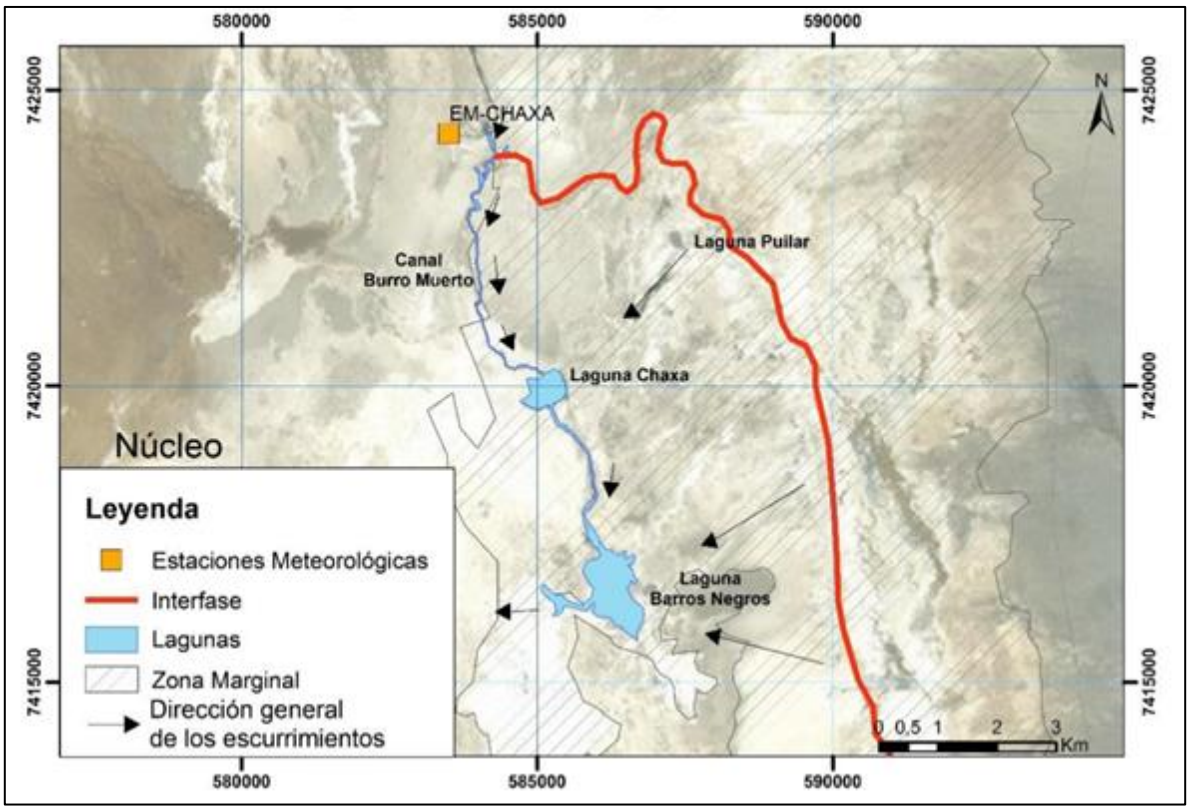


Figura II-54: Vista en planta del sistema Soncor.
Fuente: (SGA, 2015)

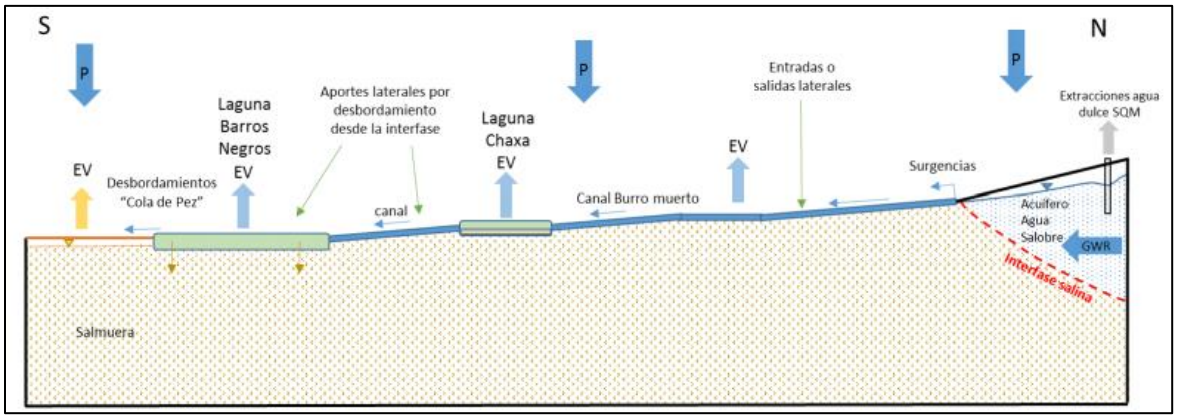


Figura II-55: Esquema conceptual del funcionamiento sistema Soncor. Balance entre precipitación, evaporación, extracciones y flujo subterráneo.
Fuente: (SGA, 2015)

La recarga de estos sistemas es un poco más compleja de acuerdo con lo que se describe en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018). Aquí se señala que desbordamientos de agua se producen dada la intercepción de la interfaz salina con la topografía del lugar. Estos desbordamientos fluyen superficial y subsuperficialmente llegando a concentrarse en su mayoría en el canal de Burro Muerto pero también en el canal que une la laguna Chaxa con la laguna de Barros Negros y en esta misma laguna también. A medida que el agua

fluye a través de los canales y lagunas antes descritos se ve afectada por procesos de evaporación. Su trayectoria termina desembocando en la zona de desbordamiento "Cola de Pez" e infiltrándose en el núcleo del salar.

A partir de las mediciones de nivel de las lagunas y precipitación de SGA (2015), se observa que la variación de los niveles del sistema somero de Soncor responden a la estacionalidad de las precipitaciones dentro del sistema. De esta forma, cuando las precipitaciones aumentan en el período estival, los niveles en las lagunas tienden a aumentar, para luego disminuir en las épocas de menor precipitación debido a la evaporación de estos cuerpos lagunares. El comportamiento de los niveles de las lagunas registrados por la reglilla L1-G4 difiere del resto debido a que se ubica más alejado de los cuerpos de agua principales, como se aprecia en la Figura II-56.

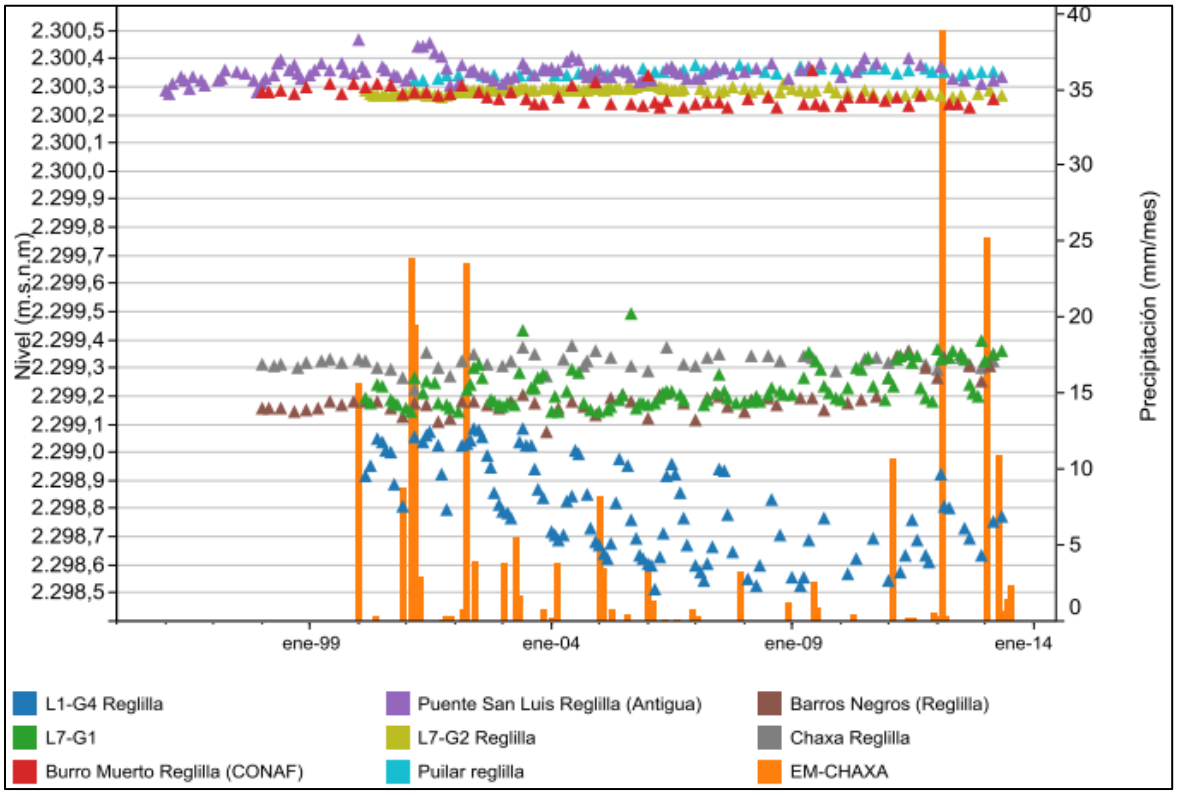


Figura II-56: Variaciones estacionales de los niveles de las lagunas del sistema Solcor y precipitación mensual en la estación CHAXA.
Fuente: (SGA, 2015)

Las lagunas que conforman este sistema se caracterizan por una alta salinidad y conductividad la que estaría dada por la localización de las lagunas dentro del núcleo del salar, por el mayor tamaño de la cuenca aportante del recurso hídrico y/o por diferencias en los procesos de alimentación de las aguas (AMAKÁIK 4). La salinidad varia espacial y temporalmente entre 4 a 160 mS/cm con registros más altos en la laguna Barros Negros y durante las estaciones de verano. Las lagunas someras de Puilar, Chaxa (37 ha) y Barros Negros (103 ha) (Dorador et al., 2018) son clasificadas como salobres y permanentes, de no más de 1,5 m de profundidad. El pH promedio medido y calculado para estas lagunas se

encuentra en torno a 8.

Distintas campañas de muestreo por diversos agentes (ver referencias en AMAKÁIK 4) reportan la presencia de varios taxa en los distintos niveles de organización biótica descritos en la Etapa I del presente proyecto, sin embargo, no existen estudios acabados sobre las relaciones entre este componente biótico y las características físicas y químicas de los cuerpos lagunares.

II.4.4.2.2 Aguas de Quelana

Sistema lagunar conformado por un conjunto de cuerpos de agua de poca profundidad, interconectados entre sí, situadas al pie de los depósitos aluviales que conectan las quebradas de Camar y El Toro, situados sobre la zona marginal en el este del Salar de Atacama. Según lo reportado por SGA (2015), la entrada de agua a las lagunas se produce a través de afloramientos situados al este. A diferencia de lo que se observa en otros sistemas, aquí no se ve la presencia de canales que alimenten los cuerpos de agua, indicando que las surgencias de agua subterránea se producen en las mismas lagunas o muy cerca de ellas. Este sistema de lagunas está dispuesto de forma paralela a la interfaz salina debido al ascenso de agua subterránea proveniente del acuífero aluvial somero del este, producto de diferencias de densidad que se producen en la interfaz salina, aflora en las lagunas. La localización de este sistema se puede apreciar en la Figura II-57. Cabe mencionar que, durante eventos de precipitaciones intensas, el agua de las lagunas ingresa al salar.

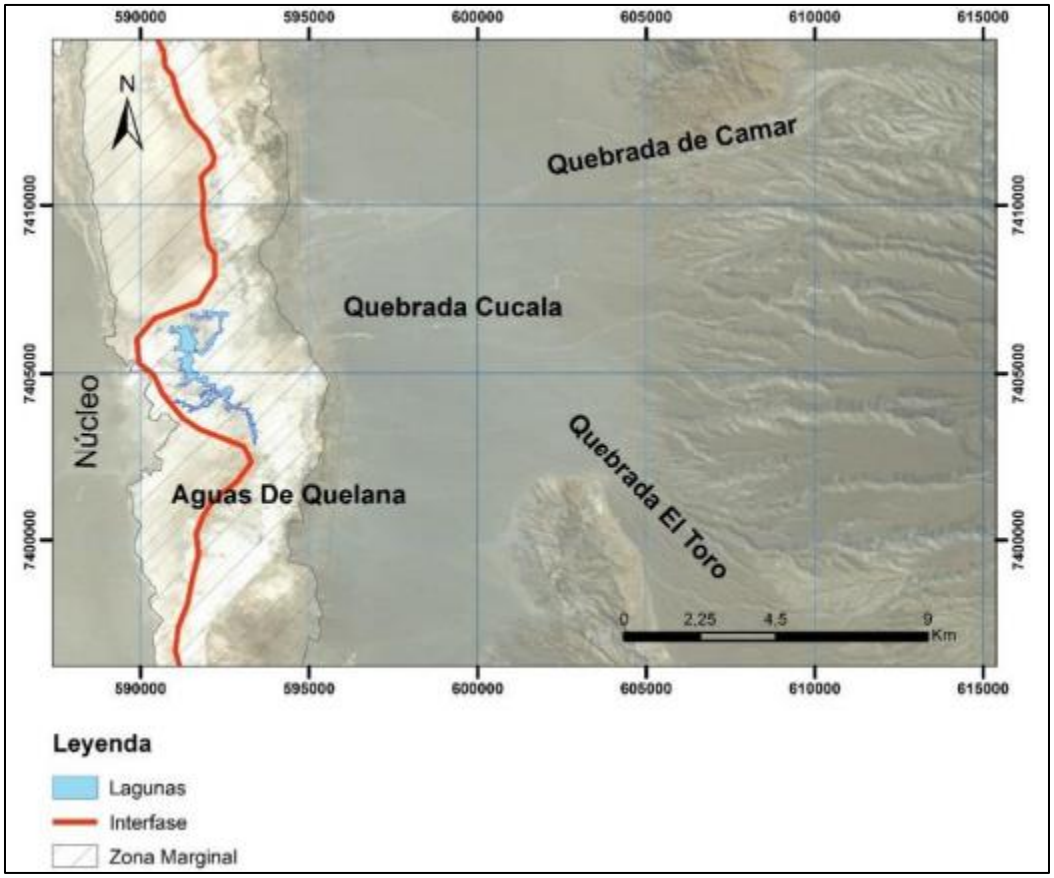


Figura II-57: Vista en planta del sistema de Aguas de Quelana.
Fuente: (SGA, 2015)

En la Figura II-58 se presenta un esquema conceptual del funcionamiento del sistema Aguas de Quelana descrito anteriormente.

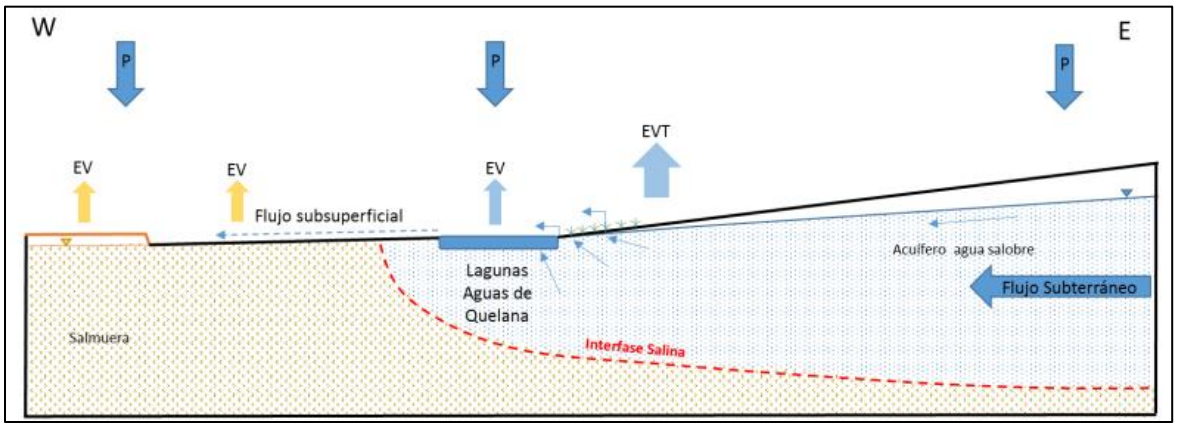


Figura II-58: Esquema conceptual del funcionamiento sistema Aguas de Quelana. Balance entre precipitación, evaporación y flujo subterráneo.
Fuente: (SGA ,2015)

A partir de los registros de niveles en las lagunas del sistema Aguas de Quelana, se puede observar una marcada estacionalidad, respondiendo a eventos de precipitación. Las oscilaciones se pueden explicar por las variaciones estacionales de los flujos evaporativos de estos cuerpos de agua. Estos niveles se grafican en la Figura II-59.

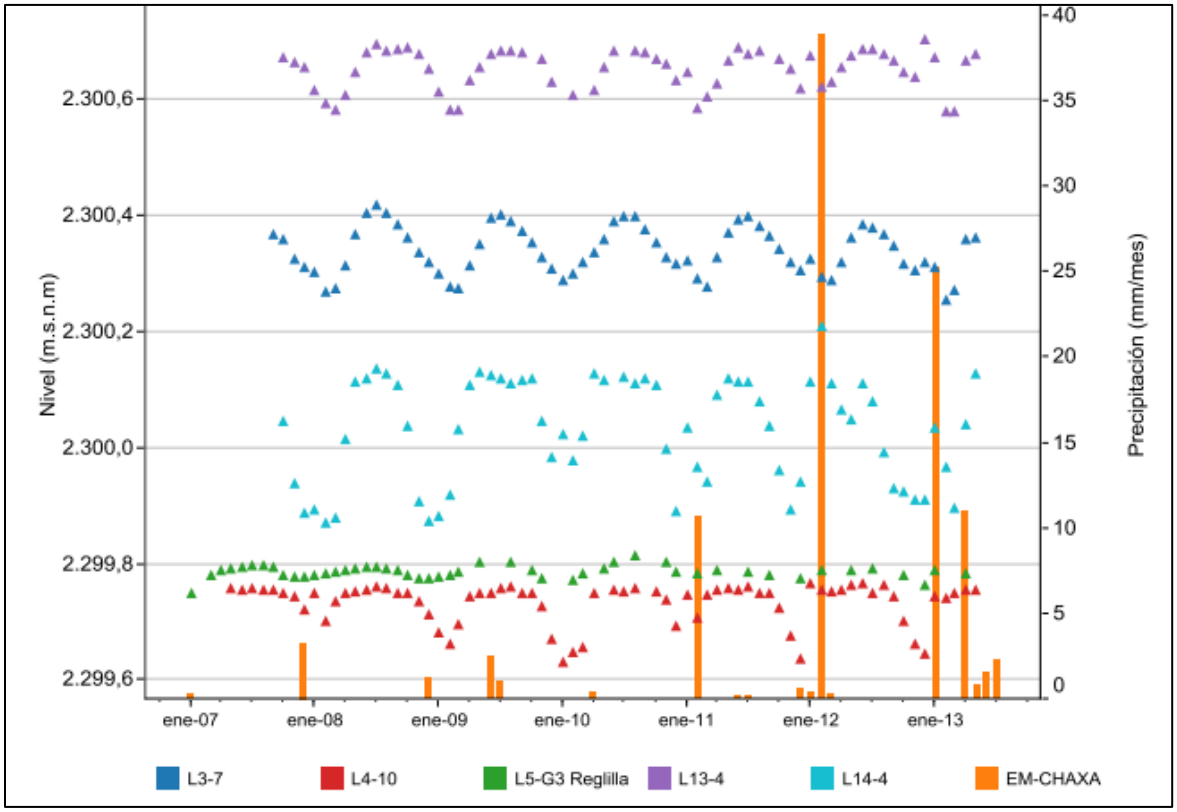


Figura II-59: Variaciones estacionales de los niveles de las lagunas del sistema Aguas de Quelana y precipitación mensual en la estación CHAXA.
Fuente (SGA, 2015)

La variación de la superficie de las lagunas del sistema Aguas de Quelana también responde a la estacionalidad de las precipitaciones, aunque dicha dependencia es más notoria en los períodos de invierno, lo cual puede deberse a la mayor tasa de evaporación de la época estival, según muestra la Figura II-60.

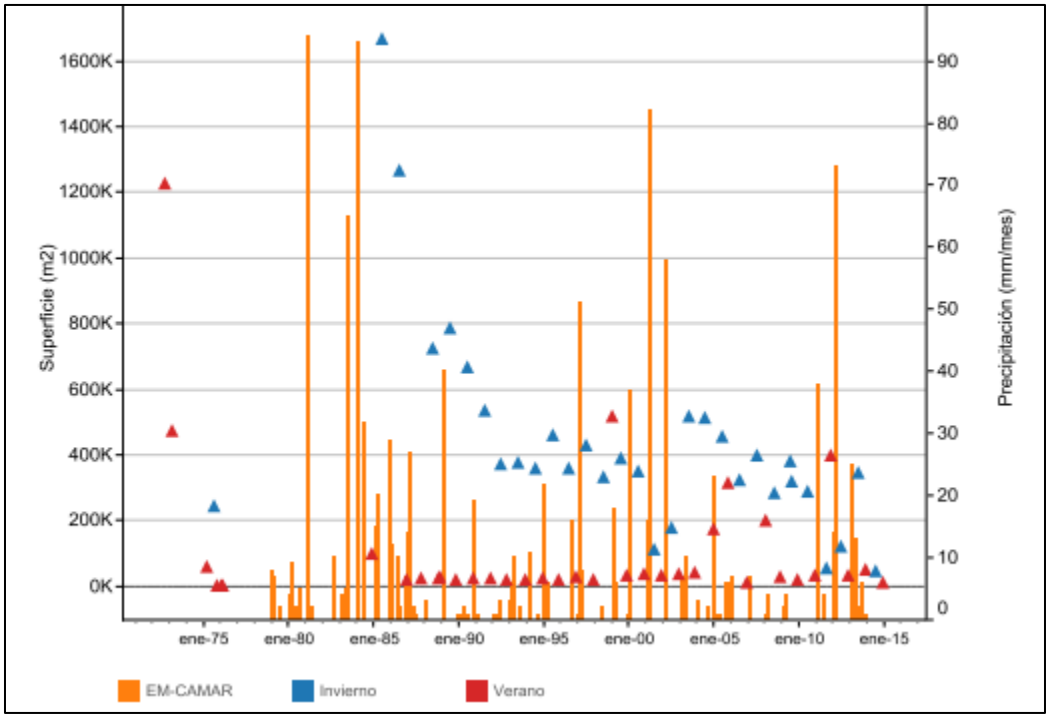


Figura II-60: Variación de la superficie de las lagunas del sistema Aguas de Quelana y precipitación mensual en la estación CAMAR.
Fuente: (SGA, 2015)

II.4.4.3 Sistema Lagunar de Peine y Sistema de La Punta-La Brava

Ambos sistemas no están resguardados bajo ninguna ley de protección, sin embargo, corresponden a sistemas que sustentan un componente biótico importante dentro de la cuenca Salar de Atacama.

II.4.4.3.1 Sistema Peine

Este sistema se encuentra ubicado en la zona sur del salar, cercano al poblado del mismo nombre. Lo componen las lagunas Salada, Saladita e Interna. Las dos primeras desarrollándose en la zona marginal del salar, mientras que la laguna Interna se desarrolla tanto en la zona marginal como en el núcleo. Estas lagunas no presentan una variación de su superficie en el tiempo, a excepción de la laguna interna, la cual ingresa al núcleo del Salar de Atacama y aumenta en superficie en respuesta a eventos de precipitación. De acuerdo con el análisis presentado por Rockwood Lithium Ltda. (2015) se sabe que las lagunas Salada y Saladita no presentan variaciones considerables de nivel de agua superficial, ni parecen estar influenciadas por eventos de precipitación. Por otro lado, la laguna Interna mostró un descenso constante entre el 2007 al 2010, mostrando luego una estabilización de sus niveles de agua superficial. Esta laguna si presenta una relación con los eventos de precipitación.

El afloramiento de agua subterránea principal dentro de este sistema se encuentra al sureste del subsistema de lagunas, teniéndose unos pocos afloramientos menores a lo largo

de los canales que conectan a las lagunas. El principal mecanismo de salida del agua en este sistema es la evaporación directa. Las lagunas de este sistema se ubican de forma perpendicular a la interfaz salina y se originan debido a afloramientos del acuífero somero cuando su nivel freático interseca la depresión de la topografía en este sector.

En la Figura II-61 se muestra una disposición en planta y la Figura II-62 presenta un esquema conceptual de este sistema de lagunas.

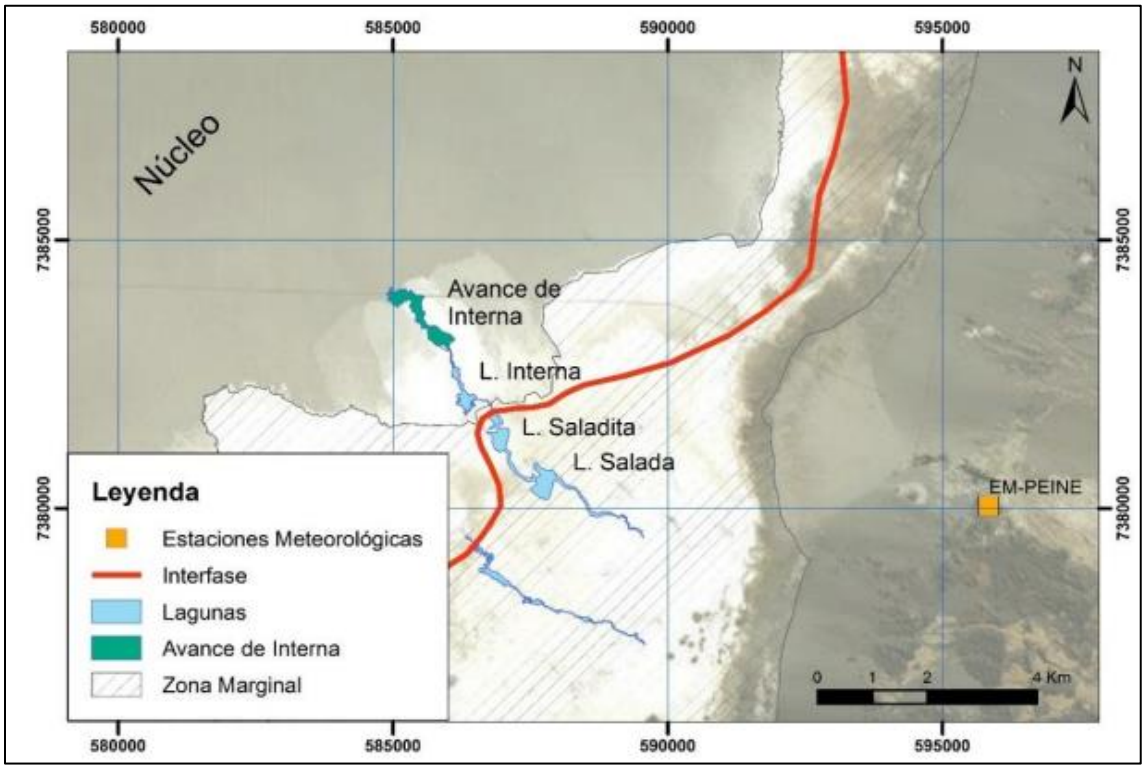


Figura II-61: Vista en planta del sistema Peine.
Fuente: (SGA, 2015)

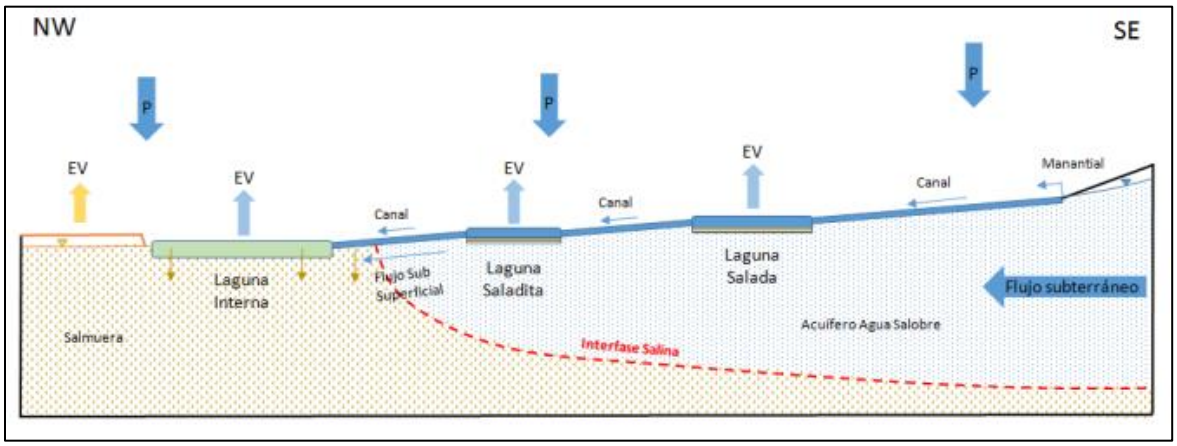


Figura II-62: Esquema conceptual del funcionamiento sistema Peine. Balance entre precipitación, evaporación y flujo subterráneo.
Fuente: (SGA, 2015)

Según se indica en los estudios SGA (2015), los niveles de agua superficial medidos del sistema de la Laguna Salada y Laguna Saladita se mantienen estables, no así la elevación de la laguna Interna que, en parte, se extiende en el núcleo del Salar de Atacama y ha presentado un descenso en sus niveles, como se aprecia en la Figura II-63.

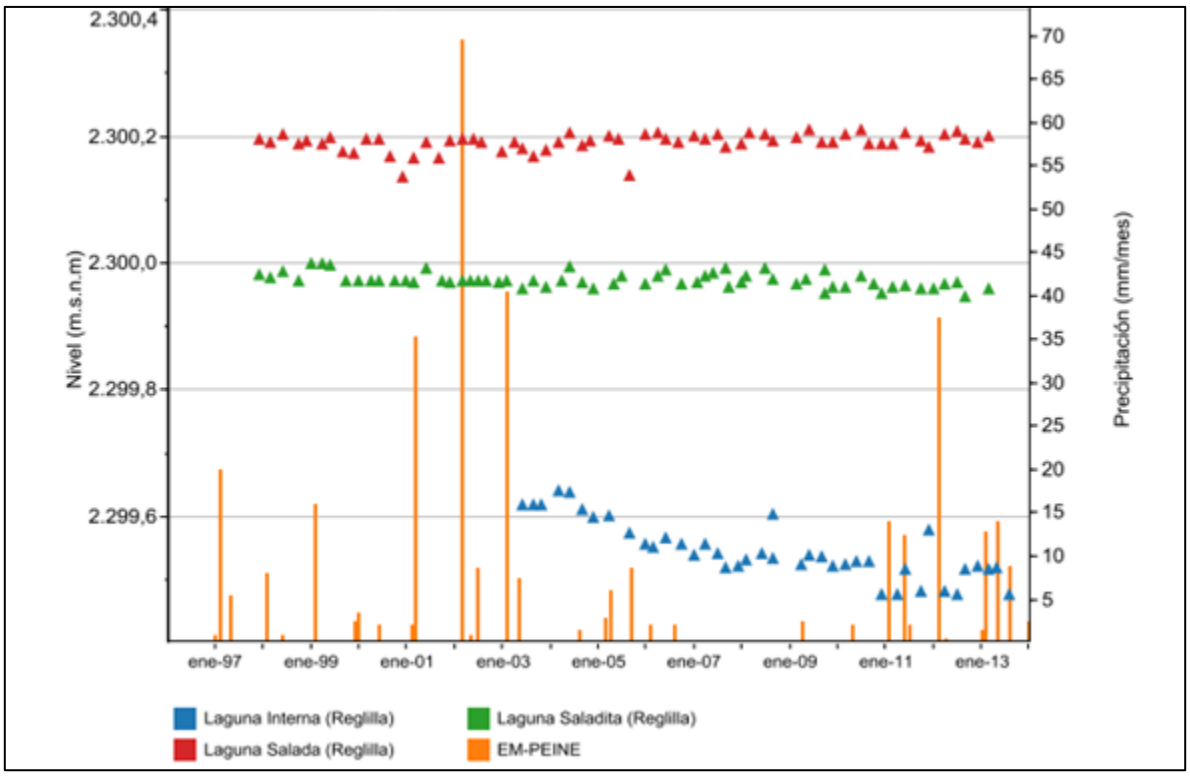


Figura II-63: Variaciones estacionales de los niveles superficiales de las lagunas del sistema Peine y precipitación mensual en la estación PEINE.
Fuente: (SGA, 2015)

El aumento de la superficie de la laguna Interna está directamente relacionado a los eventos de precipitación como se muestra en la Figura II-64.

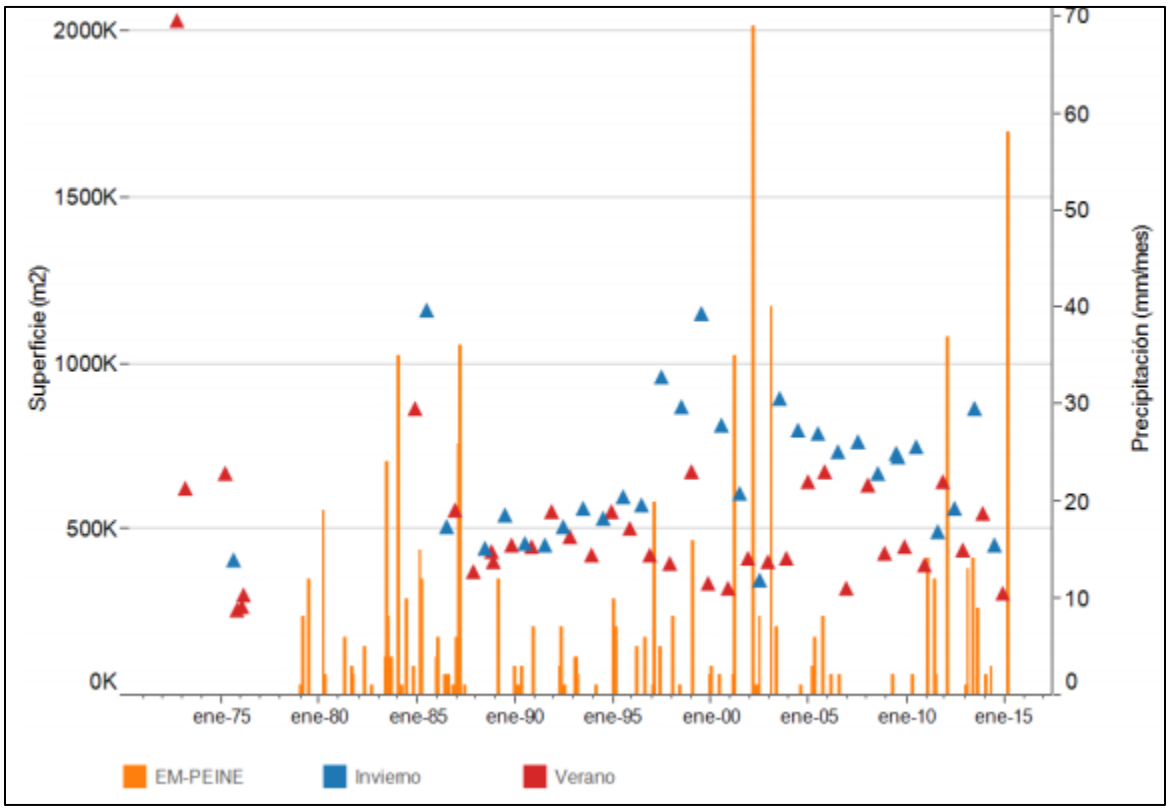


Figura II-64: Variaciones estacionales de la superficie del Sistema Peine y precipitación mensual en la estación Peine.
Fuente: (SGA, 2015)

En este sector, tanto el acuífero dulce-salobre como el de salmuera del núcleo mostraron variaciones en sus niveles de carácter estacional, pero solo el acuífero de salmuera mostro variaciones en su nivel relacionado a precipitaciones.

Las lagunas muestran un PH básico por sobre 8. La conductividad varia espacialmente, aumentando desde laguna Salada hacia laguna Interna. Al mismo tiempo hay importantes variaciones temporales, con mayores valores en verano (promedio de invierno es de 40 mS/cm y promedio de verano es de 148 mS/cm).

II.4.4.3.2 La Punta–La Brava y Vegas de Tilopozo

Este sistema está conformado por 2 lagunas, La Punta y La Brava, las cuales presentan una interconexión hidráulica entre ellas. La disposición de estos cuerpos de agua es paralela a la interfaz salina, los cuales se originan debido a flujos subterráneos ascendentes de agua dulce-salobre provenientes del sistema de acuíferos someros aluviales de Monturaqui y Negrillar, producto de la diferencia de densidad. Esta distribución se puede observar en la Figura II-65. Las lagunas La Punta-La Brava se alimentan de afloramientos locales forzados por la presencia de la interfaz salina ya que se sitúan principalmente en la orilla sur de las lagunas (Rockwood Lithium Ltda, 2015). Por otro lado, las Vegas de Tilopozo se componen de afloramientos de agua subterránea que dependen del aporte del acuífero dulce-

salobre provenientes del extremo sur del salar. Estas vegas se extienden sobre la interfaz salina, terminando en lagunas de salobres a salinas.

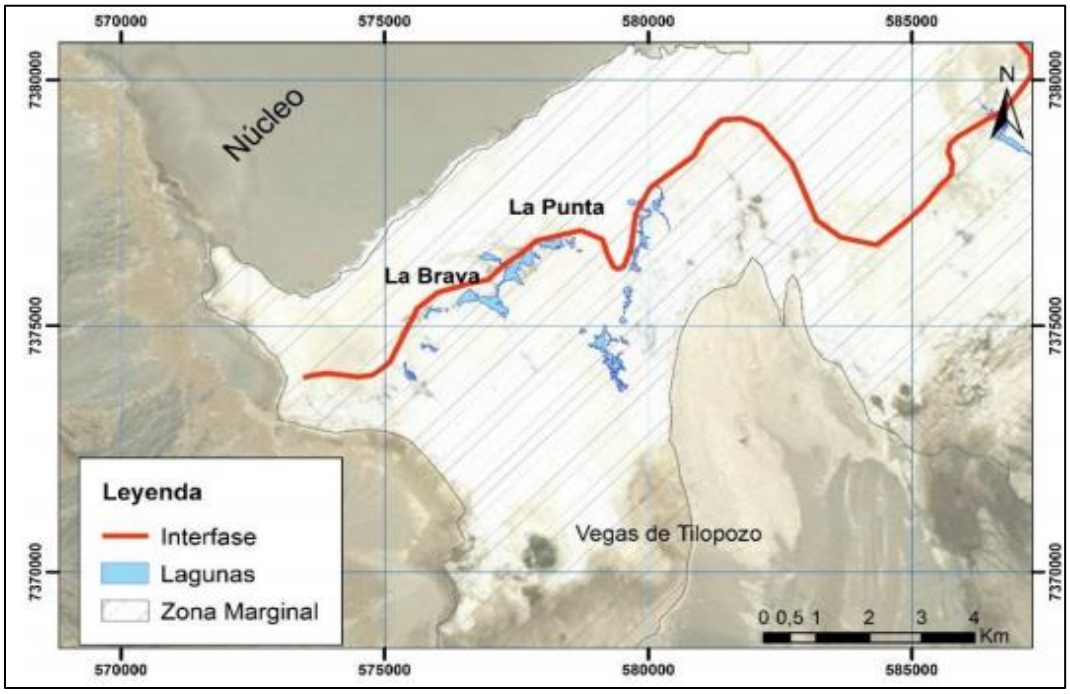


Figura II-65: Vista en planta del sistema de lagunas La Punta y La Brava.
Fuente: (SGA, 2015).

En la Figura II-66 se presenta un esquema conceptual del funcionamiento de este sistema lagunar.

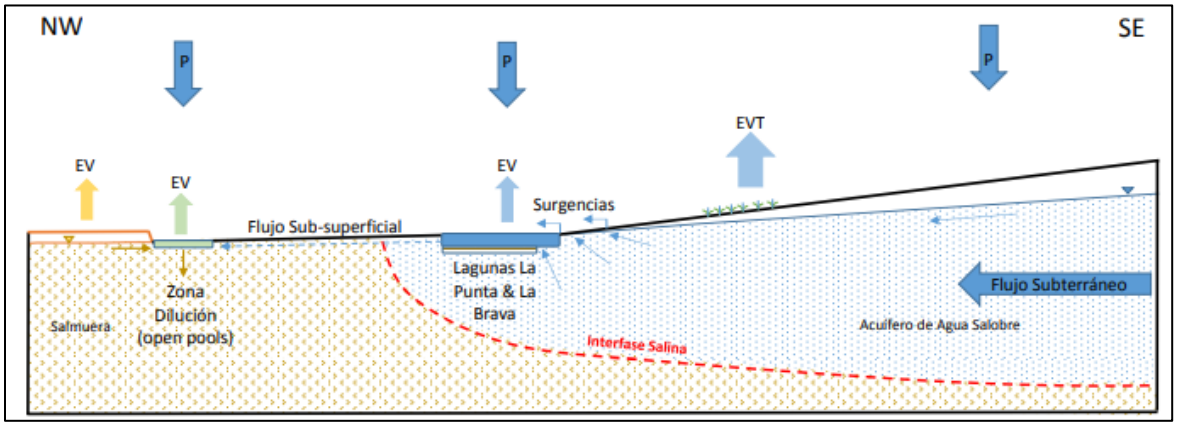


Figura II-66: Esquema conceptual del funcionamiento sistema La Punta y La Brava. Balance entre precipitación, evaporación y flujo subterráneo.
Fuente: (SGA, 2015)

La información disponible da cuenta de puntos de control, los cuales miden el nivel piezométrico en 6 puntos denominados de la letra A la F y distribuidos a lo largo de esta laguna, cuya ubica ción espacial se presenta en la Figura II-67.

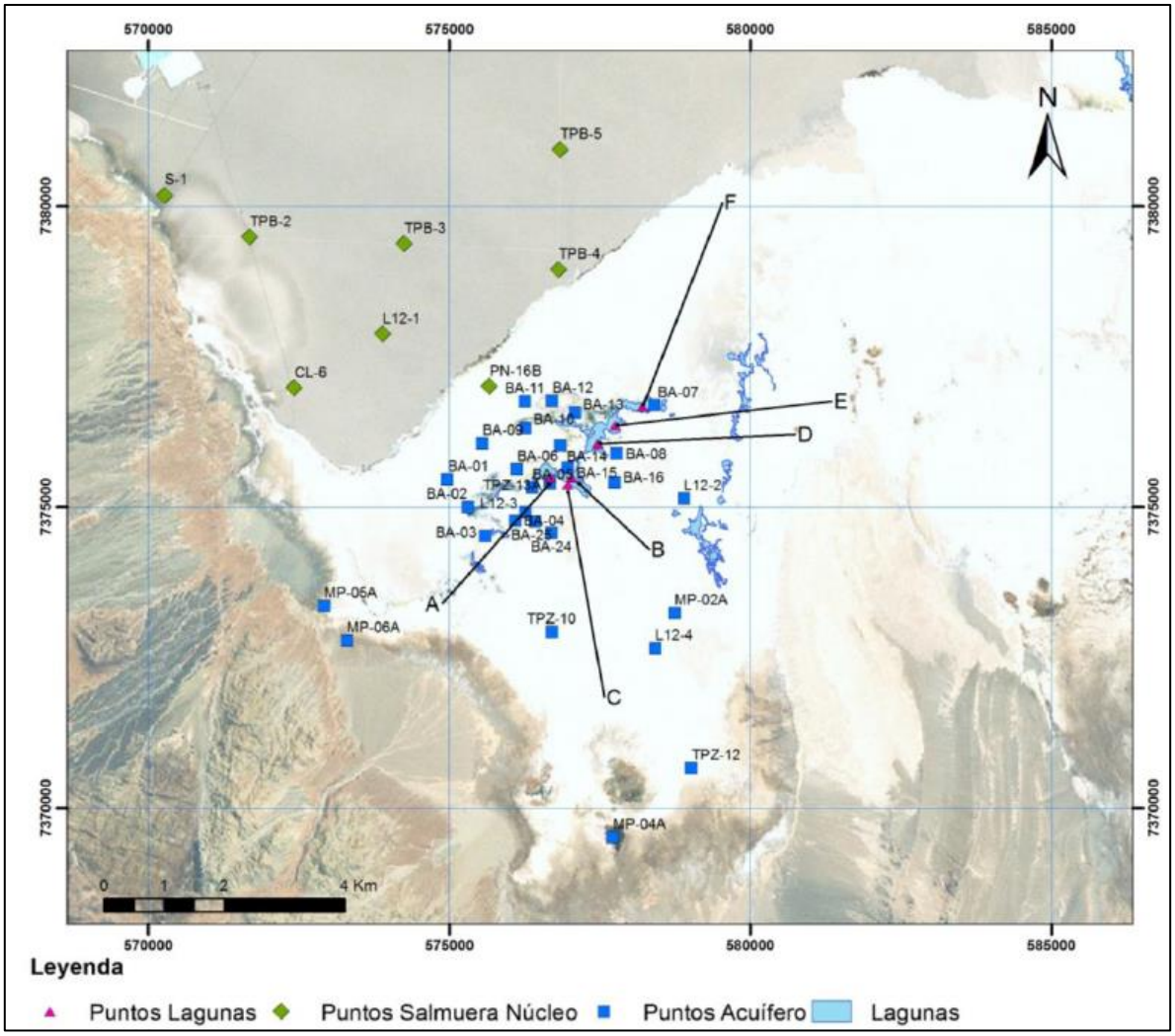


Figura II-67: Puntos de control de nivel piezométrico en el sistema de lagunas La Punta y La Brava. Fuente (SGA, 2015)

Los niveles de las superficies de las lagunas La Punta y La Brava presentan una marcada dependencia con la estacionalidad de los flujos evaporativos en estos cuerpos de aguas, y un aumento debido a eventos de precipitación, como se observa en la Figura II-68. Los niveles medidos en los puntos D y E se mantienen estables, con leves aumentos debido a la precipitación. Este comportamiento se debe a que esta zona recibe mayores aportes de flujo subterráneo, debido a que la dirección del flujo es de sur a norte (SGA, 2015), por lo cual el nivel piezométrico en la laguna aumenta con respecto a los puntos mencionados anteriormente. Asimismo, la conductividad hidráulica de esta zona es mayor, lo que permite transmitir el flujo subterráneo y mantener el nivel en la laguna ante las salidas por evaporación.

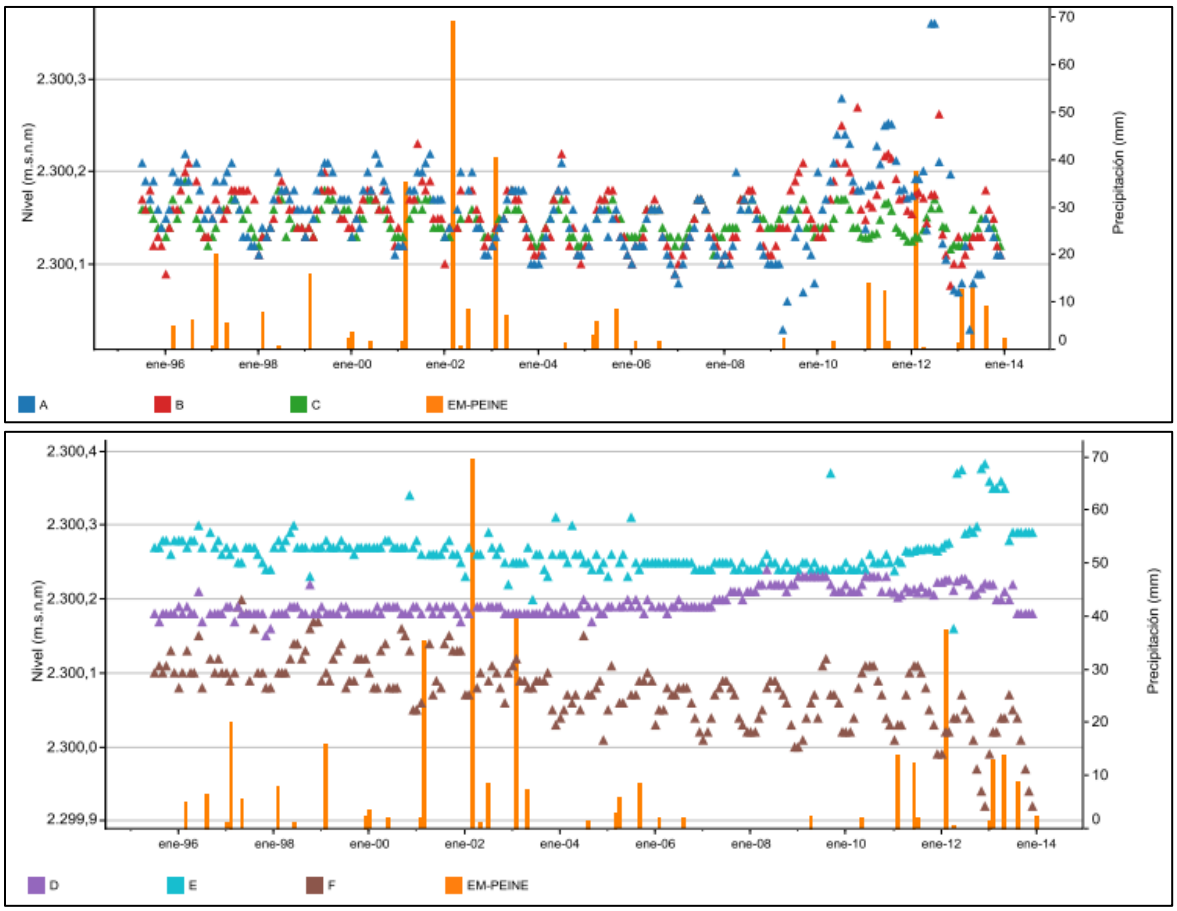


Figura II-68: Variaciones estacionales de los niveles de las lagunas del sistema La Punta y La Brava y precipitación mensual en la estación Peine.
Fuente (SGA, 2015)

Por otro lado, la superficie cubierta por las lagunas La Punta y La Brava se mantiene constante en el tiempo durante el período de verano, debido a la recarga de las precipitaciones en período estival, no así en invierno donde los caudales afluentes a este sistema son mayores, como se muestra en la Figura II-69.

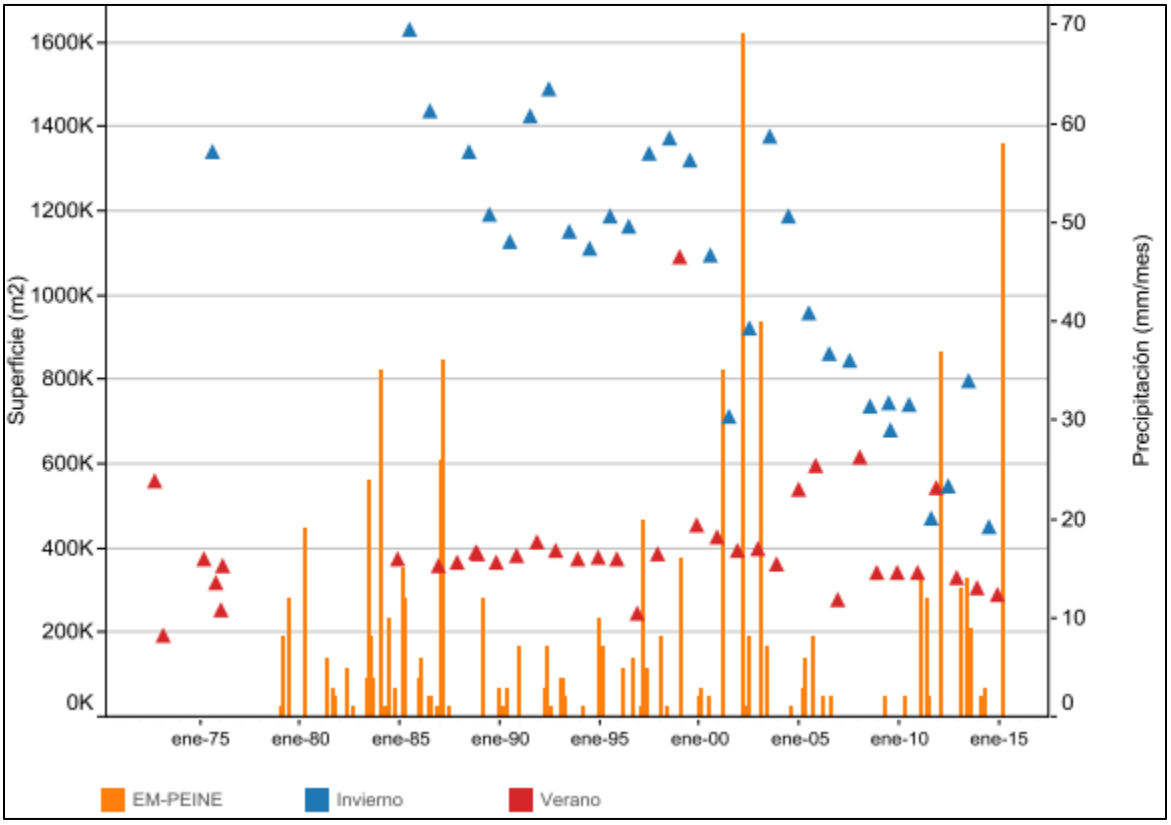


Figura II-69: Variaciones estacionales de la superficie del Sistema La Punta y La Brava y precipitación mensual en la estación Peine.
Fuente (SGA, 2015)

De esta manera, con respecto a las características hidrológicas de este sistema, se observan diferencias en el comportamiento de la salmuera y del acuífero dulce-salobre que lo componen. Los niveles de salmuera muestran un descenso sostenido en el tiempo y responden a eventos de precipitación por sobre la estacionalidad. Por otro lado, el acuífero dulce-salobre no presenta tendencia alguna en la variación de su nivel, comportándose variablemente de forma estacional y no respondiendo a eventos de precipitación. Las lagunas dentro de este sistema parecen comportarse de forma diferencial siendo La Brava, por ejemplo, un sistema variable de forma estacional, mientras que La Punta no muestra variaciones dada su alimentación por parte de afloramientos locales desde el acuífero dulce-salobre. Esta característica heterogénea del sistema contribuye a la presencia de marcados gradientes espaciales y temporales en cuanto a salinidad y conductividad eléctrica.

Este sistema lagunar presenta valores de conductividad específica y salinidad variables. La conductividad, varía entre lagunas siendo mayor en la laguna La Punta y disminuyendo hacia La Brava. Además, se observan variaciones temporales con mayores valores en verano, probablemente asociado a mayores tasas de evaporación. Los valores observados están por sobre los 30 mS/cm. Por otro parte, la variable conductividad presenta las mismas tendencias espaciotemporales. El pH es básico con un promedio de 8, presentando valores más altos en La Brava.

Las lagunas de Tilopozo presentan aguas salobres, duras, con pH cercano a 8 y un carácter iónico clorurado y sódico. Se caracterizan por mostrar diferencias importantes en los valores de conductividad y salinidad que varían entre los 60 a 125 mS/cm y 40 g/L a 60 g/L respectivamente. Las lagunas que forman los flujos de las Vegas de Tilopozo presentan valores de conductividad que promedian los 4 mS/cm (salobre), con salinidades mucho más bajas que las lagunas La Punta y La Brava y pH relativamente neutros.

II.4.4.4 Relación entre el componente biótico y los cuerpos de agua descritos

De acuerdo con el reporte de AMAKÁIK 2018, el principal factor abiótico que regula el componente biótico en los sistemas lagunares descritos es la salinidad, y como se puede apreciar en lo descrito anteriormente, existe evidencia que sugiere variaciones en los niveles de agua, estacionalidad, precipitaciones y salinidad.

Un componente de los productores primarios corresponde a fitoplancton halofílico y/o bacterias que producen el alimento para el zooplancton filtrador (herbívoro) o para las aves acuáticas. Para los cuerpos de agua en Chile se ha observado una mayor riqueza de especies en el zooplancton cuando la salinidad se encuentra entre 5 g/L y 90 g/L. Por sobre 90 g/L de salinidad, la riqueza se reduce a la sola presencia de *Artemia franciscana*.

De acuerdo con De los Ríos-Escalante (2010) el amplio gradiente de salinidad observable en los cuerpos de agua del norte de Chile ha permitido medir una correlación importante entre la riqueza de especies y salinidad, en donde a mayor valor de salinidad, un menor número de especies está presente.

Cambios en la riqueza de especies en los niveles del fitoplancton y zooplancton pueden escalar al resto de la trama trófica que se alimenta de ellos. En este escenario el zooplancton, por ejemplo, podría jugar un papel clave como el principal herbívoro del fitoplancton y, a su vez, como presa principal de las aves acuáticas.

II.5 Caracterización de proyecciones futuras

II.5.1 Introducción

En este capítulo se presentan las metodologías y fuentes de información que sirven para caracterizar las proyecciones futuras que van a incidir en la oferta y demanda de recursos hídricos y salmuera en la cuenca Salar de Atacama. Se incluyen en el análisis proyecciones de cambio climático, de cambio poblacional y de actividad económica.

II.5.2 Proyecciones de cambio climático

II.5.2.1 Introducción

Para entender los procesos de cambio climático que pueden incidir en la cuenca Salar de Atacama a nivel de temperaturas y precipitación, es necesario comprender la creación de los modelos y escenarios que dan origen a los resultados a reportar.

En ese sentido, se tiene que el cambio climático hace referencia a una variación estadísticamente significativa tanto en el estado medio del clima como en su variabilidad, y dicha condición tiene un componente de persistencia en el tiempo (típicamente décadas o más). Cambios climáticos pueden ser atribuibles a procesos internos naturales del sistema terrestre, o a factores externos (antropogénicos).

Varias instituciones internacionales de investigación en ciencias atmosféricas y clima desarrollan Modelos Globales de Clima Acoplados (GCMs, por sus siglas en inglés), los cuales consideran el conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos fundamentales para la representación en el sistema climático. Estas plataformas de modelación son herramientas fundamentales en la evaluación del clima presente, y de escenarios de clima históricos y futuros. En particular, las proyecciones climáticas se realizan considerando supuestos de concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera, entre otras forzantes naturales y antrópicas.

En la fase cinco del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5 por sus siglas en inglés) (Hurrell et al., 2011), asociado a la generación de modelos de proyecciones de cambio climático, se han definido escenarios futuros de Concentración Representativos (*Representative Concentration Pathways*, RCP) que definen la evolución temporal de los gases de efecto invernadero en la atmósfera. Estos escenarios se reconocen por la perturbación en el balance radiativo al tope de la atmósfera equivalente al año 2100, con respecto a niveles preindustriales. Así, los escenarios con menor y mayor esfuerzo en la reducción emisiones de GEI prevén, respectivamente, un *forzamiento radiativo* equivalente a 2,6 y 8,5 W/m² en 2100 (RCP2.6 y RCP8.5).

En la siguiente sección se presentan algunas proyecciones de cambio climático propuestos para la cuenca Salar de Atacama. La metodología utilizada (ver detalles en Anexo 1 de la Etapa II) se basa en aquella utilizada en el Proyecto de Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017) y posteriormente utilizada en el marco del proyecto ARCLim: Atlas de

Riesgos Climáticos para Chile (Pica-Téllez et al., 2020). En una sección posterior se presentan un análisis de tendencias históricas de precipitación para la cuenca para comparar con los resultados obtenidos de proyecciones futuras.

II.5.2.2 Proyecciones climáticas futuras en la cuenca del Salar de Atacama

Los modelos GCM, al ser forzados de distintas maneras y tener distintas resoluciones espaciales, entre otros factores, pueden presentar heterogeneidades que se traducen en fuentes de incertidumbre para explicar el comportamiento de las observaciones actuales. En ese aspecto, antes de proyectar alguna tendencia asociada a alguna variable de interés hidrometeorológica hacia el futuro, se necesita conocer el grado de incertidumbre que las distintas tendencias de los modelos pueden determinar, sobre todo en la cuenca Salar de Atacama, que es el objeto del presente estudio.

Analizando la incertidumbre asociada a estos GCMs, Bambach et al. (2019), analiza los resultados de 30 modelos GCM obteniendo su tendencia promedio tanto en las variables de temperatura como de precipitación, además de contrastar el grado de concordancia de los modelos respecto de aquellas tendencias. De acuerdo a sus resultados, en Chile continental se esperan incrementos de temperatura para el periodo 2030-2060 que varían entre 1 y 2°C, con un conceso total en todos los modelos respecto de este comportamiento (Figura *II-70*). De hecho, en la cuenca Salar de Atacama de espera que el incremento de temperatura en el periodo descrito ronde los dos grados. En el caso de las precipitaciones, y excepto en la parte más austral de Chile continental, en promedio los modelos prevén disminuciones de entre 6 y 13% aproximadamente de las precipitaciones, pero con una variada incertidumbre en la macrozona norte, en donde algunos modelos sugieren un comportamiento de incremento en la cantidad de agua caída hacia el futuro (Figura II-71).

En las figuras, la zona achurada indica mayor discrepancia entre modelos, vale decir no existe certeza en que si las tendencias serán negativas y/o positivas. Por el contrario, la zona sin achurar indica concordancia entre modelos.

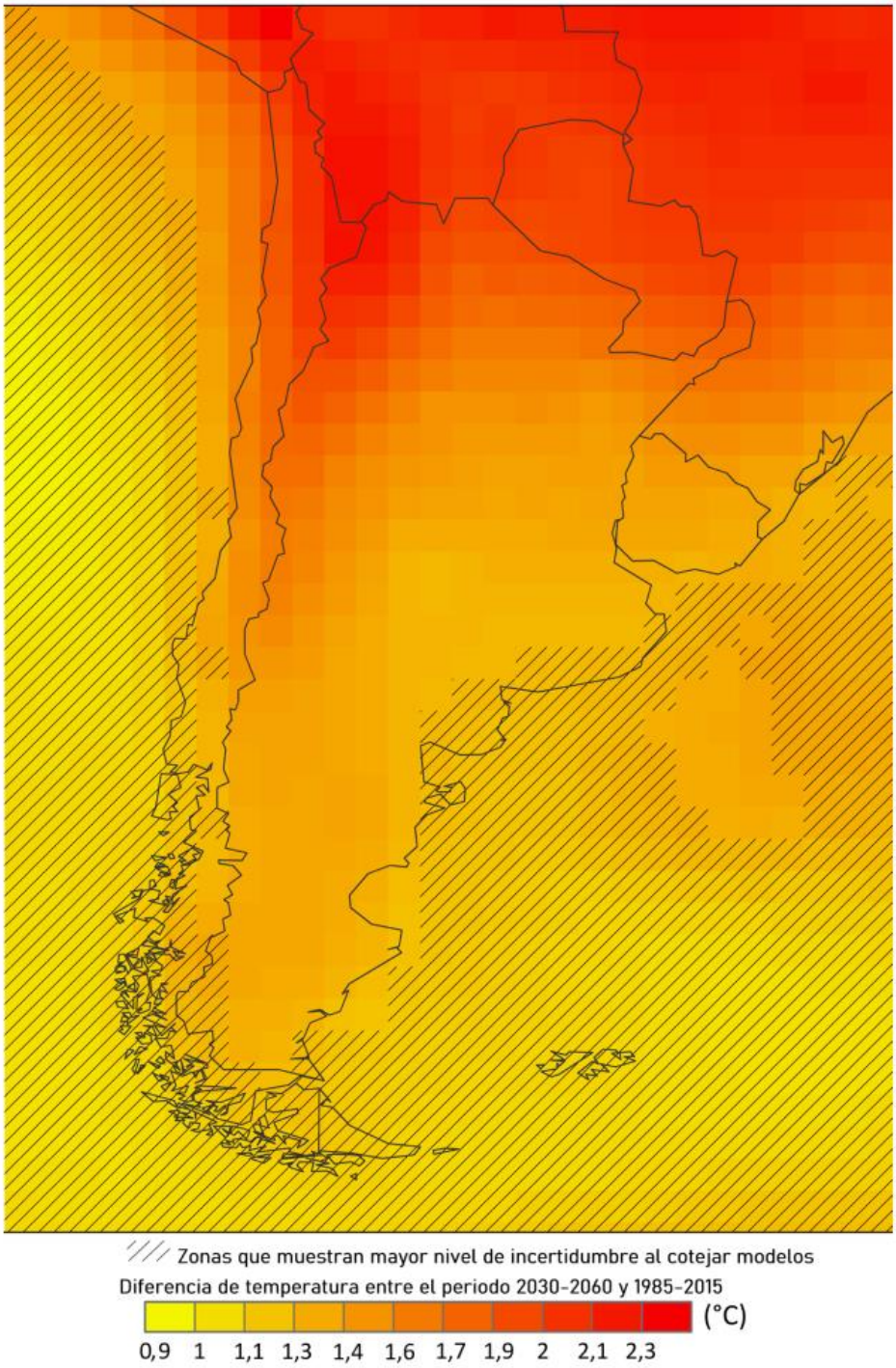


Figura II-70: Variación de temperaturas entre 1985-2015 con 2030-2060.
Nota: Los datos han sido obtenidos a partir de la combinación de treinta modelos GCMs.
Fuente: Bambach et al. 2019.

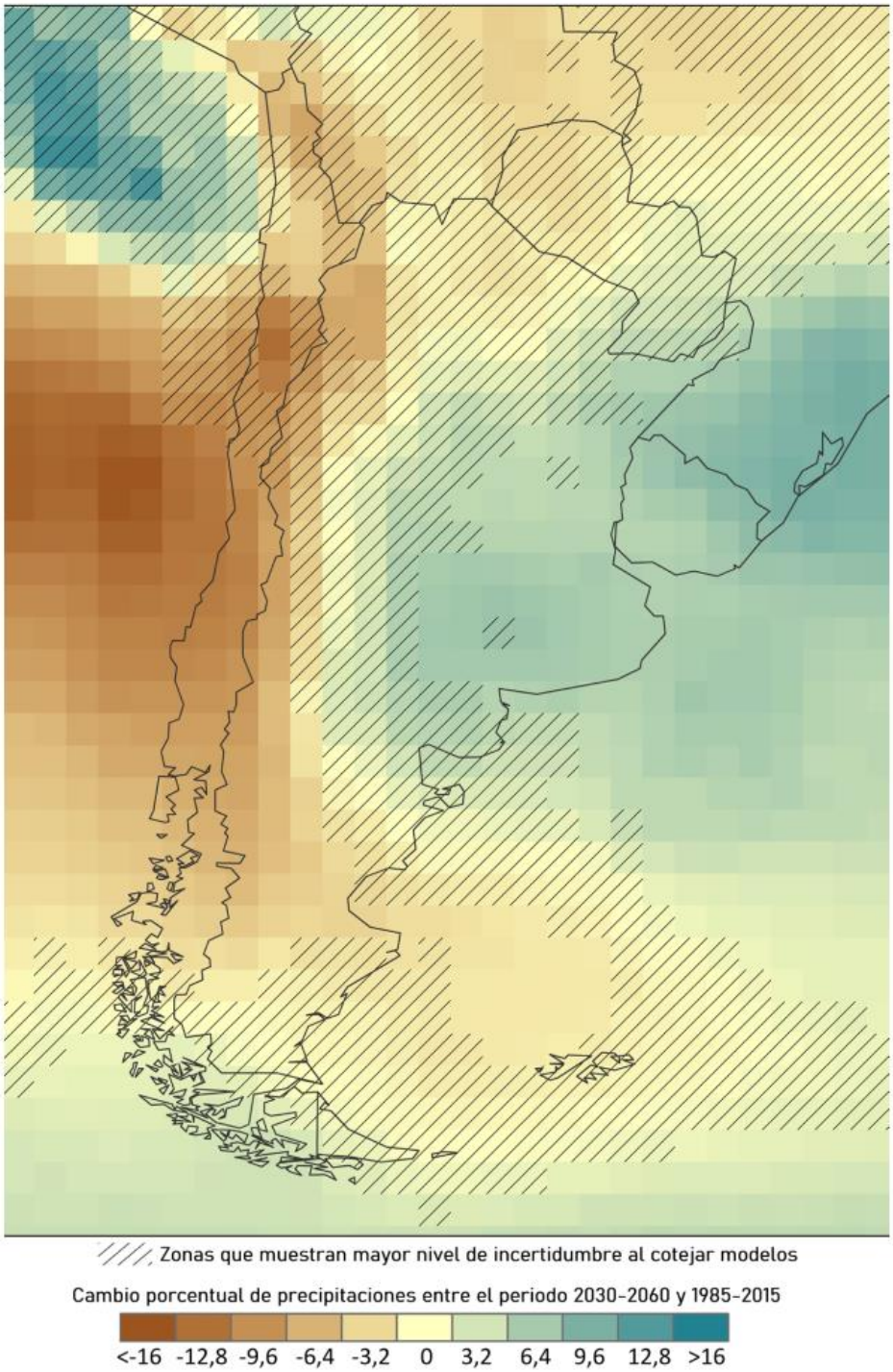


Figura II-71: Variación porcentual de precipitaciones medidas del periodo 1985-2015 y del periodo 2030-2060.

Nota: Los datos han sido obtenidos combinando treinta modelos GCMs.

Fuente: Bambach et al. (2019).

Mirando resultados más específicos para la cuenca Salar de Atacama, se observa una heterogeneidad en los resultados de los seis modelos considerados respecto de los cambios hacia mediados de siglo (2035-2065) respecto del periodo histórico (1985-2010) para la precipitación total anual. Algunos modelos (como CSIRO) indican una reducción en las precipitaciones, mientras que otros (CanESM2) plantean aumentos mayores al 50%, de modo que para esta variable existe una heterogeneidad y por consiguiente una incertidumbre respecto de los cambios esperados. Sin embargo, y a nivel específico, pareciera que los modelos tienden a proyectar aumentos de agua caída, no obstante, al ser esta una medida relativa, al ser las precipitaciones en la zona relativamente bajas, los valores reales en incremento no sobrepasarían del orden de los 10 a 15 mm, y esto en las áreas más lluviosas del altiplano. La Figura II-72 muestra lo expuesto.

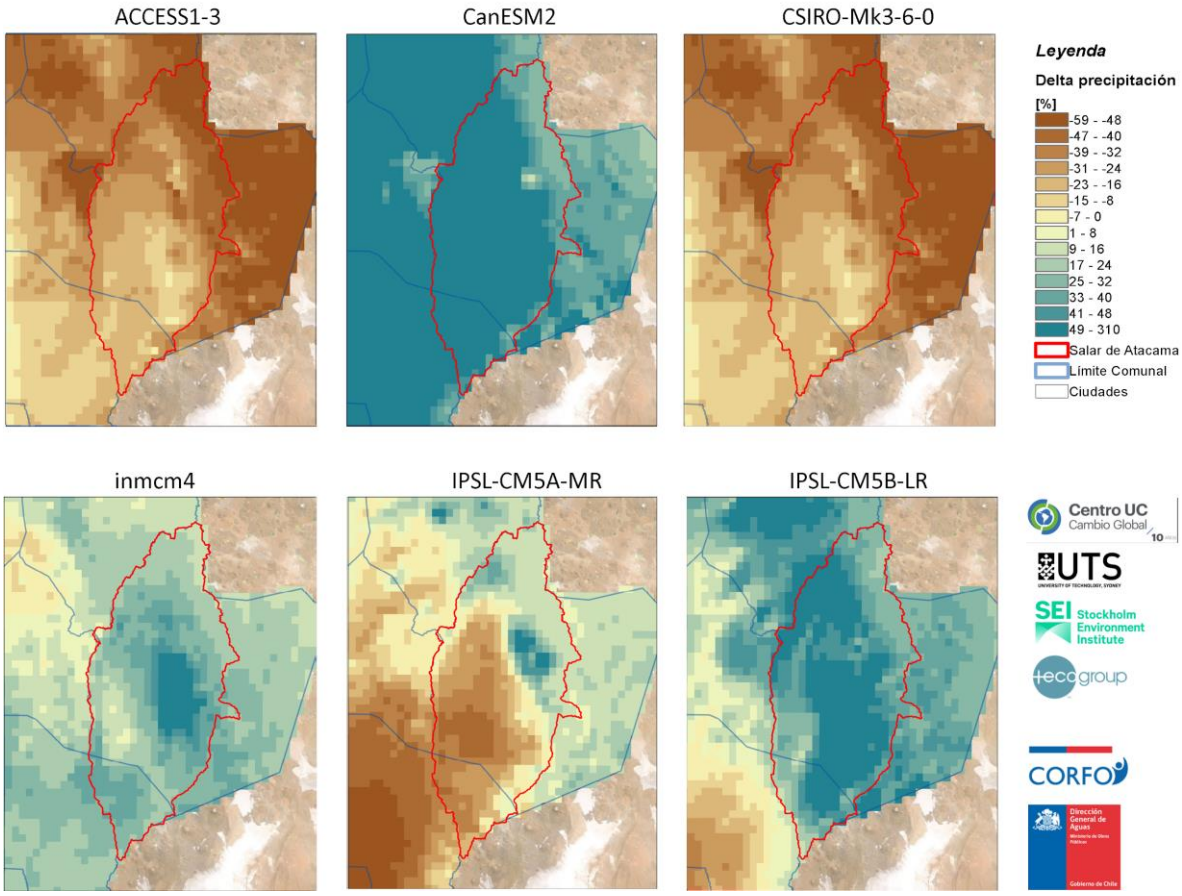


Figura II-72: Cambios (porcentaje de cambio) proyectados de precipitación para 6 GCMs en la cuenca del Salar de Atacama y su entorno hacia mediados de siglo (2035-2065) respecto del periodo histórico

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de las temperaturas, se prevén aumentos marcados del orden de los 2°C hacia mediados de siglo, valores relevantes si se considera que en promedio para Chile continental la temperatura se incrementaría un poco más de un grado Celsius (DGA, 2018). Esto puede traer diversas consecuencias en el Salar de Atacama, primero de alcances hidrológicos que, aunque exista un aumento de las precipitaciones, es también plausible

que estas disminuyan en las partes más altas de la cuenca. Los aumentos en temperatura pueden acarrear mayores pérdidas por evapotranspiración que las actuales, lo que llevaría en términos generales a balances similares a los que hoy existen en el sitio, o incluso más desfavorables. La Figura II-73, ilustra estos resultados para los modelos analizados.

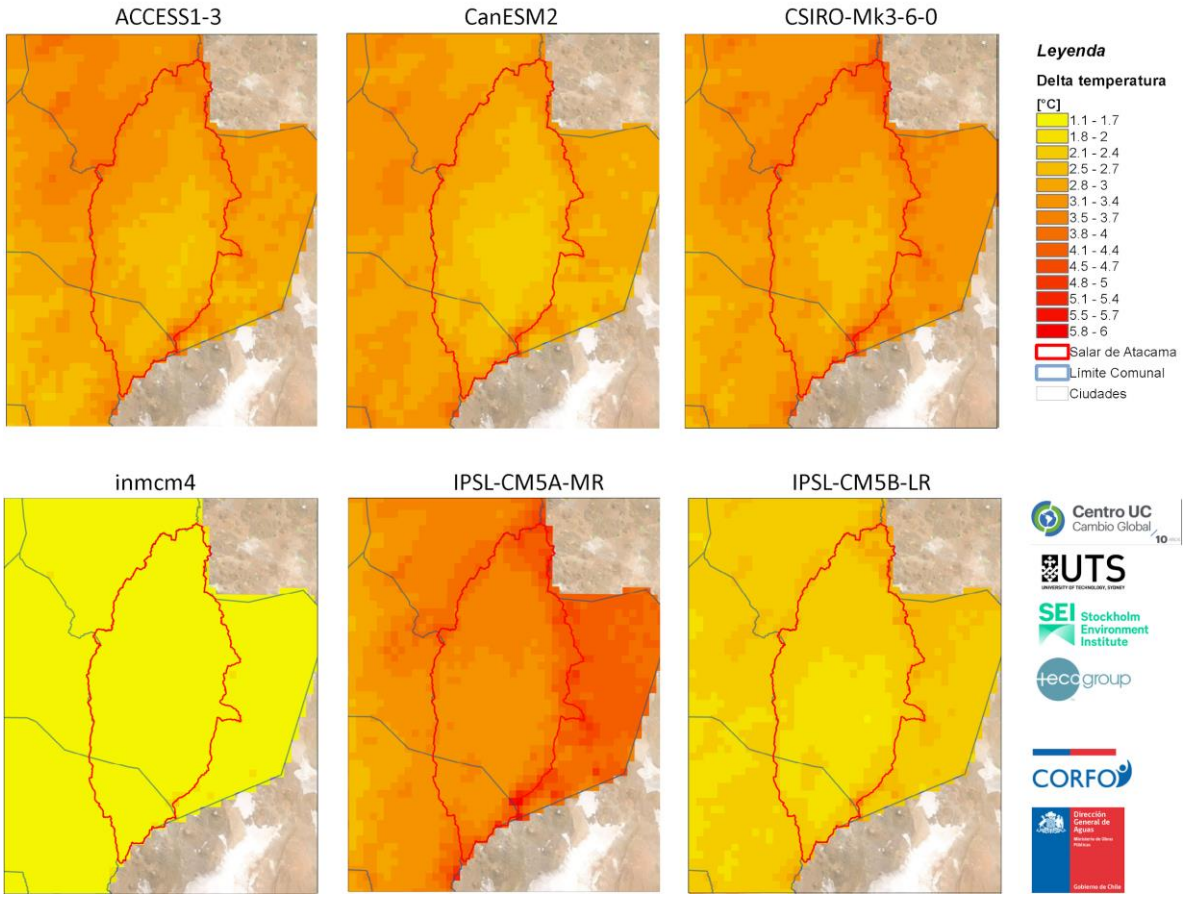


Figura II-73: Cambios en temperaturas medias anuales (expresados como diferencia simple entre futuro menos histórico), para la cuenca del Salar de Atacama en seis modelos de cambio climático en el escenario más severo (rcp 8.5).
Fuente: Elaboración propia

II.5.2.3 Tendencias históricas en precipitación y temperatura

Como complemento a la información asociada a las proyecciones de cambio climático, se presenta un análisis de tendencias hidrometeorológicas, que en el caso de la precipitación se analiza sobre 3 de las más representativas estaciones de la cuenca: Río Grande, Camar y Peine, las cuales fueron analizadas mediante un análisis de tendencias históricas para el periodo 1985-2017.

Los resultados muestran para precipitación que entre las observaciones que sí poseen tendencias significativas se encuentran aquellas del mes de enero en la estación Peine, con disminuciones de -0,93 mm por década, los meses de marzo y abril en la estación Río Grande, aunque con valores contrastantes de -5,22 y +0,96 mm por década

respectivamente, e incrementos en los meses de abril (+0,85) y junio (+0,43) (Tabla II-29).

Tabla II-29: Tendencias decadales de precipitación (mm por década) en tres estaciones ubicadas en la cuenca del Salar de Atacama.

Mes	Río Grande	Camar	Peine
Enero	-	-	-0,93
Febrero	-	-	-
Marzo	-5,22	-	-
Abril	+0,97	+0,86	-
Mayo	-	-	-
Junio	-	-	-
Julio	-	+0,43	-
Agosto	-	-	-
Septiembre	-	-	-
Octubre	-	-	-
Noviembre	-	-	-
Diciembre	-	-	-
Anual	-	-	-

Nota: Los valores corresponden a la pendiente de la curva de regresión construida a partir de las precipitaciones registrados entre los años 1985 y 2017. Se reportan únicamente aquellos valores estadísticamente distintos de cero[29]. El detalle de esta tabla se encuentra en el Anexo Digital 1 de la Etapa II.
Fuente: Elaboración propia.

Cabe destacar, que, aunque los valores no son significativos, a escala anual las tres estaciones reportan incrementos en los montos de precipitación para el periodo histórico estudiado, con un aumento medio de +2,8 mm por década en estación Peine, +6,4 mm por década en estación Río grande y +7,7 mm por década en estación Camar. Por su parte, el número de días en que las precipitaciones son mayores a 10 mm se ha incrementado significativamente (a = 0.10) en las estaciones Peine (+0,13 días por década) y Camar (+ 0,9 días por década) en los meses de otoño. Por su parte, los días sin lluvia presentan una disminución significativa en los meses de otoño para la estación Río Grande (ubicada al norte de la cuenca), de -0,37 días por década. Existe evidencia en la literatura que da cuenta de la plausibilidad de que en esta zona del planeta aumenten las precipitaciones producto del cambio climático (Moran et al., 2019; Pascale et al., 2019).

Respecto de las temperaturas, los resultados se analizan sobre la estación Peine. En ella, se observan aumentos significativos por década en las temperaturas mínimas tanto en varios meses (enero-abril, julio, septiembre-octubre, diciembre) como a nivel anual (Tabla II-30). Los incrementos registrados son de +0,36 °C por década y de incluso +0,69 °C por década para el mes de febrero. Enero y septiembre (ambos +0,57 °C por década) son dos meses que también poseen incrementos decadales significativos mayores a medio grado Celsius de temperatura mínima.

[29] A partir de Kendall (1975), se entiende como valor estadísticamente distinto de cero como aquellos valores cuya probabilidad de ser cero es menor a un 5% (a =0.05).

Respecto de temperatura máxima, el comportamiento es misceláneo, sin incrementos o disminuciones significativas a nivel anual, pero con aumentos estadísticamente significativos en los meses de enero y septiembre (de +0,24 y +0,36 °C por década respectivamente), al igual que en temperaturas mínimas. No obstante, existen disminuciones significativas en los meses de mayo (-0,36 °C por década) y junio (-0,45 °C por década) (Tabla II-30). Los resultados son concordantes con lo que muestran los GCM a nivel general.

Tabla II-30: Tendencias históricas decadales de las temperaturas extremas en el periodo 1985-2017 en la estación Peine.

Variable	Mes	°C por década
Temperatura mínima	Enero	+0,57
	Febrero	+0,69
	Marzo	+0,39
	Abril	+0,46
	Mayo	-
	Junio	-
	Julio	+0,36
	Agosto	-
	Septiembre	+0,57
	Octubre	+0,41
	Noviembre	-
	Diciembre	+0,31
	Anual	**+0,36**
Temperatura máxima	Enero	+0,25
	Febrero	-
	Marzo	-
	Abril	-
	Mayo	-0,37
	Junio	-0,45
	Julio	-
	Agosto	-
	Septiembre	+0,36
	Octubre	-
	Noviembre	-
	Diciembre	-
	Anual	**-**

Nota: Los valores corresponden a la pendiente de la curva de regresión construida a partir de las temperaturas registrados entre los años 1985 y 2017. Se reportan únicamente aquellos valores estadísticamente distintos de cero. El detalle de esta tabla se encuentra en el Anexo Digital 1 de la Etapa II.
Fuente: Elaboración propia.

Respecto de las tendencias en temperaturas mínimas, destacan incrementos significativos en 8 de los doce meses del año, incluidos todos los meses de verano, y siendo también significativa la media anual (+0,36°C por década). En el caso de las temperaturas máximas, el patrón es misceláneo, con incremento en meses específicos de primavera (septiembre, +0,36°C por década) y verano (enero, +0,25°C), pero con disminuciones significativa en

meses de transición otoño invierno (mayo (-0,37°C) y junio (-0,45°C).

Existe, por su parte, un aumento representativo en el número de días en que las temperaturas máximas son superiores a 25°C (Summer Days) para la estación de verano, con +1,7 días adicionales por cada década, y además una disminución en otoño e invierno en la cantidad de días en que las temperaturas mínimas son inferiores a 10 °C (Frost Days), con -0,3 y -0,9 días adicionales por cada década respectivamente, lo que también sucede a escala anual (-1,2 días por década).

II.5.3 Proyecciones de cambio poblacional

Para el estudio de escenarios de cambio poblacional se analiza la comuna de San Pedro de Atacama, la cual tiene una superficie casi equivalente a la de la cuenca Salar de Atacama. Tal y como se presentó en la Etapa I, la población de esta comuna ha crecido considerablemente en los últimos dos censos registrados por el INE, alcanzando una tasa de crecimiento intercensal de 121,3% en el período 2002-2017 (ver Tabla II-31). Valores que contrastan con los registrados tanto a nivel provincial como regional.

Tabla II-31: Población total censos 1982, 1992, 2002, 2017 en zonas administrativas de interés

Región/Provincia	Censo 1982	Censo 1992	Censo 2002	Censo 2017
Región de Antofagasta	341.702	410.724	493.984	607.534
Tasa Crecimiento Intercensal (%)	-	20,2	20,3	23
Provincia de El Loa	103.633	125.079	143.689	177.048
Tasa Crecimiento Intercensal (%)	-	20,7	14,9	23,2
Comuna de San Pedro de Atacama	2.578	2.829	4.969	10.996
Tasa Crecimiento Intercensal (%)	-	9,7	75,6	121,3

Fuente: Censo de Población y Vivienda 2017 (INE, 2017).

A pesar del explosivo crecimiento en los últimos períodos intercensales, los resultados de las proyecciones 2002-2035 realizadas por el INE (2017), muestran que este proceso de crecimiento histórico se estabilizará a futuro con tasas decrecientes. Tomando de base estas tasas, en conjunto con los datos observados en la comuna de San Pedro de Atacama del censo 2017 (INE), se proyecta la población en el período 2025-2035 (ver Tabla II-32) [30].

[30] El detalle de la serie completa proyectada se encuentra en el Anexo 3 de la Etapa II.

Tabla II-32: Proyección período 2025-2035 del crecimiento demográfico en San Pedro de Atacama.

Año	Proyección de Habitantes	Tasa Crecimiento Interanual (%)
2025	13.325	0,7
2026	13.424	0,7
2027	13.513	0,6
2028	13.597	0,6
2029	13.673	0,5
2030	13.742	0,5
2031	13.809	0,4
2032	13.868	0,4
2033	13.921	0,4
2034	13.970	0,3
2035	14.012	0,29

Fuente: Elaboración propia en base a datos del censo 2017 (INE) y proyecciones 2002-2017 (INE, 2017).

El crecimiento poblacional que se evidencia en el corto plazo (período 2025-2035), se explica tanto por el auge de la actividad minera, como de la actividad turística. Ambas contribuyen tanto a la formación de una población flotante, como a una migración permanente hacia la cuenca. Por otro lado, los resultados de la proyección demográfica muestran que este proceso de crecimiento histórico se va a estabilizar, al disminuir considerablemente la tasa de crecimiento poblacional. Esto tiene implicancias a nivel hídrico, dada la disminución en el consumo por agua potable para satisfacer necesidades básicas. Tomando como referencia la dotación diaria actual en la comuna calculada en el Capítulo II.4.2 (287 litros por habitante al día), se proyecta el consumo de agua potable (ver Figura II-74).

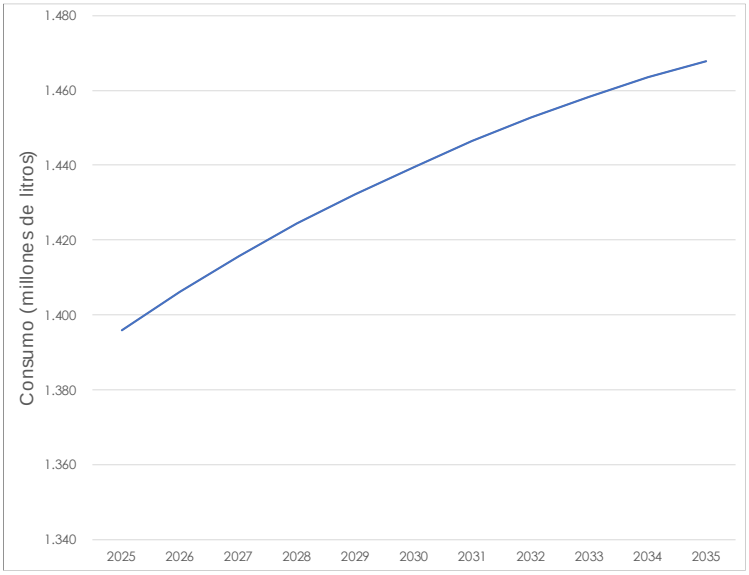


Figura II-74: Proyección período 2025-2035 del consumo humano por agua potable en la comuna de San Pedro de Atacama.
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que las proyecciones de cambio climático presentados en el capítulo anterior, los escenarios futuros de cambio poblacional para la cuenca deberán responder también a una escala de largo plazo en la simulación, entendida dicha escala como el período 2035-2065. Para construir esta proyección, y dado que las tasas registradas por el INE en la proyección al 2035 decrecen constantemente, se realiza un decrecimiento lineal a cero hasta el año 2065 (a modo de continuar la tendencia de estabilización mencionada previamente). El consumo de agua potable en este nuevo escenario se muestra en la Figura II-75.

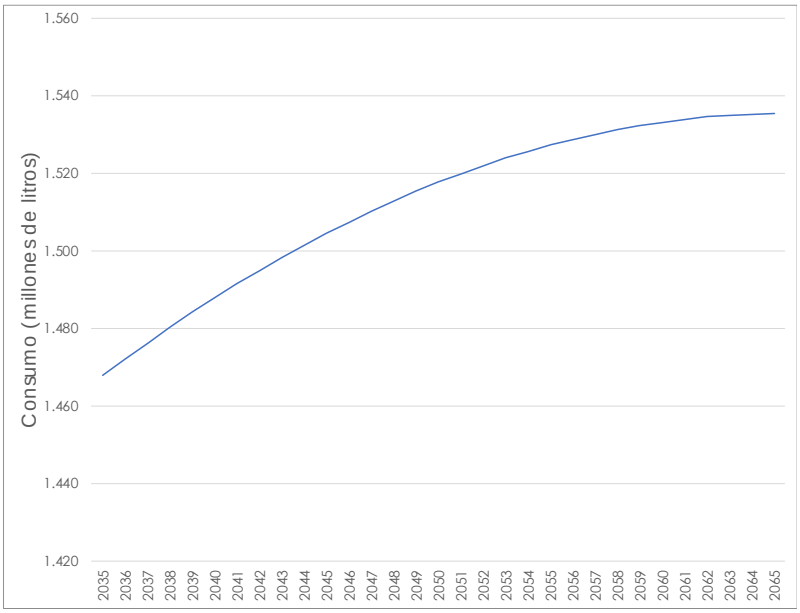


Figura II-75: Proyección a largo plazo (2035-2065) del consumo humano por agua potable en la comuna de San Pedro de Atacama.
Fuente: Elaboración propia.

II.5.4 Proyecciones de actividad económica

Una parte de la presión sobre los recursos hídricos en la cuenca Salar de Atacama está relacionada a la actividad económica que se desarrolla en la zona, que han ido creciendo en el tiempo. Siguiendo la estructura propuesta, se describen metodologías y antecedentes a considerar para la caracterización de proyecciones futuras de 3 actividades económicas relevantes en la cuenca: agricultura, minería y turismo.

II.5.4.1 Proyecciones futuras de la demanda de agua por actividad agrícola

A partir del estudio (CNR, 2000), se estima que la superficie arable potencial en los Ayllus de San Pedro de Atacama alcanza las 1.860 hectáreas, de las cuales un porcentaje variable y con tendencia a la disminución, es efectivamente cultivada.

Este, como otros estudios (CNR-AMPHOS21, 2017; CNR-ARRAU, 2014) reafirman la relevancia de que, junto con lo limitado de la oferta de agua para riego, la mala calidad de las aguas (con altos niveles de carbonatos, cloruros y otros elementos como Boro) juega un papel

importante a la hora de proyectar la demanda de agua hacia el futuro.

Bajo condiciones tendenciales y considerando tanto al área vinculada a San Pedro de Atacama, y el área de las comunidades de la zona oriental y sur de la cuenca del salar, y a menos que no se incorporen en el territorio iniciativas e instrumentos que impulsen un desarrollo de la agricultura local, la tecnificación de los sistemas de riego y el fomento productivo, se proyecta un estancamiento en el crecimiento de la superficie tecnificada y la disminución de la actividad agrícola. Esto debido tanto a las limitaciones en términos de calidad y cantidad de las aguas, así como también dado el envejecimiento de la población en esos sectores y la falta de interés en la actividad por la población joven (CNR-AMPHOS21, 2017).

Por otra parte, el estudio de la CNR-ARRAU (2014), señala que, para las condiciones actuales, debido a la baja disponibilidad de agua y periodicidad de los turnos de riego, no es posible considerar la incorporación de nuevos terrenos con sistemas de riego tecnificados. Esto provoca que no exista un aumento en la demanda de agua de riego respecto a la situación actual agropecuaria, estando las alternativas de desarrollo concentradas en un mejor manejo productivo acompañada por iniciativas que mejoren la calidad de las aguas. De manera complementaria, el estudio CNR (2003) indica que "*las superficies potencialmente regables con seguridad 85% no son muy superiores a las actualmente regadas dado que los proyectos en carpeta apuntan principalmente a mejoramientos de los sistemas de riego existentes y no a la construcción de nuevas obras que permitan incrementar la superficie regada. Sólo cabría considerar la mayor disponibilidad de aguas de riego que pudiese lograrse al incorporar el uso de aguas servidas tratadas, lo que debe ser sometido a un análisis técnico-económico para establecer su factibilidad*".

El estudio CNR-AMPHOS (2017) plantea como imagen objetivo para las zonas consideradas en el Salar de Atacama, y ante una condición de implementación del Plan de Riego por parte de la CNR, una mejora en los sistemas de conducción de agua para riego y la implementación de infraestructura de acumulación y gestión de las aguas que permitan enfrentar la alta variabilidad en la disponibilidad de los caudales. Se considera también la diversificación de las fuentes de agua, considerando el uso de pozos, agua de lluvia y la captación desde otras fuentes en el área de cordillera. Estas mejoras permitirían mejorar la productividad agrícola mediante la incorporación de mayor tecnología y la diversificación e inclusión de cultivos con un mayor valor agregado. Para las subcuencas del Río San Pedro, Río Grande y Vilama, se considera la mejora en los aspectos de calidad de las aguas mediante la implementación de proyectos como la canalización de tramos de río que buscan evitar la contaminación por sales en el cauce y la implementación de sistemas de abatimiento, entre otros.

Finalmente, el estudio de CNR-ARRAU (2014) propone un escenario de cambio en la demanda por la agricultura en la zona de los Ayllus de San Pedro de Atacama, al considerar como alternativa de mejora a las condiciones de riego, una nueva estructura de cultivos de implementarse un embalse de acumulación (6,1 Mm^3) además de mejoras en los sistemas de riego, conducción y en el manejo de la producción agrícola. A partir de este

escenario potencial, la Tabla II-33 presenta las estimaciones de estas posibles demandas y tasas de riego, considerando también sus fracciones de lavado correspondientes según el tipo de cultivos considerado.

Un punto para destacar es que, de implementarse esta propuesta de solución, la demanda total anual disminuiría a 14,65 Mm^3, respecto a los 17,92 Mm^3 de la situación de base, debido a una menor tasa de riego ponderada, gracias a la introducción de mejora en los sistemas de riego en esta eventual matriz de cultivo, la cual pasaría de 25.274 m^3/ha/mes a 20.664 m^3/ha/mes en condiciones futuras (CNR-ARRAU, 2014).

Tabla II-33: Demanda proyectada considerando cambios en la matriz de cultivos y tasa de riego ponderada final (m³/ha/mes).

CULTIVO	Sup (ha)	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	TOTAL
Maíz Choclo	71,7	0	0	0	0	0	106.531	172.075	249.415	309.064	373.266	342.509	224.483	**1.777.343**
Tomate Aire Libre	45,8	55.181	52.970	49.944	45.064	50.259	43.096	53.866	0	0	0	0	67.454	**417.833**
Zapallo Italiano	58,6	86.638	85.521	82.929	58.221	0	0	0	0	0	0	55.936	81.524	**450.769**
Zapallo Italiano / Lechuga	34,7	61.101	60.393	58.904	41.691	29.004	59.056	82.542	0	0	0	0	0	**392.692**
Lechuga	36,0	0	0	0	0	29.891	60.833	85.067	0	0	0	0	0	**175.790**
Lechuga / Maíz Choclo	24,8	58.125	0	0	0	23.665	48.676	68.117	52.035	77.453	95.746	98.708	99.555	**622.080**
Lechuga / Otros Cultivos	39,1	110.498	73.615	55.071	0	32.487	66.117	92.456	63.132	83.121	116.120	85.327	135.081	**913.024**
Chacra Casera	25,8	71.719	0	0	0	0	55.285	71.907	108.906	143.305	163.895	157.836	116.976	**889.830**
Otros Cultivos	35,0	43.086	62.654	51.083	37.968	38.638	0	0	0	0	53.952	59.251	68.981	**415.614**
Alfalfa	189,8	0	0	0	0	0	482.743	634.678	779.904	949.737	994.767	958.065	795.580	**5.595.474**
Otras Praderas	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**0**
Durazno	29,4	0	0	0	0	0	30.061	50.065	65.321	80.066	65.193	53.832	23.546	**368.083**
Peral	28,0	58.067	0	0	0	0	0	28.330	38.672	98.361	112.402	108.241	90.682	**534.755**
Peral / Alfalfa	22,3	53.388	0	0	0	0	20.736	53.509	69.331	131.521	146.359	140.973	117.789	**733.607**
Vid Vinífera	52,3	0	0	0	0	0	37.713	68.119	103.176	156.492	163.893	127.831	98.559	**755.784**
Huerto Frutal	8,8	30.227	0	0	0	0	0	17.085	29.712	44.481	57.146	55.041	42.772	**276.464**
Huerto Frutal / Alfalfa	6,9	23.637	0	0	0	0	9.920	26.562	39.455	54.533	65.399	62.970	50.013	**332.490**

TOTAL (m3/mes)	**709,0**	**651.666**	**335.153**	**297.930**	**182.944**	**203.944**	**1.020.768**	**1.504.377**	**1.599.061**	**2.128.133**	**2.408.139**	**2.306.520**	**2.012.994**	**14.651.629**
TOTAL (L/s)		**251**	**125**	**115**	**68**	**76**	**394**	**562**	**617**	**795**	**899**	**953**	**752**	**-**
Tasa de Riego Ponderada (m3/ha/mes)		**919,1**	**472,7**	**420,2**	**258,0**	**287,6**	**1.439,7**	**2.121,8**	**2.255,3**	**3.001,5**	**3.396,4**	**3.253,1**	**2.839,1**	**20.664,5**

Fuente: CNR, 2014

II.5.4.2 Proyecciones futuras de la demanda de agua y salmuera por actividad minera

De acuerdo con los antecedentes presentados en la Etapa I y en el Capítulo II.4, en la cuenca Salar de Atacama existen extracciones de agua fresca asociado a actividades de la minería metálica y no metálica, y de salmuera asociado a la minería no metálica. Al realizar las proyecciones futuras de demanda de agua por la actividad minera, se asume que la demanda de ésta asociada a la minería metálica no aumentaría en el futuro. Incluso se puede considerar que la demanda podría disminuir considerando el termino de extracción de agua fresca por parte de MEL. En el caso de la demanda de salmuera y agua fresca asociado a la minería no metálica, se contemplan proyecciones que consideran continuar con la situación actual de tasas de consumo para ambos recursos, y proyecciones que podrían considerar un aumento en el futuro en función del potencial de extracción de estos recursos, para el caso en que pudieran ser aprobados los proyectos actualmente en proceso de evaluación ambiental (proyecto NX Uno de Peine).

II.5.4.2.1 Demanda mundial de litio

Para efectos de contar con referencias respecto del mercado del litio a nivel mundial, cabe mencionar que esta industria ha tenido un fuerte crecimiento en los últimos años, casi cuadriplicándose la producción mundial en los últimos 10 años (USGS, 2019). Este crecimiento ha sido impulsado principalmente por la creciente demanda de baterías en base a litio como se puede apreciar en la Figura II-76.

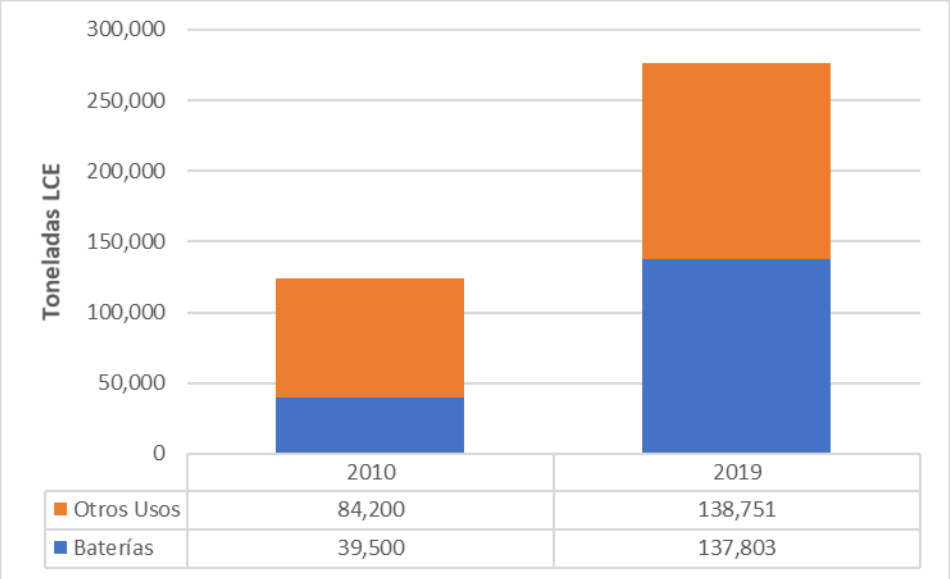


Figura II-76: Composición de la demanda global de litio para años 2010 y 2019
Fuente: Elaborado en base a datos provistos por (SignumBOX Inteligencia de Mercados, 2019)

Por varios años la demanda de baterías de litio, estaba asociada a dispositivos electrónicos (celulares, computadoras, consolas, entre otros), pero en los últimos 10 años la demanda para la industria de la electromovilidad y almacenamiento de electricidad para suministro eléctrico han tenido un fuerte crecimiento. Estos últimos 2 sectores se espera que lideren el crecimiento de la demanda de litio en los próximos años, siendo muy relevantes para los

desafíos de mitigación del cambio climático. La Figura II-78 presenta la composición actual de la demanda de litio por compuesto químico y su proyección al 2038, año en que la demanda agregada superará las 2.000.000 de toneladas de LCE (Ton LCE), casi ocho veces el valor registrado para el año 2019.

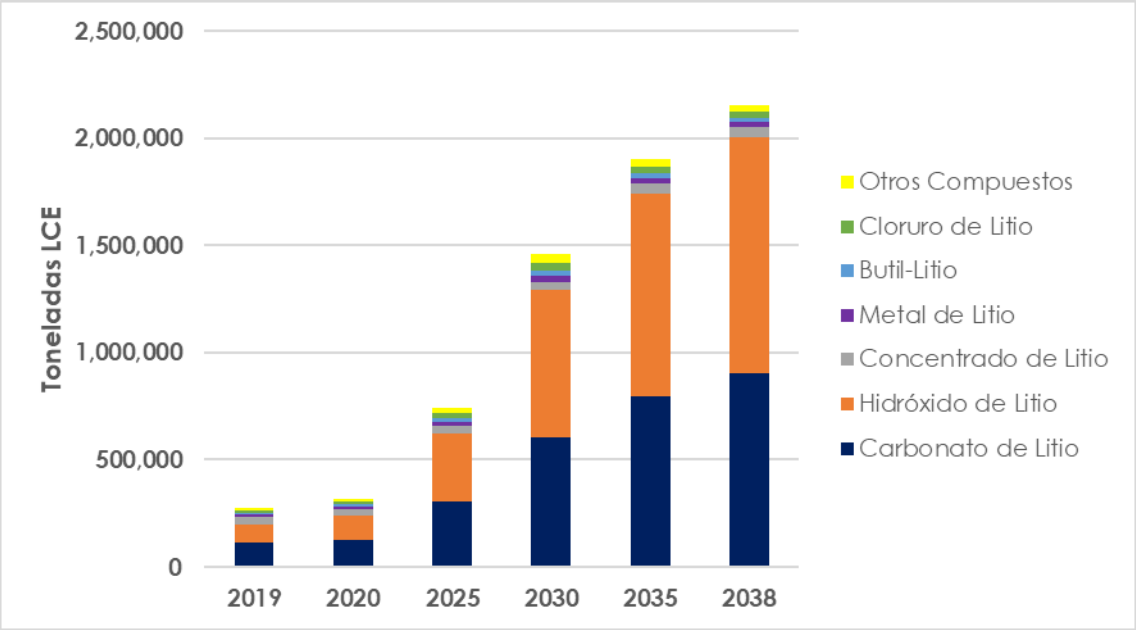


Figura II-77 Demanda conservadora de litio por aplicación
Fuente: Elaborado en base a datos provistos por (SignumBOX Inteligencia de Mercados, 2019)

Las proyecciones de crecimiento de la demanda de litio a futuro difieren en magnitud y con visiones distintas entre los analistas de esta industria, debido a la incertidumbre en la velocidad de penetración y adopción de esta tecnología que se irá dando en los distintos países del mundo, pero existe un consenso general en que habrá un crecimiento importante del sector. Por ejemplo, Lu et al. (2019) proyecta que al 2025 la demanda global alcanzaría 1.000.000 de Ton LCE (Lithium Carbonate Equivalent) y 2.000.000 de Ton LCE al 2030, es decir 7 veces la producción del 2019. En un horizonte de largo plazo World Bank Group and EGPs (2017) proyectan que la demanda acumulada 2013-2050 alcanzaría las 20.000.000 Toneladas de litio, para un escenario de mitigación del cambio climático compatible con limitar el incremento de las temperaturas globales a menos de 2°C. Este valor supera las reservas actuales conocidas del mineral, que alcanzan las 14.000.000 de Toneladas (USGS, 2019). La Figura II-78 muestra una estimación, presentada por Jiménez (2018), más conservadora de la demanda mundial de litio, pero que igual alcanza las 700.000 Ton LCE al 2025.

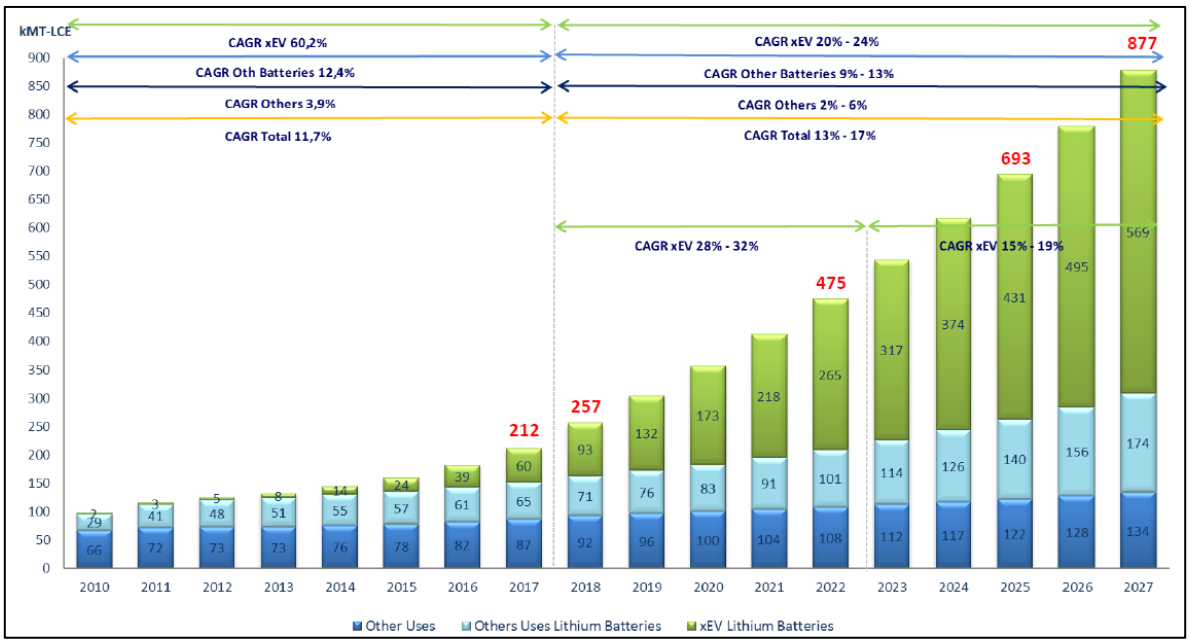
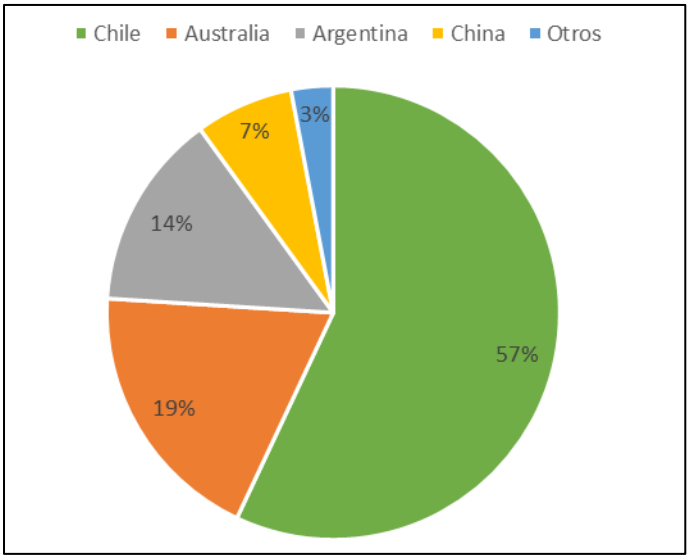


Figura II-78: Proyección de la demanda de litio según uso.
Fuente: (Jiménez, 2018)

II.5.4.2.2 Perspectivas para la producción nacional de litio

A nivel mundial, las reservas de litio (económicamente rentables) alcanzaron al 2018 los 14.000.000 de Toneladas (USGS, 2019). De estas, Chile controla más de la mitad (57%), ubicadas en su mayoría en el Salar de Atacama, seguido de Australia (19%) y Argentina (14%). En cuanto al consumo mundial de litio, este ha registrado un crecimiento significativo, llegando a las 221.000 Toneladas de Carbonato de Litio Equivalente (LCE) el 2017, lo que da cuenta de la importancia de este recurso en la industria y en la manufactura de baterías. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra un diagrama las reservas mundiales de litio y la Figura II-79 muestra la evolución de la producción mundial de litio por país de origen. De estas figuras se aprecia que Chile tiene las mayores reservas identificadas del mundo, lo que no necesariamente se traduce en términos de producción, siendo superada por Australia en los últimos años.



: Reservas de litio mundiales en toneladas al año 2018.
Fuente: Elaborado en base a información de la USGS (2019)

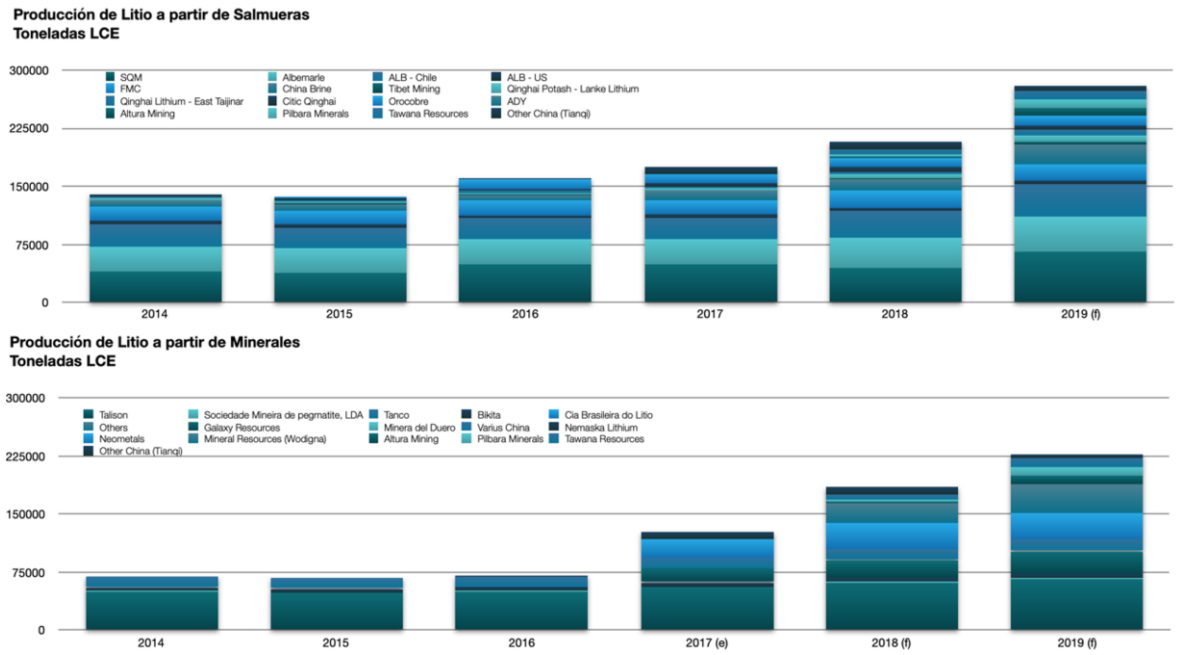


Figura II-79: Evolución de la producción mundial de litio .
Fuente: SignumBOX Inteligencia de Mercados, 2019.

II.5.4.2.3 Producción nacional de litio y sus perspectivas

El Informe de Inversión en la Minería chilena (COCHILCO, 2019) del año 2019, se identifican 3 proyectos de litio catastrados en la región de Antofagasta (ver Tabla II-34), a ser implementados en el período 2020-2022. Esta cartera de inversión representa un crecimiento del 276% en proyectos de litio con respecto a la cartera del 2017. Con estas

nuevas expansiones de planta, se estima que la producción de litio en Chile se triplicaría, alcanzando al 2022 niveles cercanos a las 240.000 toneladas de LCE(Figura II-80; COCHILCO, 2018).

Tabla II-34: Cartera de proyectos de litio catastrados en región de Antofagasta por COCHILCO al año 2019.

Proyecto	Operador	Tipo de Producto	Producción Anual	Puesta en marcha	Inversión Estimada (USD)	Estado RCA
Ampliación Salar del Carmen	SQM Salar S.A.	Carbonato de litio / Hidróxido de litio	22.000 / 26.000	2020	180.000	Aprobado (RCA 0262/2017)
Ampliación Planta La Negra - Fase 3	Albermale	Carbonato de litio	42.700	2021	300.000	Aprobado (RCA 0279/2017)
Ampliación carbonato litio a 180 KTPA	SQM Salar S.A.	Carbonato de litio	110.000	2022	450.000	Aprobado (RCA 0057/2019)

Fuente: Elaboración propia en base a (COCHILCO, 2019) y (SEA,2019)

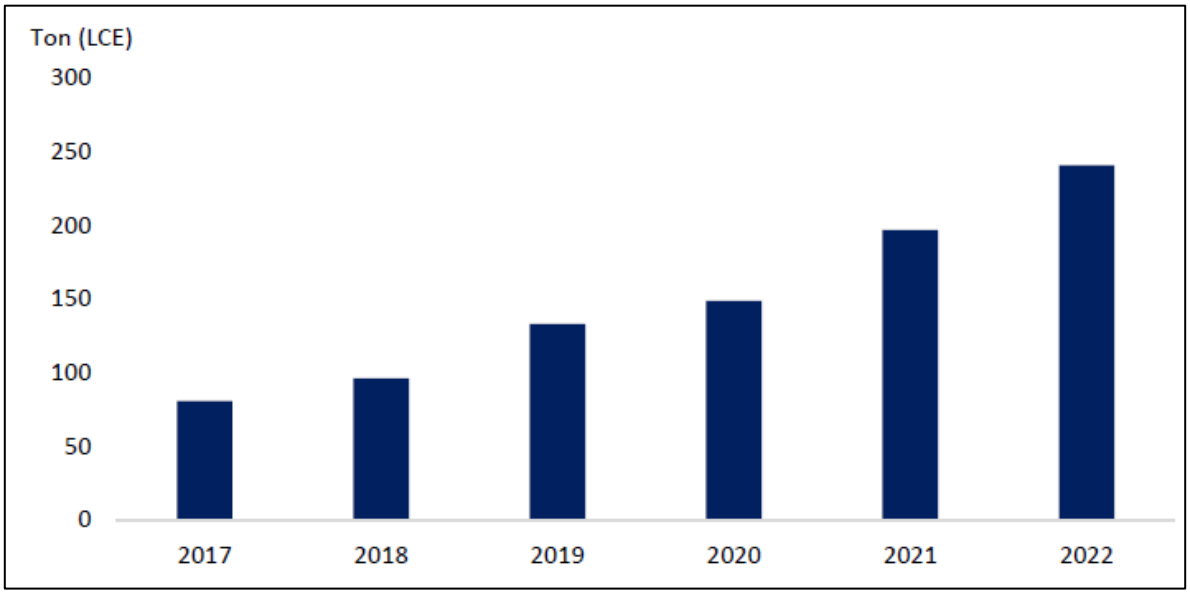


Figura II-80: Proyección de la producción de litio en Chile.
Fuente: (COCHILCO, 2018)

Resulta complejo tener estimaciones de la producción nacional a largo plazo, debido a que la cartera de proyectos no da cuenta de iniciativas más allá del 2022, sin embargo, es esperable que la producción nacional de litio tienda a expandirse en un contexto internacional que requerirá más litio y considerando que Chile cuenta con más de la mitad de las reservas mundiales (USGS,2019). Los salares de Chile y en particular el Salar de Atacama, son muy favorables para producir carbonato de litio, de hecho, el 2018 el 89,7%

de la producción nacional de compuestos de litio fue en este formato (SERNAGEOMIN, 2019), sin embargo, cabe hacer presente que, en los últimos años, el hidróxido de litio ha aumentado su participación de mercado debido al incremento de su uso en tecnologías de cátodos para baterías que requieren de este producto. Los proyectos en base a extracción de salmuera requieren mayor tiempo para entrar en operación y tienen largos ciclos de producción[31] (debido principalmente al proceso de evaporación de las pozas y su cosecha que requiere alrededor de 10 a 12 meses). Cabe mencionar que es posible producir hidróxido de litio a partir de carbonato de litio y existe experiencia nacional, pero esto implica procesos adicionales (SQM, 2019), de hecho, de la producción nacional de compuestos de litio del año 2018 un 6,6% fue en forma de hidróxido de litio (SERNAGEOMIN, 2019).

En este contexto y de acuerdo con las proyecciones, la producción de largo plazo de productos de litio en Chile, se espera que crezca, sin embargo, probablemente sea a tasas menores de lo que crecerá la producción por parte de yacimientos rocosos (espodumeno), como los ubicados en Australia. Argus (2019) menciona que para el periodo 2018-2027 la demanda crecerá a un 10-14% anual en el caso del carbonato de litio y a un 25-29% para el hidróxido de litio. Por lo que es esperable que la expansión potencial de la producción nacional de litio tenga un crecimiento máximo dado por la expansión de la demanda por carbonato.

En el marco de la producción nacional posterior al 2022, es posible tomar como referencia los contratos vigentes entre CORFO y las empresas SQM Salar y Albemarle. En el caso de Albermarle, el contrato tiene una vigencia hasta el 2043, permitiendo una cuota total de hasta 262.132 toneladas métricas de Litio Metálico Equivalente (CORFO, 2016)[32], por su parte el contrato de SQM, tiene una vigencia hasta el 2030, y permite una cuota total en el periodo de hasta 349.553 toneladas métricas de Litio Metálico Equivalente (CORFO, 2018). En base a estos antecedentes, y al potencial de crecimiento futuro que podrían materializar ambas compañías con posterioridad al 2022, y considerando también que, podrían entrar nuevas producciones en los próximos años desde otros salares en Chile, por ejemplo el Salar de Maricunga (Codelco y Minera Salar Blanco), se abren perspectivas de estimaciones que la producción anual nacional de productos de litio pudiera alcanzar niveles en torno a las 290.000 Toneladas de LCE para el 2028-2030, lo que representa más del triple de la producción del año 2018. El crecimiento en la producción chilena de productos de litio eventualmente podría ser aún mayor, dado los sólidos fundamentos en las perspectivas de demanda mundial al 2030, pero esto dependerá de múltiples factores nacionales, dentro de los cuales se encuentra ejecutar inversiones significativas en aumentos de eficiencia y recuperación en los procesos productivos e inversiones asociadas a nuevas expansiones de planta, como asimismo, en la entrada y puesta en marcha de nuevos proyectos en otros salares distintos al Salar de Atacama (por ejemplo en el Salar de Maricunga)

[31] Esto se debe principalmente a que el proceso de evaporación de las pozas y su cosecha demora cerca de 10 a 12meses. .

[32] Aprueba Anexo de modificación al Convenio Base entre Corfo y la empresa "Rockwood Litio Limitada" (hoy "Albemarle Limitada"), y las únicas socias de esta "Rockwood Lithium Inc." (actualmente "Albemarle Lithium Inc.") y "Foote Minera e Inversiones Limitada".

II.5.4.3 Proyecciones futuras de la demanda de agua por actividad turística

Para proyectar la demanda de agua producto de la actividad turística en la cuenca, se proyectan primero las visitas al SNASPE Reserva Nacional Los Flamencos, como medida del crecimiento de la actividad turística en la cuenca, y luego se traduce dicha información en uso de recursos hídricos usando una estimación de la dotación por persona calculada a partir de un dato proporcionado por la Dirección de Obras Hidráulicas (i.e., lógica similar al Capítulo II.4.3.3).

A pesar de la falta de datos estadísticos sobre el efecto de la pandemia de Covid-19 sobre la actividad turística en la cuenca, el alto impacto que ha tenido a nivel nacional y global requieren que sea considerada en el análisis. Por ello, y tomando en cuenta que la escala temporal comienza el año 2025, dicho efecto se supone simplemente como un receso en la actividad turística, la cual se retoma el año 2022 con la tasa promedio de crecimiento del periodo 2005 a 2019 (cuyo valor es del 12,8%). Es decir, es solo desde el año 2022 que comienza un aumento en la cantidad de turistas que visitan la cuenca.

Dada la incertidumbre existente en posibles proyecciones de las tasas históricas de crecimiento del turismo, se decide simular dos escenarios, los cuales evidencian dos futuros plausibles en la cuenca: (1) Crecimiento Optimista y (2) Crecimiento Pesimista. En ambos casos, la tasa histórica obtenida de crecimiento del turismo mantiene un decrecimiento constante, el cual solo se diferencia en su magnitud. El primer escenario busca representar un fuerte crecimiento del sector a futuro. Mientras que el segundo muestra una estabilización de la cantidad de turistas dentro del período de simulación, representando una capacidad de carga en la zona (ver Figura II-81).

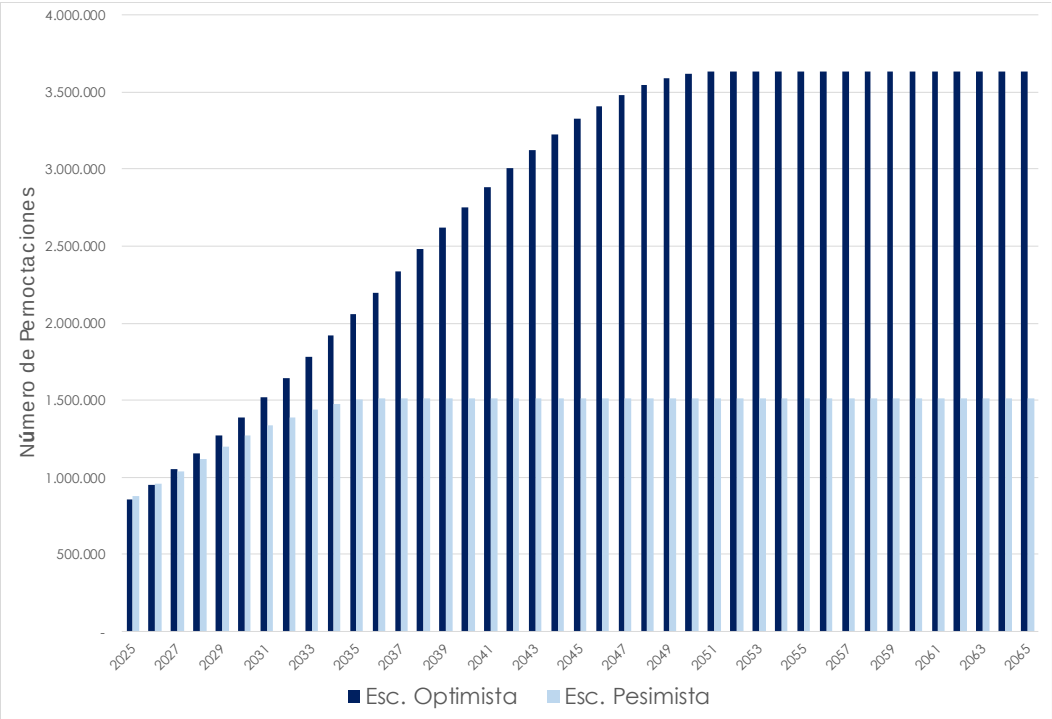


Figura II-81: Proyección de la actividad turística en la cuenca por escenario.
Fuente: Elaboración propia.

Los valores de las pernoctaciones obtenidos en cada escenario pueden ser transformados a consumos de agua potable mediante el mismo procedimiento utilizado en el Capítulo II.4.3.3., tomando en consideración los 2 casos de consumo (i.e., alto y bajo). Los resultados se observan en la Figura II-82.

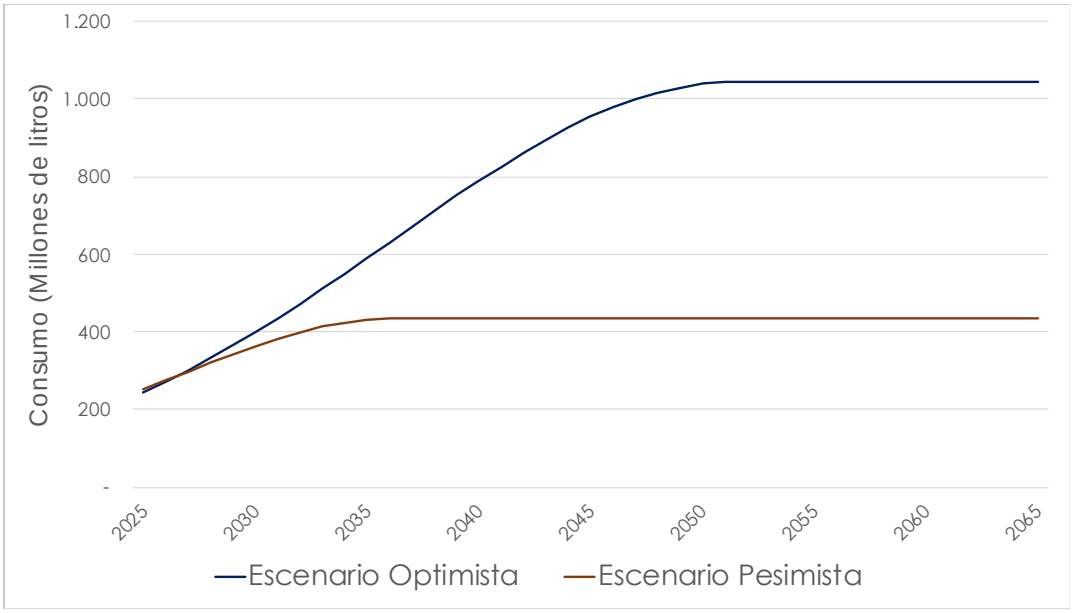


Figura II-82: Proyección de consumo de agua potable por la actividad turística en la cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración propia.

II.6 Diagnóstico a partir de la información analizada

II.6.1 Introducción

Este capítulo realiza un diagnóstico a partir de la información recopilada y analizada. El diagnóstico se realiza considerando el marco conceptual necesario para el desarrollo del Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama. Tomando en cuenta los elementos caracterizados en esta Etapa y los antecedentes entregados en la Etapa de línea de base, el análisis se centra en los siguientes temas principales: componentes del balance hídrico, necesidades de recursos hídricos de los distintos sectores y sistemas, caracterización de proyecciones futuras, y caracterización de la gestión de los recursos hídricos en la cuenca.

II.6.2 Balance hidrológico

Respecto al balance hídrico superficial y subterráneo de la cuenca del Salar de Atacama, se revisó en esta Etapa los antecedentes del análisis más reciente que se encuentran en Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018). En este trabajo se constata que el equilibrio hídrico natural de este sistema se ve influenciado producto del uso de los recursos de manera antrópica, con una variación de almacenamiento global estimado entre 1.750 y 1.950 l/s al 2018.

Con la información observada en estaciones pluviométricas en la cuenca se ha establecido en trabajos previos una relación que permite caracterizar la distribución espacial de la precipitación. Esta relación se ha utilizado para modificar la información grillada a escala diaria que se ha generado en el marco del proyecto de Actualización del Balance Hídrico (DGA-U Chile-PUC, 2018).

Es importante destacar que una de las principales salidas del sistema hidrológico del Salar de Atacama corresponde a la evaporación de precipitaciones y evaporación de suelo. Marazuela et al. (2019) indica que esta salida por evaporación (que se ve limitada por la profundidad del acuífero) puede amortiguar las oscilaciones en el nivel freático del salar en respuesta a perturbaciones tanto naturales como antropogénicas. De esta manera su precisa determinación es de gran importancia para calcular el balance del sistema hídrico de la cuenca y cuantificar así el nivel de stress hídrico del sistema con respecto a su situación natural. Respecto a este punto, se debe recalcar que los registros de evaporación de bandeja son limitados tanto en cobertura de la cuenca como en registros históricos, por lo que se enfatiza la necesidad de un mejoramiento del plan de monitoreo de esta variable en la cuenca del Salar de Atacama.

Por otro lado, se identifica que actualmente los trabajos de balance hídrico superficial y subterráneo no se encuentra integrado en un modelo de base numérica a nivel de entradas y salidas, sino que se combinan modelos conceptuales con modelos numéricos. Esto puede implicar una simplificación de algunos procesos de interacción que pueden ser relevantes por ejemplo en términos de eficiencia en los consumos de agua o la ocurrencia de eventos de alta escorrentía. Por lo anterior surge la necesidad de realizar dicha interconexión, de

acuerdo con lo constatado en el Capítulo I.5de revisión de antecedentes de este proyecto. Asimismo, se requieren incorporar procesos hidrológicos tales como la escorrentía superficial producto de los deshielos que se originan en las zonas cordillera de la cuenca del Salar de Atacama y la respectiva infiltración al sistema subterráneo producto de estos procesos (DGA, 2010). Esto se implementará en la siguiente Etapa del presente proyecto.

Otro aspecto que puede ser relevante en el cálculo del balance es la recarga de agua a nivel subterráneo con fuentes que se extienden por sobre la cuenca hidrográfica (límites topográficos) desde la zona del altiplano. El trabajo de Corenthal et al. (2016) indica que el balance de aguas en la cuenca del Salar de Atacama implica un aporte desde la cuenca hidrogeológica sobre una superficie que supera en 4 veces la cuenca hidrológica. Sin embargo, a nuestro entender no existen trabajos de modelación que permitan representar de manera numérica estos procesos de recarga para la cuenca del Salar de Atacama. Estas posibles recargas de largo plazo pueden ser consideradas en el proceso de ajuste en el desarrollo de modelos numéricos.

II.6.3 Demanda de agua por sectores y sistemas que requieren recursos hídricos

En esta sección se realiza un diagnóstico de la caracterización de los consumos y necesidades de agua para los distintos sectores y sistemas socio ecológicos presentes en la cuenca. Utilizando la información disponible queda en evidencia que la principal extracción de agua en la cuenca del Salar de Atacama corresponde a la extracción de agua fresca asociada a la minería metálica de cobre, seguido por la minería no metálica, en tercer término por el uso de agua para agricultura y finalmente el consumo de agua potable (ver Tabla II-35). La información de consumo se complementa con información de derechos de aprovechamiento de acuerdo con lo presentado en la Etapa I. Se puede observar que la actividad minería recurre de manera preponderante a derechos de agua subterráneos, por el contrario, la actividad agrícola recurre principalmente a derechos de agua superficiales. El uso de agua potable/doméstico utiliza principalmente derechos subterráneos, pero cuenta también con recursos a nivel superficial. Finalmente resulta interesante apreciar que la fracción de uso de los derechos de aprovechamiento es

considerablemente superior en el caso de las extracciones mineras (valores cercanos al 90% de uso) estando cercano a un 40-50% en el caso de la agricultura y uso de agua potable.

Tabla II-35: Estimación de extracciones promedio de agua para consumo humano y sectores productivos en la cuenca del Salar de Atacama para el año 2019.

Sector	Caudal de extracción (l/s) (1)	Derechos de agua (l/s)		Fracción de uso aparente (%) (2)
		Subt	Sup	
Agua potable	42	80	15,9	44%
Minería metálica (agua fresca)	1529,7	3.625,2 (3)	8,5	32%
Minería no metálica (agua fresca) (4)	179,9			
Agricultura	1.140 (5)	4,4	1.656,40	69%
Otro (6)	-	163,7	433,9	-

Notas: (1) Considerar usos superficiales y subterráneos; (2) Toma en cuenta el caudal de extracción dividido por la suma de derechos; (3) Incluye derechos asignados a uso industrial; (4) A partir de los informes de Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico (Informe N°25 de SQM[33] e informe N°4 de Albemarle[34]); (5) Caudal de extracción para agricultura, a diferencia de agua potable y minería, no es un registro observado, sino que una estimación a partir de información de superficie cultivada y consumo de agua por diferentes cultivos (ver II.4.1); (6) incorpora la clasificación "blanco" en usos.
Fuente: Elaboración propia.

Los requerimientos de agua para sostener las necesidades de evaporación del sistema de lagunas existente en el margen oriental del Salar de Atacama han sido estimadas en análisis de balance, sin embargo, el balance no es la única variable relevante para explicar el desarrollo de ecosistemas en estas lagunas, destacándose en algunos trabajos el efecto que tiene la salinidad. A continuación, se describe con mayor detalle el diagnóstico para cada uno de estos sectores y sistemas.

II.6.3.1 Consumo de agua para satisfacer necesidades básicas de la población

En cuanto al acceso al agua potable y saneamiento por los habitantes de la cuenca del Salar de Atacama, las comunidades y poblados en la cuenca usan como fuente de abastecimiento principal sistemas en base a redes de distribución de agua potable operados por Comités de APR. Sin embargo, los comités de Camar y Río Grande no se encuentran en operación (i.e., las plantas no están en funcionamiento). Por ello, su abastecimiento en particular ocurre a través de CAPRA, comité que hace envío del agua a través de camiones aljibe.

Respecto de la operación de los Comités de APR de la información recopilada se concluye que la cuenca presenta una cobertura del 100% en todos los APRs en funcionamiento con

[33] Informe N°25 de SQM disponible en: https://snifa.sma.gob.cl/SeguimientoAmbiental/Ficha/94342
[34] Informe N°4 de Albemarle disponible en: https://snifa.sma.gob.cl/SeguimientoAmbiental/Ficha/93715

excepción de San Pedro de Atacama, el cual alcanza un 96%. En este caso no se satisface la demanda total de agua potable, generando un déficit de 1,28 l/s, los cuales representan un 1,28% de su demanda total. En cuanto a la calidad de servicio, de acuerdo con información recopilada en el estudio Amulen (2019) se observan cortes solo en el APR de San Pedro de Atacama, aunque estos son menores (1-2 cortes en el periodo 2014-2018).

La información disponible respecto a tasa de crecimiento de la población residentes y temporal (especialmente asociada al turismo) permite inferir una proyección de la demanda al futuro. Esta proyección se basa en una estimación de la dotación por persona que se ha calculado con un dato proporcionado por la Dirección de Obras Hidráulicas. Es importante poder contar con información con mayor extensión temporal que puede ser provista por los operadores de los Comités de APR. De esta manera se puede analizar la estacionalidad en el consumo de agua en la cuenca para, de esta manera, poder mejorar la relación que existe entre el consumo de agua y la presencia de visitantes temporales (turismo).

II.6.3.2 Consumo de agua para actividades productivas

Se han analizado en este informe las condiciones actuales y las proyecciones futuras de consumo de agua fresca para las principales actividades productivas que existen en la cuenca del Salar de Atacama.

II.6.3.2.1 Consumo de agua para agricultura

Respecto del consumo de agua para agricultura se presentó en secciones anteriores información respecto de la demanda (superficie cultivada, tipos de cultivos y demandas de riego de estos cultivos) de agua para agricultura en la cuenca del Salar de Atacama. Se pudo apreciar que existen discrepancias importantes respecto de la información en cada una de estas variables que debe ser resuelta en discusión con actores locales y servicios públicos relacionados con este sector productivo. Estas diferencias se explican principalmente debido a las distintas extensiones territoriales consideradas en los estudios revisados, la existencia de información actualizada en términos de la superficie agrícola y estructura de cultivos mediante encuestas a usuarios.

Respecto de la ubicación espacial de la superficie dedicada a la agricultura tomando en cuenta las discrepancias presentadas en los capítulos anteriores para efectos del desarrollo del modelo hidrológico (Etapa III) se propone utilizar la distribución espacial desarrollada por Zhao et al. (2016), mientras que la información sobre tipos de cultivos y su proporción en la cuenca, se obtendrá desde el Censo Agropecuario (INE, 2007) la cual será por su parte complementada con estudios actualizados en algunas zonas de la cuenca.

No existen antecedentes respecto de la confiabilidad en el suministro de agua para esta actividad en función de las variaciones temporales en la disponibilidad de recursos hídricos.

Lo anterior puede ser evaluado con el modelo hidrológico superficial que será desarrollado en la tercera Etapa de este proyecto.

II.6.3.2.2 Consumo de agua para actividades mineras

Todas las empresas cuya operación productiva se encuentra dentro de los límites de la cuenca, deben solicitar aprobación ambiental para poder extraer salmuera y/o agua fresca para sus operaciones. En la Etapa I se detallaron las reglas de operación que permiten a SQM S.A. y Albemarle el bombeo de la salmuera del núcleo del Salar y los compuestos que a partir de ella se producen (mediante las RCAs respectivas). En el caso del agua fresca, en esta Etapa, se agregó el detalle de las RCAs activas que regulan la extracción de ésta para uso en la minería metálica y no metálica (uso industrial). Sumado a estos dos operadores históricos en el Salar, se analizó también la operación de Minera Escondida Limitada (MEL) y Compañía Minera Zaldívar (CMZ), dado que históricamente ambos han extraído agua fresca y conducido a sus faenas mineras al exterior de la cuenca. Sin embargo, cabe hacer presente que MEL desde diciembre del 2019 ya no extrae agua fresca desde la cuenca dado que cesa su permiso ambiental de extracción.

El desafío que deben enfrentar las empresas mineras en el Norte de Chile es bastante similar: asegurar un abastecimiento confiable en el tiempo (para el personal y las operaciones de faena), en una región hiper-árida, y con evidente escasez. Para enfrentarlo, se ven obligadas ya sea a buscar nuevas fuentes de agua o a mejorar la eficiencia de las existentes (Cisternas & Gálvez, 2018). Es en este escenario que el agua desalinizada aparece como una opción atractiva, y aunque varios problemas deben ser abordados y considerados antes de usarla (e.g. aspectos ambientales y económicos, efectos del agua de mar sobre la recuperación metalúrgica o sobre la corrosión de los sistemas de transporte y operación), ya ha tenido un fuerte impacto en la industria del cobre a nivel nacional (ver Figura II-83) y regional (ver Figura II-84).

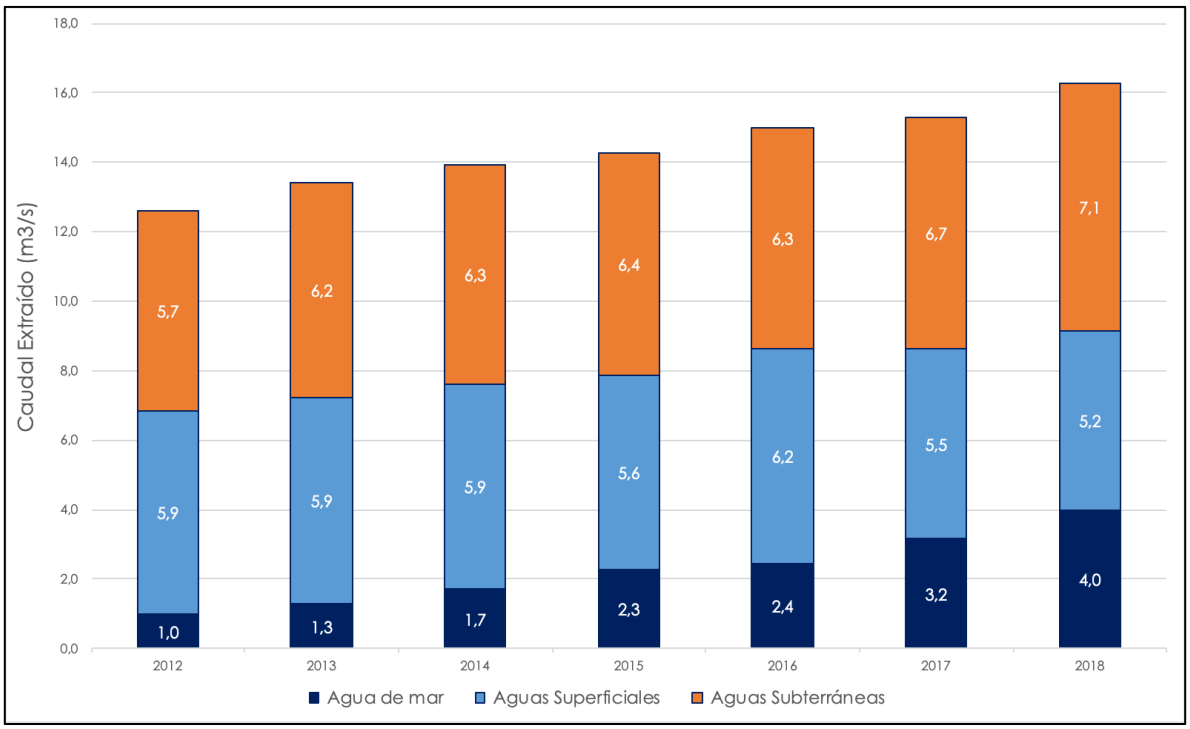


Figura II-83: Extracción de agua en la industria minera nacional del cobre según fuente de extracción.

Fuente: Elaboración propia en base a COCHILCO (2019a).

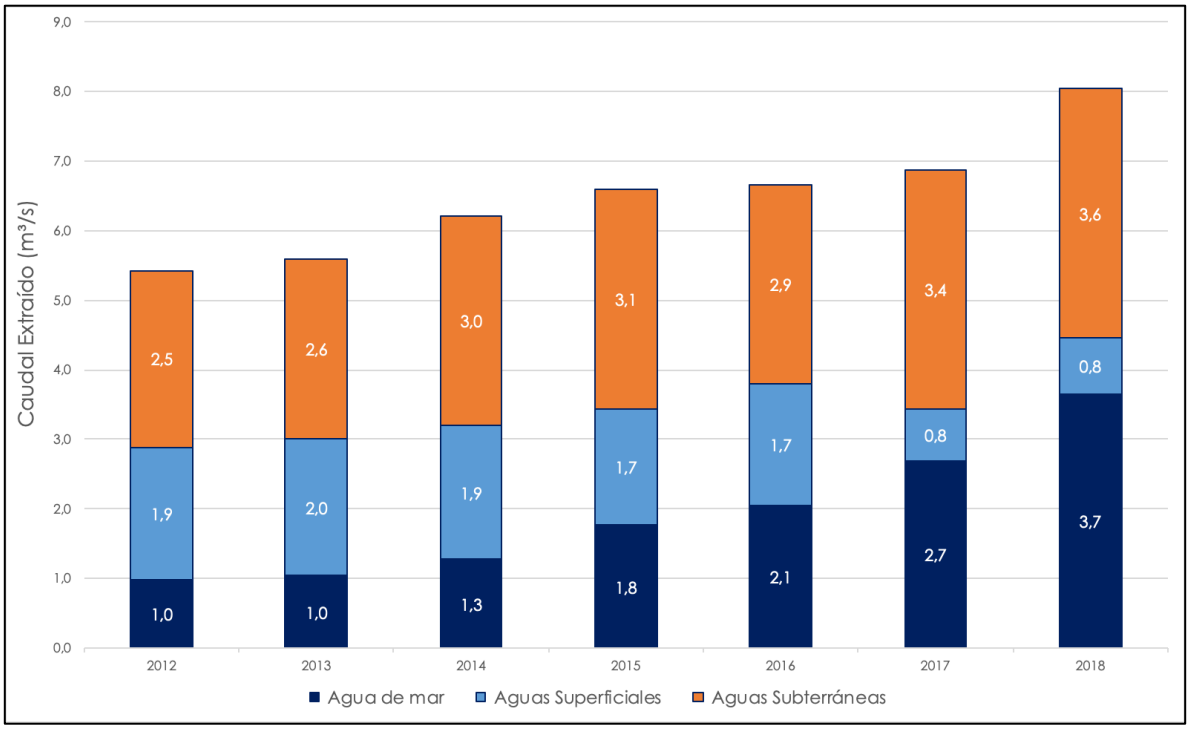


Figura II-84: Extracción de agua en la industria minera del cobre según fuente de extracción, región de Antofagasta.

Fuente: Elaboración propia en base a COCHILCO (2019b).

El uso de agua de mar en el período 2012 a 2018, incluyendo tanto el agua desalada como el agua salobre, registró una tasa de crecimiento promedio anual del 48,9% a nivel nacional y 39,8% a nivel de la región de Antofagasta. Esta tendencia se ve materializada en la cuenca a través de grandes estrategias y diversos proyectos. Ejemplo de ello es la estrategia hídrica de MEL, que apunta a cesar el uso de agua continental al 2030, para pasar a una matriz principalmente basada en agua desalinizada (BHP, 2019). En línea con este plan, inaugura en 2006 una primera planta desalinizadora de 525 l/s, en 2018 una segunda planta de 2.500 l/s (la más grande de Latinoamérica), y se encuentra ejecutando actualmente el proyecto Escondida Water Supply Extension (EWSE) para aumentar esta capacidad hasta 3.800 l/s.

Un esfuerzo similar al de la desalinización puede evidenciarse en el reciclaje de aguas (ver Figura II-85), la cual ha tenido un consistente aumento en el mismo período. Al reciclar, los excedentes de agua pueden ser reutilizados dentro de un mismo proceso, en etapas diferentes, o enviadas desde y hacia procesos distintos, de acuerdo a los requerimientos de calidad y cantidad de cada uno de ellos, produciendo un ahorro importante por efecto de la optimización del uso del recurso y la reducción en los volúmenes de aguas que deben ser tratadas previo a su descarga (Cochilco, 2019b).

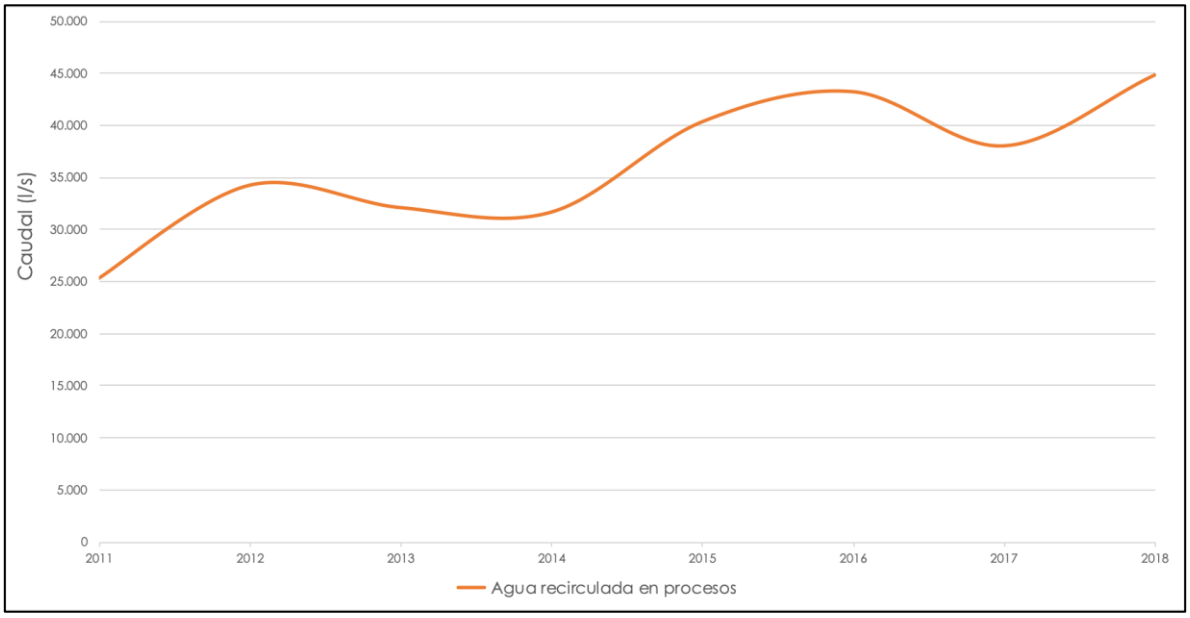


Figura II-85: Recirculación de agua en la operación minera completa (a nivel nacional).
Fuente: Elaboración propia en base a COCHILCO (2019a).

Los esfuerzos por mejorar y explorar nuevas tecnologías de desalinzación, como la desalinización parcial (Subramani y Jacangelo, 2015), están siendo trabajadas en Chile a nivel público, privado y mediante alianzas de ambos sectores. Ejemplo de ello es la propuesta de CORFO para la creación del Instituto Chileno de Tecnologías Limpias (ITL), el cual busca impulsar, además de la minería sustentable, la energía solar y materiales avanzados de litio y otros minerales. Todos estos antecedentes sugieren que el uso de agua desalada en la operación minera estará cada vez más presente, siendo un pilar

fundamental en reducir el estrés hídrico local.

II.6.3.3 Utilización de salmueras para la extracción de litio

Por otro lado, el proceso productivo de concentración de salmueras de ambos operadores en la cuenca utiliza la tecnología no selectiva de pozas de evaporación, las cuales remueven cerca de 170.000 litros de salmuera por cada tonelada de carbonato de litio producida (Albemarle, 2016). Existen a nivel de estudio y pilotos, sistemas y tecnologías de producción de litio que podrían ser más eficientes y sustentables, capaces de (1) mantener la producción con una menor tasa de extracción de salmuera mediante la recuperación de litio en el proceso, o (2) lograr una extracción selectiva del litio desde la salmuera o recuperación del agua evaporada, de modo que el agua baja en contenido de litio pueda ser reinyectada.

Entre las tecnologías no selectivas (i.e., aquellas que concentran la salmuera sin discriminar entre un compuesto u otro) disponibles, se encuentran entre otras: (1) la destilación simple, (2) la osmosis reversa, (3) la osmosis directa, (4) y la destilación por membrana. Por otro lado, entre las tecnologías selectivas (i.e., aquellas que permiten extraer determinados iones de la salmuera) se encuentran: (1) la adsorción, (2) la electrodiálisis, (3) la electroquímica, (4) la extracción por solvente, (5) la flotación iónica, (6) el intercambio iónico, (7) la nanofiltración, (8) la precipitación química. Dentro de todo este abanico de tecnologías que se encuentran a nivel de estudio y pilotos, se han identificado alternativas a las pozas de evaporación (e.g., destilación simple y destilación por membrana) con mejores capacidades de producción, recuperación de litio, costos, selectividad, y recuperación de agua para otros usos como la reinyección (Lee, 2020). Cabe señalar que estas tecnologías aún no han sido probadas a escala industrial y su adopción dependerá tanto de los costos que involucre el reemplazo de la actual tecnología de procesamiento, como la capacidad que tengan estas soluciones de adaptarse a las distintas calidades y propiedades de las salmueras que están presentes en los diversos salares existentes en el denominado triángulo del litio (Chile, Argentina y Bolivia).

II.6.3.4 Necesidades de ecosistemas acuáticos

El uso del agua en la cuenca del Salar de Atacama y la vinculación que esto pueda tener en el comportamiento de la flora y fauna son temas que requieren ser abordados por los distintos actores con competencia ambiental y los actores privados que operan a nivel de cuenca, considerando que la literatura que aborda los temas asociados a los efectos ambientales dentro del Salar de Atacama es aún escasa.

Estudios recientes indican que en los últimos 20 años ha habido un incremento en algunos indicadores ambientales ligados al aumento en la actividad minera en la cuenca, entre otros, y a modo de ejemplo, la disminución en la cobertura vegetacional y en la humedad del suelo (Liu et al., 2019). Este tipo de análisis de cobertura vegetacional se puede desarrollar en la cuenca siguiendo experiencias como la de Minera Escondida Ltda. a través del Centro de Ecología Aplicada, (2017) quienes utilizando un modelo biofísico han llevado a cabo una evaluación de la respuesta vegetacional como función de la disponibilidad

hídrica en sector sur del Salar de Atacama, específicamente en el sector de Tilopozo.

A nivel de los principales ecosistemas del salar, en los distintos sectores que componen la Reserva Nacional Los Flamencos, los antecedentes de carácter público dan cuenta que se ha observado una disminución en el éxito reproductivo de aves como el flamenco en años recientes (2017-2018), cuyas causas aún se desconocen (Gajardo and Redón 2019).

Intentos por relacionar las condiciones de salinidad de lagunas altiplánicas y la presencia de flamencos han sido desarrollados por De La Fuente y Niño (2010) para el Salar de Punta Negra ubicado en una zona cercana al Salar de Atacama. Es posible extender este análisis para las lagunas en la cuenca del Salar de Atacama si se disponen de series de tiempo de presencia de flamencos en la región para lo cual se requeriría disponer de información de monitoreo de flamencos a nivel regional perteneciente al Grupo de Conservación Flamencos Altoandinos (GCFA).

II.6.4 Gestión de recursos hídricos y de las salmueras

Las secciones anteriores entregan un diagnóstico de los componentes que dan cuenta de la oferta (sistema natural) y demanda de recursos hídricos (sistema natural y socioeconómico). La gestión de recursos hídricos se complementa con las interacciones que tienen distintos actores y los instrumentos que se utilizan para planificar, incentivar y restringir ciertas acciones que afectan el estado de los recursos hídricos y otros recursos complementarios como la salmuera.

A continuación, se presenta un diagnóstico que incluye un análisis en relación a los actores relevantes en la gestión de los recursos hídricos y su forma de organización, instrumentos y herramientas diseñados para la gestión de los recursos hídricos (y recursos complementarios) y herramientas de monitoreo de apoyo a la gestión.

Los actores relevantes para la gestión de recursos hídricos y salmueras de la cuenca del Salar de Atacama pueden reconocerse a 3 niveles. A un nivel regional y provincial destacan las escalas de gobierno y los servicios públicos que tienen relevancia en la gestión de distintos aspectos relacionados con el agua, teniendo un rol central el Ministerio de Obras Públicas (DGA, DOH, DIRPLAN), complementando funciones con otros ministerios en temas asociados a agricultura (INDAP, CNR, SAG), medioambiente (SMA, SEA, CONAF), pueblos originarios (CONADI), minería (SERNAGEOMIN, CCHEN, Ministerio de Minería y CORFO a través de sus contratos de litio) y turismo (SERNATUR).

A un nivel de cuenca destacan la Municipalidad de la comuna de San Pedro de Atacama, que tiene un traslape casi exacto con la delimitación de la cuenca hidrológica, agrupaciones que se derivan del accionar de la cuenca (Consejo de la Sociedad Civíl y Consejo Ambiental Comunal) y la Asociación Indígena del Consejo de Pueblos Atacameños - CPA. Todas estas organizaciones destacan por la capacidad de coordinación y representación grupal de distintos actores en la cuenca.

Finalmente se encuentran los distintos actores, a una escala local, que son quienes toman

decisiones y realizan acciones directas respecto del uso (directo o indirecto) de los recursos hídricos. En este caso podemos encontrar los distintos usuarios que extraen agua fresca y salmuera, como se describió en una sección anterior, pero también se encuentran, por ejemplo, empresas de turismo cuya actividad depende del estado de los ecosistemas que dependen también de recursos hídricos (ej. Lagunas del Sistema Soncor, ver Capítulo II.4.4).

Respecto de usuarios que extraen el agua hay distintas formas en que organizan sus acciones. En el caso de los Comités de APR la organización tiene traslapes con organizaciones de tipo comunitario (vecinos). En el caso de los usuarios agrícolas la organización es a través de organizaciones de usuarios de agua (OUAs) del tipo Comunidades de Aguas. Existen varias de estas Comunidades de Aguas de acuerdo a lo presentado en la Etapa I. En el análisis de estas OUAs es importante remarcar el contexto de la actividad agrícola en la región. Debido a la escasa disponibilidad de recursos hídricos, la competencia por su uso, y la baja rentabilidad asociada a esta actividad, es que la agricultura tiene solo características de una actividad de subsistencia en la región (CNR, 2003). Esto se pone claramente de manifiesto en la baja solvencia económica de las asociaciones de agricultores y regantes en la zona (PLADECO 2011-2015). Sin perjuicio de lo anterior, es importante considerar el componente socio cultural asociado al agua en general y a la práctica del riego en particular en el contexto del pueblo Atacameño tal como lo destacara Prieto (2018). En este contexto, compartido con muchas cuencas de la zona norte y altiplano del país, existe una fuerte asociación entre el mundo agrícola y la cultura indígena. A modo de ejemplo, las Comunidades de Aguas que se han conformadas en la cuenca del Salar de Atacama, tienden a llamarse como *Asociaciones Atacameñas de Regantes y Agricultores*[35] del río o zona relevante donde una comunidad indígena ha practicado agricultura desde tiempos antiguos. No existen formalmente Comunidades de Aguas Subterráneas en la cuenca del Salar de Atacama, pese a la relevancia[36] y las restricciones que tiene su extracción.

En cuanto a la interacción de las distintas instituciones del Estado ligadas al recurso hídrico, se observan ciertas desconexiones entre normativas, planes y políticas públicas, respecto de objetivos de protección del medio ambiente y uso y goce de recursos naturales para distintos fines productivos. En este sentido, las instituciones trabajan y hacen esfuerzos en forma paralelo sobre temas relacionados, incluso con cruces de algunas temáticas compartidas, pero cada una en su ámbito de acción, no de forma vinculada, ni necesariamente con la misma visión global (Arcadis, 2016). Respecto de la coordinación institucional requerida para realizar una gestión hídrica han existido esfuerzos por desarrollar instrumentos de planificación. En la Etapa I se presentaron algunas de estas experiencias, sin embargo, no se evidencia un seguimiento respecto de la implementación de las estrategias que se definen en dichos instrumentos. No existen ejercicios de esta naturaleza que específicamente se hayan realizado en la cuenca del Salar de Atacama pese a la gran cantidad de estudios e informes de caracterización de base que se han desarrollado.

[35] Pese a existir la infraestructura de canales estas Asociaciones de Regantes no corresponden formalmente a Asociaciones de Canalistas sino que Comunidades de Agua (DGA-LAT, 2018).
[36] Como se presentaba en el acápite anterior prácticamente la mitad de los derechos de aguas en la cuenca corresponden a derechos subterráneos.

Dentro de los aspectos institucionales relevantes para la gestión hídrica es importante destacar el gran número de comunidades indígenas presentes en la cuenca. Por una parte, desde el punto de vista de organización institucional es relevante observar el grado de coordinación que tienen estas comunidades por ejemplo al alero del Consejo de Pueblos Atacameños CPA. Por otra parte, la gestión hídrica en la cuenca se cruza con algunos factores que han limitado en cierta forma el el desarrollo de iniciativas en las comunidades indígenas de Atacama La Grande. De acuerdo con lo descrito por CONADI (2014) algunos de estos factores serían los siguientes:

- Temas de alta demanda (e.g., Tierras, Territorio, y Aguas) aún no han podido ser satisfechos por completo, generando con ello, una relación entre las Comunidades-Gobierno que no ha estado exenta de enfrentar complejidades, provocando una desaceleración en la instalación de nuevas iniciativas que provengan de los servicios públicos.
- Se requiere de una política de Estado que asegure continuidad en los procesos.
- Se requiere mayor fortalecimiento en el seguimiento a las planificaciones y acuerdos.
- La falta de liderazgo en algunas comisiones, (Social y Tierras-Aguas), producen cierta desmotivación en los asistentes, afectando la toma de decisiones y agilidad de las mismas.

Esta escasa coordinación tanto dentro de las comunidades como a un nivel intersectorial entre los usuarios del recurso hídrico, hacia la actividad minera en general y el desconocimiento del sistema regulatorio, explican la inexistencia de organizaciones de usuarios de segundo nivel en la cuenca, como Asociaciones de Canalistas o Juntas de Vigilancia (Arcadis, 2016).

En concreto, las principales limitantes detectadas para la generación del Plan Estratégico para la Gestión de los Recursos Hídricos a nivel institucional incluyen (Arcadis, 2016):

- Limitada capacidad de la institución central (DGA), en términos de recursos económicos y humanos.
- Limitada coordinación intersectorial de los usuarios, en términos de la capacidad de los sectores de dialogar.
- Limitados mecanismos de comunicación, coordinación y sistemas de información entre las instituciones.

En cuanto a los derechos de aguas sobre el Río San Pedro, se conforma una Comunidad de Aguas entre la comunidad Atacameña de Río Grande y la Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores de San Pedro de Atacama; Explora S.A.; Tulor S.A.; doña Ana María Barón Parra; y don Juan Francisco D'Etigny Lira. Su administración queda a cargo de la Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores de San Pedro de Atacama (la cual agrupa a los regantes del Río San Pedro). Esta es una Asociación Indígena de conformidad a la Ley 19.253, que, si bien no es una Organización de Usuarios de Aguas en sí misma, es la organización que actúa como tal y que por sus estatutos tiene la función de la captación y distribución de las aguas del Río San Pedro de Atacama (CNR, 2014).

Con respecto a la gestión de los derechos de aprovechamiento agua es importante destacar las distintas restricciones que existen respecto de la solicitud de nuevos de derechos y limitaciones respecto del ejercicio de los derechos en uso en la cuenca del Salar de Atacama. En la Figura II-86 se presenta el cruce de estos distintos instrumentos que emanan de las potestades que el Código de Aguas confiere a la DGA para proteger a usuarios presentes y otros objetos de protección y conservación como son los Parques Nacionales por ejemplo. En particular, el territorio presenta zonas de agotamiento, zonas de restricción y prohibición, vegas y bofedales, y acuíferos protegidos, sitios RAMSAR y Reservas Nacionales.

Se observa que existen partes importantes de la cuenca que tiene algún tipo de protección frente a la extracción de recursos hídricos. A estas restricciones se agregan aquellas asociadas a las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA) que de acuerdo con el sistema de operación del SEA pueden ejercer restricciones adicionales al uso de un derecho de aprovechamiento de agua.

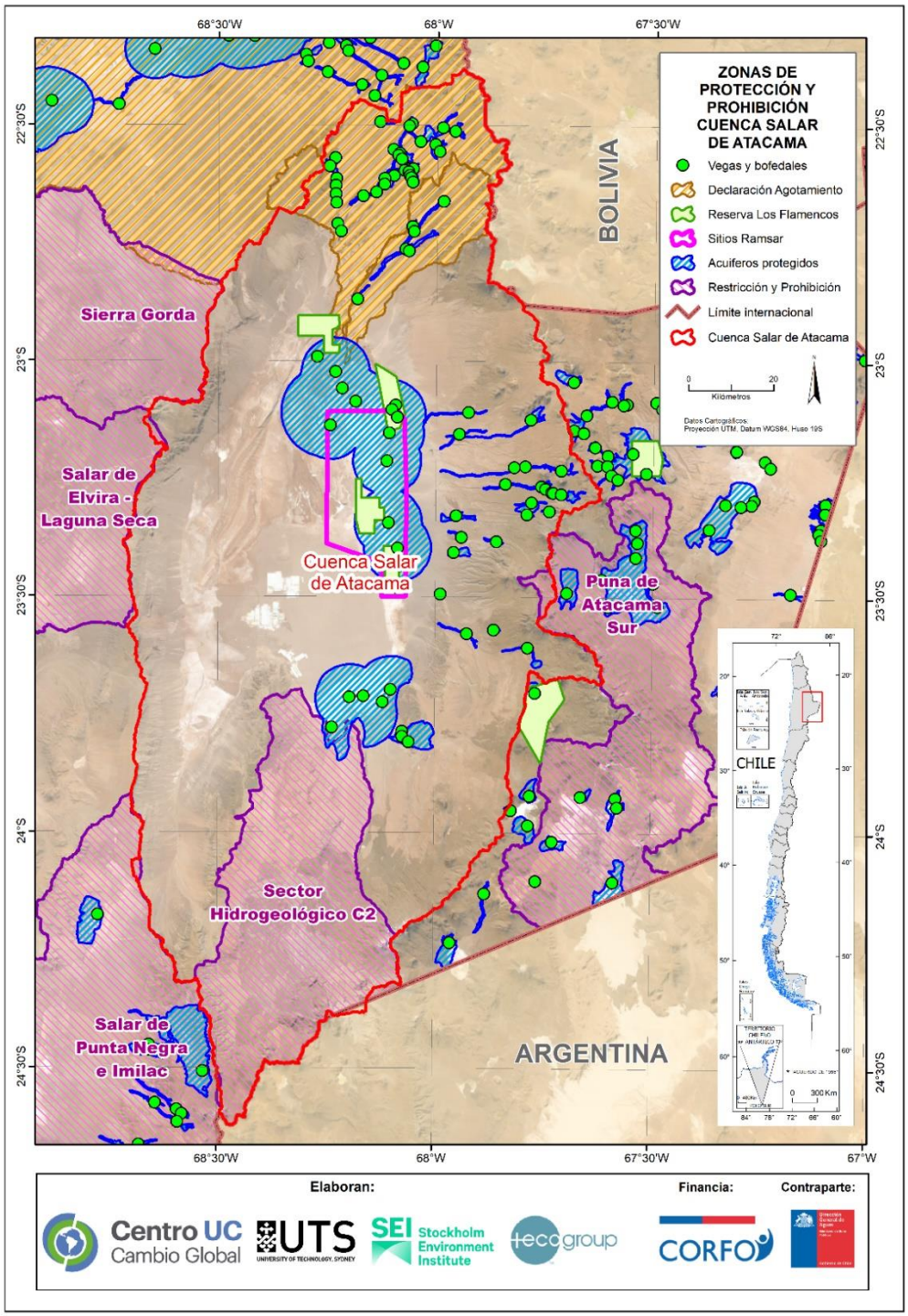


Figura II-86: Intersección de distintos instrumentos que restringen el otorgamiento de nuevos derechos o el ejercicio de derechos existentes.
Fuente: Elaboración propia.

Respecto de otros instrumentos de gestión de recursos naturales en la Etapa I se presentó una lista de sitios de protección de distinta naturaleza como Reservas Nacionales, Santuarios de la Naturaleza y Sitios Prioritarios para la Conservación de la Biodiversidad. Tal

como se puede apreciar en la Figura II-87 existen también traslapes entre estos y otros instrumentos de gestión complementarios para la protección de los pueblos originarios (ADI Atacama La Grande) y de las Zonas de Interés Turístico (ZOIT).

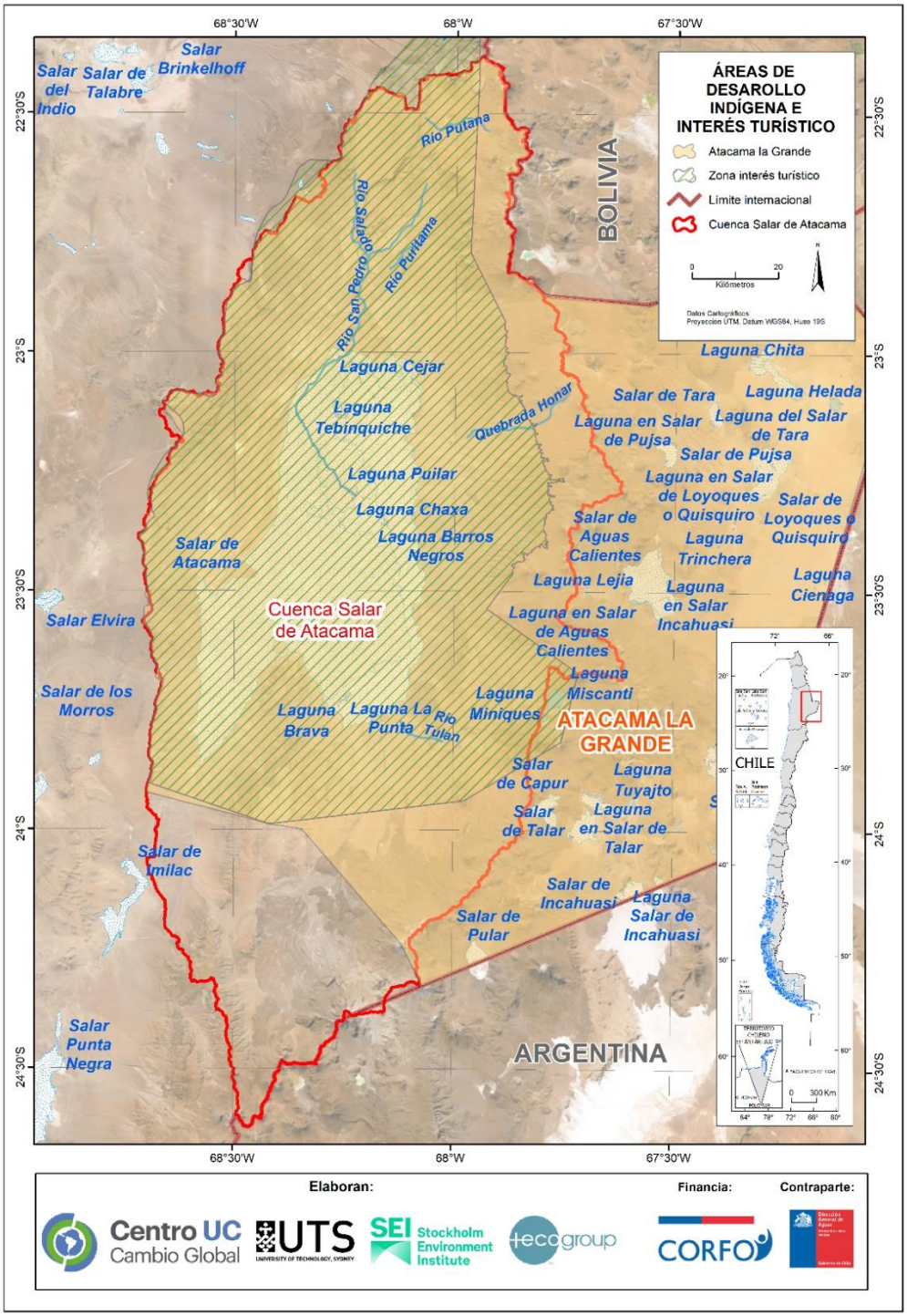


Figura II-87: Intersección entre el polígono de la ADI Atacama La Grande y la ZOIT de la cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración propia

La gestión de los recursos hídricos (y los sistemas/sectores que los generan o dependen de ellos) tiene que estar basada en información que permita entender el funcionamiento de los sistemas hídricos y permita lograr un correcto seguimiento de las normas, incentivos y restricciones que se hayan definido en el sistema de gobernanza de una cuenca. Esta información se debe construir primero a través de un monitoreo de las distintas variables relevantes. En la Etapa I se entregaron detalles respecto de los distintos sistemas de monitoreo en ejercicio en la cuenca del Salar de Atacama. Este análisis tomó en cuenta tanto los monitoreos que lleva a cabo el Estado a través de distintos servicios públicos como también los distintos usuarios del agua que llevan a cabo monitoreos de manera independiente.

Pese a que existen deficiencias ya sea por extensión espacial y temática, o largo de la data (ver Etapa I), la red de monitoreo de factores físicos y bióticos es relativamente extensa en la cuenca, especialmente en las zonas más cercanas al Salar de Atacama. La presencia de monitoreos de empresas privadas (especialmente mineras) contribuye de manera importante a la extensión espacial y temática de estos monitoreos, sin embargo, estos monitoreos surgen típicamente de manera independiente por parte de los titulares de proyectos de inversión, y responden a una RCA de proyectos que han tenido evaluación ambiental y no obedecen a un diseño planificado que integre a los titulares en una red de monitoreo conjunta con el Estado para el monitoreo coordinado en la cuenca. Un aspecto importante que relaciona estos monitoreos con la gestión de los recursos hídricos está asociado a los Planes de Alerta Temprana (PAT) que fueron descritos en la Etapa I.

II.7 Conclusiones

En el presente capítulo se presentan las principales conclusiones obtenidas a partir del diagnóstico desarrollado de la Etapa II del proyecto "Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama". Este diagnóstico se ha concentrado en los componentes claves que permiten definir el marco conceptual para el desarrollo de un modelo integrado de la gestión hídrica de la cuenca del Salar de Atacama. Esto incluye por una parte un diagnóstico de los análisis que se han realizado de los balances de entradas y salidas de agua de los sistemas superficiales y subterráneos, consumos y necesidades de recursos hídricos asociados a la población, actividades productivas y ecosistemas acuáticos, y la proyección de estos consumos y necesidades, como asimismo, la disponibilidad de recursos hídricos por efecto del cambio climático hacia el futuro.

Respecto al balance hídrico superficial y subterráneo de la cuenca del Salar de Atacama, antecedentes indican que el equilibrio hídrico natural de este sistema se ha visto influenciado producto del uso antrópico de los recursos.

Respecto de los consumos de recursos hídricos, se han presentado las características principales de estos consumos que permiten relacionar los volúmenes consumidos con factores condicionantes, como son la utilización de agua potable por población y la superficie cultivada en la agricultura. En el caso de las extracciones de agua para actividades mineras, se distinguen las diferencias entre la minería metálica (cuyas operaciones se ubican fuera de los límites de la cuenca pero que igualmente tiene extracciones de agua fresca al interior de la cuenca) y la minería no metálica que extrae tanto agua fresca como salmuera para actividades que se desarrollan al interior de la cuenca.

Estos análisis permiten también desarrollar proyecciones de consumo de recursos hídricos en el futuro, que se complementan con proyecciones en condiciones climáticas que permite generar pronósticos de oferta de recursos hídricos en el futuro. Respecto de las proyecciones de cambio climático, se puede evidenciar de que, a diferencia de otras zonas del país, no es tan evidentes una proyección hacia la reducción en los niveles de precipitación existiendo una alta incertidumbre al respecto. Sin embargo, los escenarios y tendencias de temperaturas si muestran un alza importante que puede afectar los procesos de evaporación en la cuenca que son determinantes también en los balances y condición de la vegetación.

A nivel de la minería metálica, las proyecciones de consumo vienen principalmente determinadas por el posible cese de las extracciones de agua fresca por parte de MEL en la zona sur, lo que implicaría una fuerte disminución de las extracciones a nivel de la cuenca. Por otro lado, el consumo de salmuera y agua fresca asociado a la minería no metálica está actualmente en una fase de definiciones, teniendo presente que podrían aumentar las extracciones dad la potencial entrada de nuevos proyectos en el salar que se encuentran en proceso de evaluación ambiental (proyecto "Planta de Producción de Sales de Potasio, SLM NX Uno de Peine") o podrían mantenerse o disminuir (en el evento que

dichos proyectos no sean aprobados). Situación que podría extenderse más allá del año 2030 o 2043 cuando se tenga certeza de qué ocurrirá una vez que terminen las operaciones de SQM y Albemarle.

A nivel poblacional, las proyecciones desarrolladas a partir de datos del INE muestran una estabilización (i.e., tasas decrecientes) hacia el año 2035, a partir del cual la tendencia se extrapola linealmente de manera decreciente hasta el 2065. Aunque claramente el consumo aumentará producto de este aumento poblacional, el consumo variará solo en un 17% entre el 2020 y el 2065. A nivel turístico, en cambio, la incertidumbre en relación al posible desarrollo (crecimiento o decrecimiento) de esta actividad llevan a generar dos escenarios (optimista y pesimista). En ambos, la presión sobre el recurso hídrico aumenta como parte del consumo de agua potable por la población flotante. Este crecimiento es importante en ambos escenarios, aunque genera un menor impacto en comparación a la demanda poblacional.

Finalmente se entrega un diagnóstico de otros componentes relevantes para la gestión de recursos hídricos como son las coordinaciones a nivel de usuarios y de servicios públicos que son relevantes para la gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Salar de Atacama.

Se incluyen también diagnósticos asociados a instrumentos de gestión de derechos de agua y de los sistemas de monitoreo como herramientas de apoyo a la gestión hídrica.

Este diagnóstico sirve de base para el desarrollo del modelo integrado de gestión hídrica que se elaborará en la Etapa III de este proyecto.

Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama

Etapa III: Formulación y ejecución

III.1 Resumen ejecutivo

En el contexto de interacciones entre los múltiples actores involucrados en la Cuenca del Salar de Atacama con el medio biótico, y su dependencia con el recurso hídrico de la cuenca, surge la necesidad desarrollar un modelo integrado de gestión hídrica (herramienta de análisis integrado), que permita facilitar y reducir la incertidumbre en la toma de decisiones en la administración del recurso hídrico en la Cuenca del Salar de Atacama. En este contexto se ha formulado el Convenio de Colaboración CORFO– DGA, el que contempla el desarrollo de dicha herramienta, la que debe incorporar aspectos de diversa naturaleza, como biofísicos, económicos, sociales, tecnológicos, administrativos e institucionales, en el marco de una visión de desarrollo para el país y la política de recursos hídricos impulsada por la DGA.

En el marco de este Convenio de Colaboración CORFO-DGA, CORFO desarrolló el proyecto **Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama**, como herramienta numérica, de soporte para la administración del recurso hídrico en la Cuenca del Salar de Atacama por parte del organismo competente. Este proyecto se estructura en base a 3 Etapas: Etapa I: Levantamiento de información de base; Etapa II: Diagnóstico y Etapa III: Formulación y ejecución.

En esta Etapa III se presentan los resultados de la formulación del estudio, en el cual se desarrolló una herramienta de modelación integrada a nivel de hidrología superficial y subterránea, y un modelo conceptual de como este tipo de herramientas de base física pueden además acoplarse con modelos que representan la toma de decisiones de actores usuarios de los recursos hídricos y la institucionalidad asociada a la gestión de los mismos. Este modelo integrado busca representar de la mejor manera posible la hidrología superficial y subterránea de la cuenca, la integración de las unidades hidrogeológicas y sus propiedades, los fenómenos relevantes del balance hídrico y la interacción entre los fluidos de distinta densidad, sin embargo, se debe considerar como una herramienta que simplifica un modelo conceptual. Además, la modelación de sistemas hidrológicos e hidrogeológicos a escala de cuenca conlleva una incertidumbre asociada principalmente a: 1) la información disponible para la construcción del modelo y 2) las simplificaciones adoptadas para la modelación. Por lo tanto, se debe considerar lo anterior al momento de levantar conclusiones a escalas espaciales locales. Para disminuir la incertidumbre del modelo, este se debe complementar y actualizar con nueva información meteorológica, hidrológica, geológica, geofísica, hidrogeológica e hidroquímica que sea recopilada en futuros estudios.

El modelo de hidrología superficial y subterránea (WEAP-MODFLOW) fue construido con herramientas que logran explicar los distintos datos medidos en la cuenca, pero no dejan de ser una simplificación de un modelo conceptual. Entre las simplificaciones más importantes se encuentran: 1) la limitada resolución espacial para la caracterización de coberturas y uso de suelos, 2) la limitada representación de ecosistemas sensibles, 3) la resolución espacial de la grilla del modelo tridimensional de flujo y 4) la definición de niveles

equivalentes de salmuera (densidad constante) para la modelación de flujo subterráneo, cuando en realidad el sistema posee densidad variable. Estas simplificaciones deben tenerse en cuenta el utilizar la herramienta y esta debe ser considerada para simular procesos a una escala regional, en términos de tendencias generales para los caudales y niveles piezométricos simulados. De este modo, los niveles resultantes corresponden a aproximaciones por lo que no deben ser utilizados para responder preguntas a escala local ni con precisión centimétrica, en específico esta herramienta no aborda el detalle de la implementación operacional de umbrales de activación (a nivel centimétrico) de Planes de Contingencia (PC) o Planes de Alerta Temprana (PAT).

Respecto a los modelos de flujo con densidad variable (perfiles SEAWAT), estos corresponden a una simplificación bidimensional de un funcionamiento tridimensional, cuyos resultados deben tomarse de modo referencial. Adicionalmente, el código utilizado permite la representación de la curva de evapotranspiración como un único segmento y no se incorporó la simulación de procesos de precipitación/disolución (transporte reactivo). Estos perfiles permiten evaluar, de forma general, tendencias en los niveles, concentraciones y desplazamientos de la interfaz salina simulados. De este modo, estos valores no deben ser utilizados para evaluar efectos específicos en los sistemas de protección ambiental o sistemas lagunares (funcionamiento de los sistemas lagunares, el cual es tridimensional y obedece a una relación con cuerpos de agua superficiales y subterráneos, cambios en la ubicación de las lagunas, desaparición de estas, entre otros), los cuales requieren de herramientas más complejas y construidas para ello.

A través de los resultados obtenidos, y considerando sus limitaciones, se sugiere el uso del modelo WEAP-MODFLOW acoplado como herramienta de base para el desarrollo del PEGH de la cuenca del Salar de Atacama. Se sugiere por otra parte representar la dinámica de la interfaz salina en perfiles bidimensionales representados por el modelo SEAWAT de acuerdo a lo desarrollado en el trabajo de CORFO-Amphos21 (2021).

También se presenta en esta Etapa la potencialidad de acoplar a un modelo de base física, módulos explícitos que representen decisiones que toman actores en función de variables biofísicas que pueden observar (monitorear) en una cuenca. En específico se ha implementado un modelo conceptual piloto en base a agentes, que contiene un módulo físico que representa de manera simplificada los flujos de agua a nivel subterráneo en una cuenca endorreica, y un modelo social que representa el proceso de toma de decisiones asociado a la institucionalidad ambiental existente en Chile. Este es uno de los distintos procesos de toma de decisiones que pueden ser incorporados en un modelo de agentes para una cuenca como la del Salar de Atacama. Los otros procesos identificados, corresponden a decisiones que podrían ser tomadas por distintos usuarios del agua (ej. empresas mineras, regantes) y otros aspectos de la institucionalidad relevante, como por ejemplo, aquellos asociados a la asignación y fiscalización de derechos de agua. El modelo conceptual simplificado muestra como la toma de decisiones se relaciona con la observación de variables biofísicas y cómo estos cambios en las decisiones pueden influenciar a su vez, el estado de estas variables biofísicas.

Se sugiere seguir desarrollando este tipo de herramientas como los modelos de agentes

para los futuros desarrollos de los PEGH, que realiza la DGA. De esta manera se puede interactuar con distintos actores para poder incorporar sus percepciones respecto del proceso de toma de decisiones, y por otra parte acoplar los módulos sociales con la versión finalizada del modelo físico integrado.

III.2 Introducción

En esta Etapa se muestran los resultados del proyecto, considerando el desarrollo del modelo hidrológico superficial, los ajustes y posterior acople del modelo hidrogeológico, incluida la modelación de las condiciones de densidad variable del agua que existen en la interacción entre agua dulce y salmuera, y la construcción del modelo de agentes en su versión de modelo conceptual.

Esta Etapa consta de 7 secciones después de esta introducción. La primera sección presenta de manera sintética los antecedentes y la estrategia que se utiliza para el trabajo de desarrollo de modelos. Las siguientes secciones describen la metodología seguida y los resultados obtenidos asociados a cada uno de los modelos desarrollados. Dentro de los resultados se describe el modelo que se logra implementar. Estas secciones se complementan con una sección específica que presenta las bases para el desarrollo del PEGH que desarrolla la DGA. Finalmente, se presentan recomendaciones respecto de nueva información y del desarrollo de modelos complementarios que sirvan para resolver las limitaciones y desafíos detectados en este estudio.

III.3 Antecedentes considerados y estrategia de modelación

Los antecedentes utilizados para la elaboración de este informe corresponden a la información recopilada en la Etapa I de este proyecto, y que se utilizó en el diagnóstico de los distintos componentes del sistema hídrico de la cuenca del Salar de Atacama (Etapa II). Adicionalmente, se incorpora como antecedente el modelo hidrológico conceptual y el modelo hidrogeológico numérico desarrollado por Amphos para CORFO (CORFO-Amphos21, 2021), el cual fue utilizado para desarrollar un modelo con la información más actualizada a la fecha de ejecución de esta Etapa. Estos antecedentes sirven para la caracterización y posterior representación de la disponibilidad (precipitación, caudales y escorrentía, acuífero), y necesidad hídrica (vegetación, cultivos, población y actividades económicas).

El agua fresca y la salmuera son fluidos de distinta composición y densidad, los cuales pueden ser diferenciados en función de los sólidos disueltos totales (SDT) o su conductividad eléctrica. Sin embargo, si bien el agua y la salmuera presentan diferentes grados de conexión hidráulica entre las unidades hidrogeológicas que los almacenan, estos dos fluidos coexisten de forma estrecha en la cuenca mediante el constante reequilibrio de la interfaz o cuña salina que los divide, por lo que el sistema subterráneo debe ser tratado de forma integrada. Debido a esto, se considera un modelo tridimensional de flujo a escala regional, adaptado para representar de mejor manera los flujos en la zona de la interfaz salina, y una modelación de flujo con densidad variable a escala local.

La construcción de los modelos de base física se ha desarrollado teniendo como base el modelo hidrológico conceptual y el modelo hidrogeológico numérico desarrollado por

Amphos21 para CORFO (CORFO-Amphos21, 2021)[37]. Sobre esta base se construye un modelo hidrológico superficial que cubre toda la superficie de la cuenca y que se conecta con el modelo numérico de flujos de agua subterránea. El modelo conceptual ha servido para representar los procesos básicos del sistema hidrológico superficial en toda la cuenca del Salar de Atacama representados por el modelo WEAP. Por otra parte, el modelo hidrogeológico numérico desarrollado por Amphos21 es la base sobre la cual se construye una versión actualizada del modelo hidrogeológico (en base a MODFLOW) del acuífero del salar que posteriormente se acopla con el modelo. Finalmente, al igual que en CORFO-Amphos21 (2021), el modelo SEAWAT aplicado en 3 perfiles bidimensionales, ubicados en la zona marginal sur del salar, se utiliza para la representación de las condiciones de densidad variable presentes en la interacción entre agua fresca y salmuera en esta cuenca, junto con un piloto que represente estas condiciones de densidad variable a escala de cuenca.

La estrategia de modelación considerada para la construcción de la hidrología superficial y subterránea en la cuenca del Salar de Atacama toma en cuenta los componentes naturales y antrópicos del balance hídrico en una cuenca endorreica con estas características. Adicionalmente se consideran las experiencias de modelación previa, en particular el modelo hidrogeológico numérico desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021), para definir los dominios de modelación de cada herramienta considerada. Se representa de esta manera la cuenca del Salar de Atacama a través de 3 modelos interconectados cuyas características y condiciones de acople se presentan a continuación:

- **Modelo hidrogeológico numérico de la zona del Salar y Monturaqui (Modelo Salar-Monturaqui subterráneo):** este modelo corresponde al modelo hidrogeológico numérico desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021), desarrollado en la plataforma MODFLOW, para las zonas del Salar de Atacama (y borde inicial de desarrollo de zona aluvional en cuencas laterales) y la zona de Monturaqui. En este modelo coexiste un sistema de aguas subterráneas con distintos niveles de salinidad (densidad). Las zonas con menor nivel de salinidad se encuentran en los bordes este, norte y sur conectadas con las cuencas laterales desde los cuales recibe aportes como recargas a nivel subterráneo o superficial. Adicionalmente existe una recarga a nivel superficial que se genera en toda la extensión del modelo. Hacia el centro del salar se encuentra la zona del núcleo con altos niveles de salinidad (salmuera). Existen extracciones de agua fresca y salmuera de manera antrópica, extracciones para satisfacer necesidades de la vegetación (evapotranspiración), que puede acceder a la napa (determinadas en el modelo Salar-Monturaqui superficial), y evaporación que ocurre de manera directa desde el acuífero dependiendo de la profundidad del nivel freático.

- **Modelo hidrológico superficial numérico de la zona del Salar y Monturaqui (Modelo Salar-Monturaqui superficial):** en la zona del Salar de Atacama y la zona de

[37] Es importante mencionar que durante el desarrollo de estas herramientas se sostuvieron 4 reuniones de trabajo con la consultora Amphos21 para asegurar que el desarrollo metodológico y resultados obtenidos fueran consistentes con el trabajo realizado en CORFO-Amphos21 (2021).

Monturaqui donde se desarrolla el acuífero central de la cuenca (y en cuyo dominio se ha desarrollado el modelo hidrogeológico numérico) se construye un modelo de hidrología superficial que recibe precipitación que sirve para aportar las necesidades de evapotranspiración de la cobertura de suelo y aportar a las recargas directas al acuífero que se representa en el modelo Salar-Monturaqui subterráneo. En esta zona la vegetación con mayor desarrollo radicular puede acceder a la zona saturada (acuífero) si el largo de raíces supera la profundidad de la napa freática.

- **Modelo hidrológico de las cuencas laterales (Modelo lateral)**: este modelo está compuesto de un subsistema superficial que al recibir precipitación en exceso produce escorrentía en laderas, y caudales en ríos y quebradas. Estos caudales son aprovechados a través de extracciones para satisfacer necesidades de agua potable y de riego principalmente. Dependiendo de la temperatura del evento de precipitación, en las zonas más altas de la cuenca esta precipitación puede acumularse de manera sólida y conformar un manto nival que puede posteriormente derretirse, y aportar con escorrentía y caudal. El agua proveniente de la precipitación que se infiltra en el suelo puede en parte aportar a las necesidades de evapotranspiración (dependientes del tipo de cobertura y de las condiciones climáticas) y en parte percolar para conectarse con subsistemas de aguas subterráneos que están, a nivel de subcuenca, conectados entre sí y con los cauces de agua cercanos. De esta manera se representan también los procesos de afloramiento e infiltración que son relevantes en este tipo de cuencas. El agua que escurre superficialmente y el flujo subterráneo pasan a ser aportes de recarga al acuífero subterráneo del modelo Salar-Monturaqui.

- **Modelo de flujo con densidad variable (Modelo de Densidad Variable)**: este modelo considera 3 perfiles bidimensionales ubicados en la zona marginal de la cuenca del Salar de Atacama que, al recibir la infiltración proveniente del modelo Salar-Monturaqui superficial y a partir de los niveles calculados del modelo Salar-Monturaqui subterráneo, permite representar la distribución espacial de la concentración de solutos en el sector Peine, Quelana y La Punta La Brava. Estos perfiles permiten entender el comportamiento de la interfaz entre la salmuera y agua fresca, además de la distribución de la zona de mezcla.

La
Figura III-1 presenta los limites espaciales de los dominios de los modelos desarrollados. La Figura III-2 por otra parte presenta la conexión entre los distintos modelos de flujo desarrollados. Se incluye mención a algunas reglas que se han definido para establecer los acoples entre los modelos. La Figura III-3 muestra las principales conexiones entre los modelos que componen el modelo de base física, incluyendo los modelos de flujo y el modelo de densidad variable. Finalmente, la Figura III-4 representa los flujos que son considerados en los balances de cada uno de los sistemas representados en estos modelos. Se simplifican algunos elementos en este esquema como por ejemplo el proceso de acumulación y derretimiento de nieve y las extracciones de agua superficiales. Detalles respecto de estas conexiones se describen en los Capítulos III.4, III.5 y III.6 de la presente Etapa.

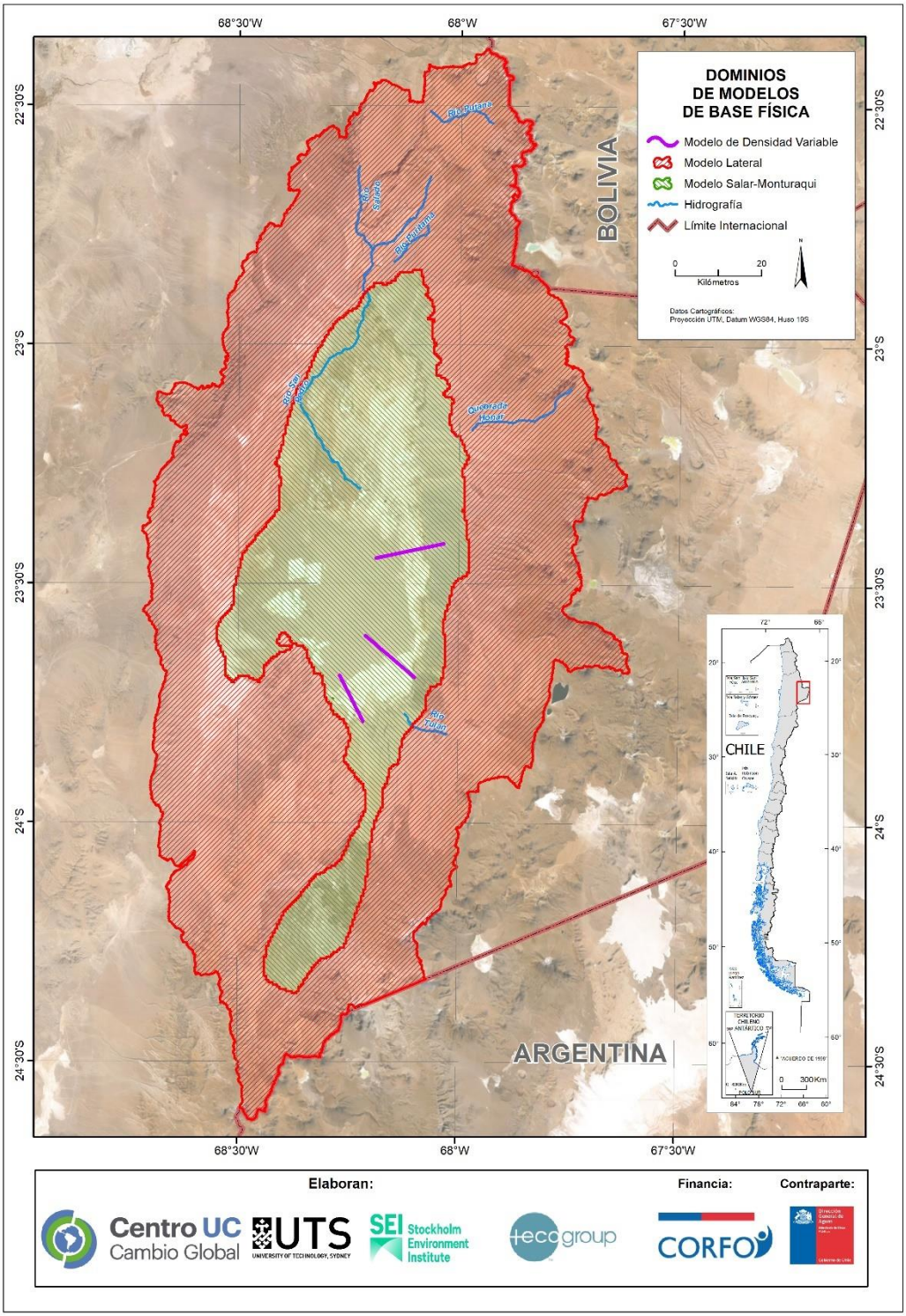


Figura III-1: Dominio espacial de los modelos desarrollados: Modelo Salar-Monturaqui, Modelo Lateral y Modelo de Densidad Variable.
Fuente: Elaboración propia a partir de CORFO-Amphos21 (2021) y DGA-CIREN (2014).

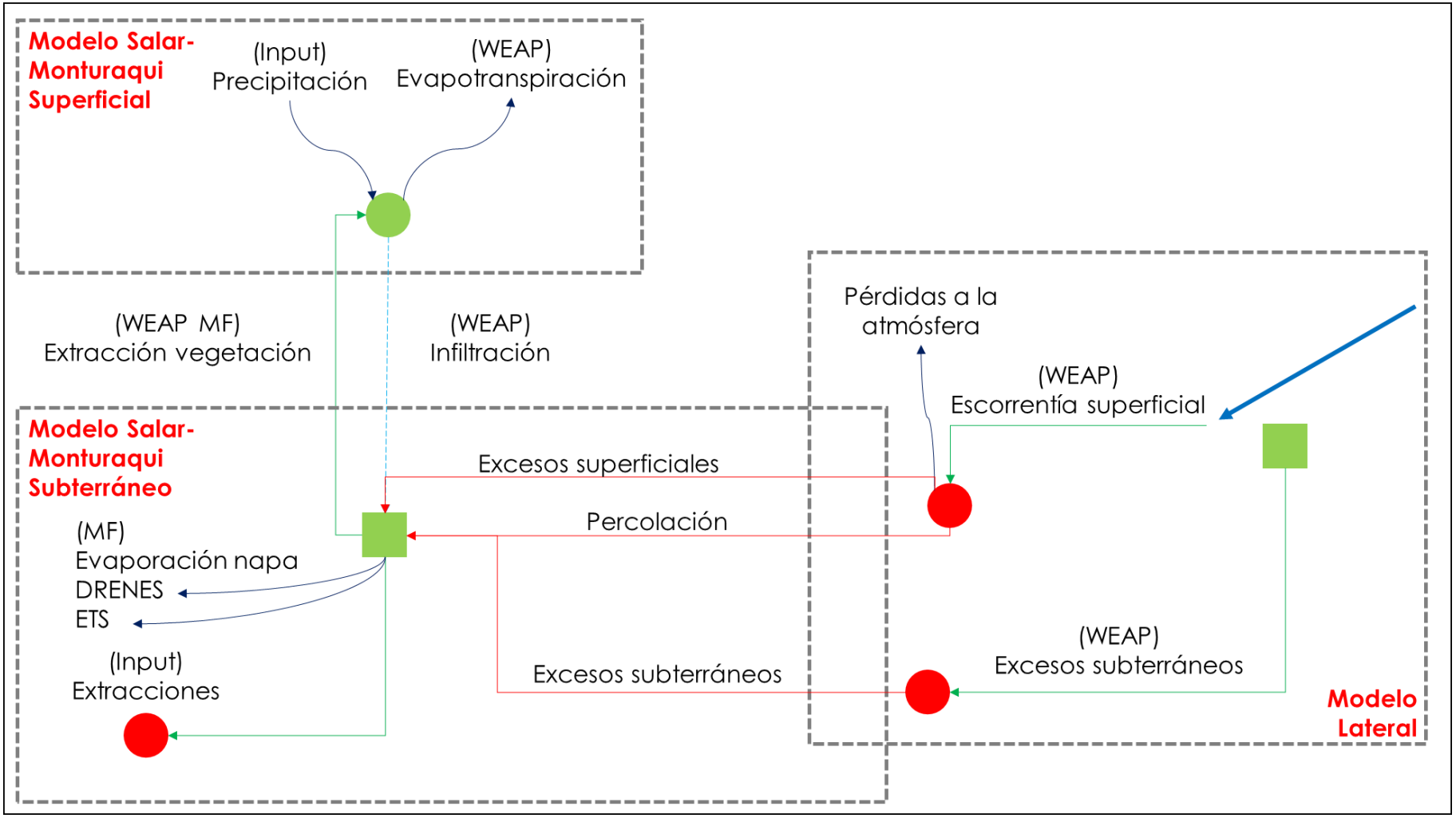


Figura III-2: Esquema de las conexiones entre las zonas superficiales y subterráneas del modelo Salar-Monturaqui (Modelo SM) y el modelo lateral.
Nota: La esquematización se simplificó para mostrar los nodos finales que conectan con sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui. Las flechas verdes son enlaces de transmisión, las líneas discontinuas celestes son enlaces de infiltración y las líneas rojas son flujos de retorno. Los nodos cuadrados verdes son nodos de aguas subterráneas, los círculos verdes son unidades de modelación hidrológica y los círculos rojos son sitios de demanda. Los términos entre paréntesis representan si el flujo es una entrada al modelo integrado (Input), es calculado por WEAP (WEAP), es calculado por MODFLOW (MF) o es calculado simultáneamente por WEAP y MODFLOW (WEAP MF).
Fuente: Elaboración propia.

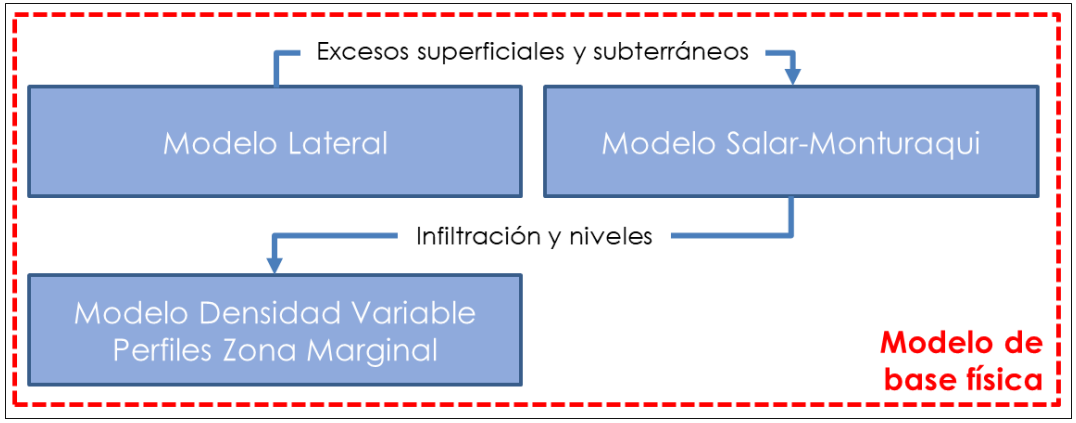


Figura III-3: Esquema de las conexiones entre los distintos modelos que componen el modelo de base física.
Nota: El Modelo Lateral corresponde al modelo hidrológico de cuencas laterales, desarrollado en WEAP, que entrega los excesos superficiales y subterráneos al Modelo Salar-Monturaqui, donde se acopla de forma dinámica el modelo WEAP-MODFLOW. El modelo de Densidad Variable responde a los niveles calculados en el Modelo Salar-Monturaqui subterráneo y a la infiltración calculada del Modelo Salar-Monturaqui superficial.
Fuente: Elaboración propia.

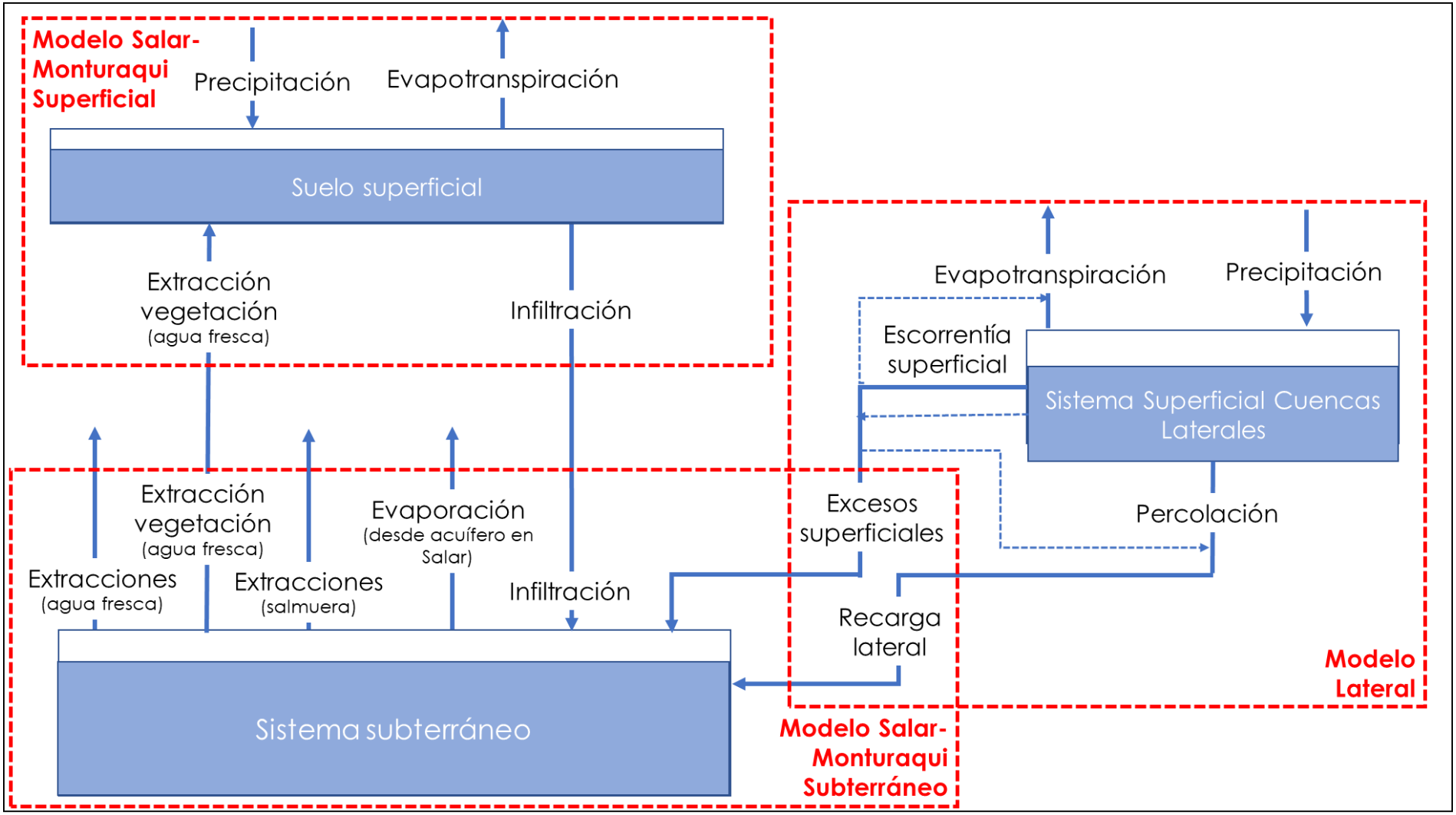


Figura III-4: Conceptualización de flujos relevantes y balances hidrológicos de los modelos desarrollados para la cuenca del Salar de Atacama.
Nota: La recarga lateral corresponde a la totalidad de flujos subterráneos entrantes al modelo Salar-Monturaqui desde el modelo Lateral y la recarga directa corresponde a la totalidad de flujos superficiales entrantes al modelo Salar-Monturaqui subterráneo, considerando los excesos superficiales del modelo lateral y la infiltración del modelo Salar-Monturaqui superficial.
Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, el diseño conceptual del modelo de agentes (ABM por sus siglas en inglés) representa de manera simplificada una innovadora herramienta que permite acoplar los sistemas físicos y humanos, y estudiar por ejemplo sistemas hipotéticos, como nuevas alternativos de gobernanza para la gestión de los recursos hídricos, la salmuera, el medio ambiente y el patrimonio cultural. Este modelo prototipo se basa en una versión simplificada de un sistema físico que representa una cuenca endorreica acoplado a un sistema social que representa principalmente la operación de la institucionalidad ambiental en la cuenca del Salar de Atacama y que se ha construido tomando como base los resultados de una serie de talleres que se han realizado con expertos (representantes del sector publico, la academia y consultores), en distintas temáticas relacionados con el sistema hídrico de la cuenca.

La base para el desarrollo de este prototipo de modelo de agentes está asociada a 4 talleres (denominados de conceptualización y de validación) en el que participaron expertos, representantes del sector público y la academia, cercanos a distintas disciplinas y temáticas relevantes para la gestión de los recursos hídricos y la salmuera en la cuenca del Salar de Atacama (ciencias naturales, ambientales, geociencias, ciencias de la sociología, ciencias económicas e ingeniería, entre otros). La información recopilada en estos talleres se complementa con la información recopilada y analizada en la etapa de diagnóstico de este proyecto. Cabe hacer presente que los talleres de interacción con las empresas, comunidades locales, usuarios y otros actores, podrían ser desarrollados en el marco de la construcción del PEGH que se encuentra actualmente en curso.

Considerando lo descrito en esta sección, los modelos de base física desarrollados consideran la misma extensión y zonificación de los dominios definidos por CORFOo-Amphos21(2021), además de utilizar el mismo modelo hidrogeológico numérico de base. Adicionalmente, los modelos desarrollados fueron calibrados en base a los valores resultantes por CORFO-Amphos21 (2021) para ser consistentes en ordenes de magnitud en precipitaciones, recargas y balances. Sin embargo, respecto al trabajo de CORFO-Amhpos21 (2021), los modelos de base física desarrollados en este proyecto, incorporan una modelación hidrológica superficial explícita que se extiende a lo largo de toda la cuenca del Salar de Atacama y que responde a forzantes climáticas y antrópicas. De este modo, el modelo aumenta su complejidad producto que los flujos generados no corresponden a series con estacionalidad impuesta, sino que la estacionalidad está dada por las series climáticas. Debido a esta diferencia, se hace necesario un reajuste de parámetros hidráulicos del modelo hidrogeológico numérico que recibe los caudales generados en la modelación hidrológica superficial, a modo de hacer compatibles los parámetros con los nuevos programas utilizados, encontrándose estos valores puntuales siempre en el rango de los obtenidos por Amphos 21.

III.4 Modelo hidrológico superficial

III.4.1 Introducción

En el presente capítulo se presenta la metodología y los resultados del desarrollo del modelo hidrológico superficial de la cuenca del Salar de Atacama. En la explicación metodológica se adelantan también algunos elementos relacionados a la conexión con el modelo de aguas subterráneas pero los detalles de esta conexión se explican en el Capítulo III.5.

El modelo hidrológico se desarrolla utilizando como base la herramienta de modelación WEAP (Water Evaluation And Planning System). WEAP es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos, la cual proporciona un marco comprensivo, flexible y de fácil uso para la planificación y análisis de políticas vinculadas a la gestión del agua, permitiendo considerar distintos tipos de usuarios (CCG-UC & SEI, 2009). Una serie de artículos describen el modelo WEAP (Purkey et al., 2008; Yates, Purkey, et al., 2005; Yates, Sieber, et al., 2005) mientras que su página web http://www.weap21.org/ reporta una descripción detallada de sus características, publicaciones asociadas, su integración con otros softwares y otros recursos.

En el siguiente acápite se presenta la metodología general utilizada para la modelación de los componentes de hidrología superficial de la cuenca del Salar de Atacama y su interacción con el ámbito subterráneo, tanto para cuencas laterales como para el área del salar en la base de esta cuenca endorreica. Pese a que la herramienta queda preparada para representar proyecciones climáticas futuras y de extracción de agua fresca por parte de los usuarios en la cuenca, se espera que esas proyecciones se generen en el marco del proceso participativo con actores que lidera la DGA como parte del desarrollo del PEGH para la cuenca.

III.4.2 Metodología

Tomando como input de entrada información climática, WEAP considera la representación de la oferta de agua mediante módulos de cálculo hidrológico de base física, la representación de la demanda de agua mediante un sistema de distribución con distintas prioridades y regímenes de uso, el cálculo de las demandas evapotranspirativas por la vegetación en el área de estudio, entre otras capacidades. Asimismo, posee versatilidad para evaluar diferentes escenarios, ya sean de cambio climático, proyección de cambio de la demanda, condiciones y prácticas de uso, nueva infraestructura, entre otros. Los elementos básicos[38] del programa WEAP que permiten construir el esquema de la modelación (serán introducidos posteriormente con mayor detalle) corresponden a:

- Río o quebrada: elemento que representa el flujo hídrico superficial.
- Canal de riego: estructura que permite extraer desde el río o quebrada un

[38] Acá se entrega un resumen de los elementos utilizados en el modelo y que permitirán entender los esquemas presentados en el Capítulo III.3.3. Para información más detallada de estos elementos y otros procesos consultar en https://www.weap21.org/

determinado flujo para satisfacer demandas hídricas.

- Acuíferos: elemento que representa el flujo hídrico subterráneo.
- Otros suministros: elemento que permite definir entradas hídricas que se puedan encontrar fuera del límite del modelo.
- Sitio de demanda: elemento que permite la obtención de flujo hídrico. En este modelo puede representar el consumo hídrico de una población o un sitio de demanda ficticio (ej. Para representar afloramientos y evaporación desde acuíferos).
- Catchments: punto que representa una superficie determinada y que corresponde a la unidad de modelación. Posee información de uso de suelo, clima, riego y rendimiento, costos y método de modelación.
- Escorrentía/Infiltración: elemento que conecta al catchment con el río/quebrada y el acuífero.
- Link de transmisión: elemento que conecta el flujo superficial y subterráneo con un catchment y/o un sitio de demanda.
- Flujo de retorno: elemento que permite conectar desde el sitio de demanda a un río/quebrada o un acuífero.
- Flujo requerido: elemento que permite extraer un determinado flujo desde el flujo hídrico superficial hacia el canal de riego.

Por otra parte, las etapas básicas para la construcción de un modelo son las siguientes:

- Delimitación de las unidades de modelación y algoritmo utilizado para la modelación hidrológica.
- Construcción de series climáticas que serán utilizadas como forzantes hidrológicos en cada una de las áreas de modelación.
- Caracterización de los usos y extracciones de agua.
- Definición de parámetros y validación de resultados.

A continuación, se definen algunas de las bases metodológicas utilizadas en cada una de estas etapas. Se presentan en algunos casos resultados intermedios que sirven para tener mayor claridad respecto del diseño metodológico. Los resultados finales respecto de la implementación del modelo y los resultados que surgen de su uso se presentan en la sección de resultados.

III.4.2.1 Algoritmo utilizado para la modelación hidrológica y delimitación de las unidades de modelación

Un área de modelación WEAP (típicamente pero no necesariamente una cuenca) comprende una representación discreta de un área espacialmente continua, que incluye los elementos representativos de las subcuencas que la componen. Al interior de esta área de modelación se definen los puntos de interés en la red hidrográfica que a su vez definen subcuencas hidrológicas. Al interior de estas subcuencas se pueden definir zonas (e.g. bandas de elevación) que representen condiciones de clima homogéneas, lo que constituye las unidades de modelación. Estas unidades de modelación (llamados catchments en WEAP, que corresponden a superficies representadas como puntos verdes

en la Figura III-5) representan los distintos componentes del balance hídrico que definen los aportes desde la precipitación al escurrimiento superficial, infiltración, salidas por evapotranspiración de la vegetación, y recarga de acuíferos. La Figura III-5 presenta una representación esquemática de la discretización espacial de las unidades de modelación en WEAP considerando las subcuencas y delimitaciones por bandas de altura teniendo en cuenta unidades climatológicamente homogéneas (CCG-UC & SEI, 2009).

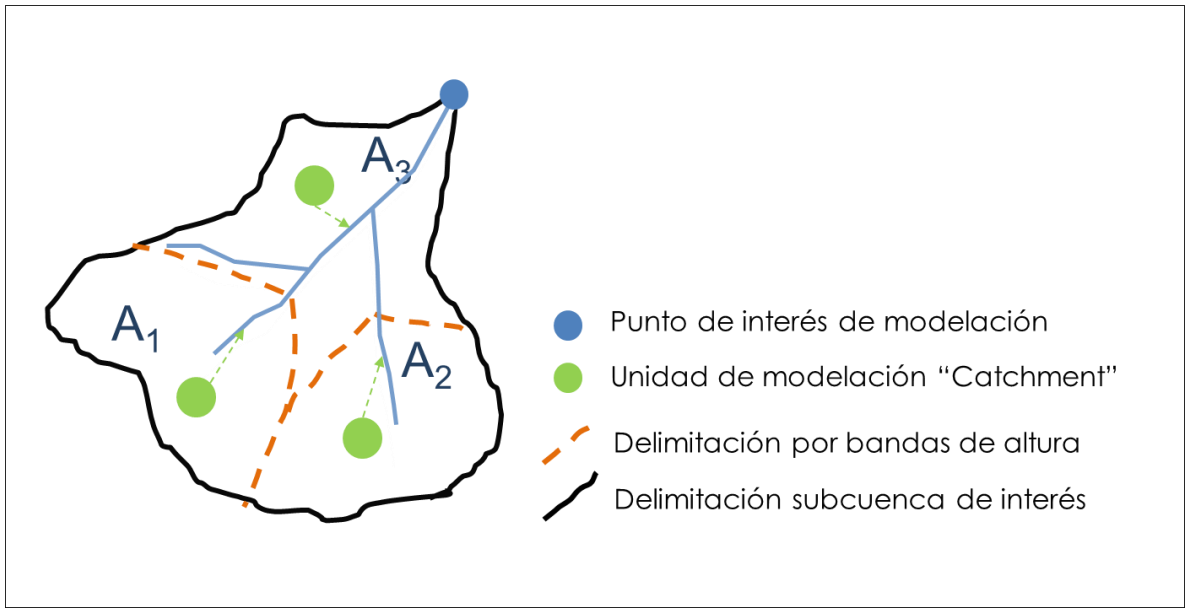


Figura III-5: Representación de las unidades espaciales de modelación en WEAP.
Nota: El catchment representado como un punto en la figura, corresponde a toda la superficie que se encuentra hacia el interior de la línea puntada roja.
Fuente: Elaboración propia.

En términos de la información climática de entrada, un set homogéneo de datos (precipitación, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento) es utilizado en cada uno de estos catchments, las cuales a su vez se encuentra dividida en diferentes tipos de cobertura/uso de suelo. Esta caracterización permite cuantificar, mediante el uso de una conceptualización de doble estanque[39], el balance de agua desde cada tipo de cobertura, según sus características en superficie, así como también considerando la expresión y propiedades del suelo bajo ellas. Así se determinarán los flujos de escorrentía, infiltración, evaporación, flujos de base y percolación a cuerpos acuíferos.

Una vez que se han generado los flujos de agua desde estas unidades hacia cauces y/o cuerpos acuíferos, ésta se distribuye en el mismo paso de tiempo de modelación, donde las restricciones relacionadas con las características de la infraestructura y la red de distribución, las regulaciones ambientales, y a la vez las prioridades y preferencias asignadas

[39] La utilización de doble estanque permite caracterizar en el primer estanque la evapotranspiración, escorrentía, cambios de humedad del suelo y el flujo hacia el estanque más profundo. Este último, corresponde al segundo estanque, el cual permite representar el flujo base y cambios de humedad en el suelo (http://www.weap21.org/webhelp/two-bucket_method.htm).

a diferentes puntos de demanda, son usadas como condiciones de operación de un algoritmo de programación lineal que maximiza la satisfacción de demanda hasta el mayor valor posible.

Tomando en cuenta las consideraciones generales para la construcción de modelos WEAP, y las características específicas de los componentes del ciclo hidrológico en la cuenca del Salar de Atacama, se han tomado las siguientes decisiones estratégicas para la conceptualización de las unidades de modelación para el modelo hidrológico superficial que opera en el sistema de cuencas laterales:

a) Utilizando las capacidades de WEAP para representar la hidrología en condiciones de alta montaña, para aquellas unidades de modelación que se encuentran en bandas de elevación sobre los 5.000 msnm, se utiliza el método de Soil Moisture[40]. Este método se basa en funciones empíricas que describen evapotranspiración, escorrentía superficial y subsuperficial, y percolación profunda para cada uno de los catchments, además de los procesos de acumulación y derretimiento de nieve. Para el caso de la cuenca del Salar de Atacama, el umbral para considerar este método se ha definido en base a imágenes satelitales que muestran la extensión de cobertura nival en la cuenca. Este análisis utilizó imágenes satelitales MODIS[41] con su producto MOD10A1 de cobertura de nieve, mediante el cual se determinaron las áreas con mayor persistencia de nieve. La Figura III-6 destaca aquellas áreas con presencia relevante (mayor a un 30% del tiempo) con presencia de nieve, respecto a bandas de altura definidas para la subcuenca de San Pedro en Cuchabrachi.

[40] Método de modelación hidrológica en WEAP que se basa en funciones empíricas. Para mayor detalle consultar el siguiente enlace: https://www.weap21.org/WebHelp/Two-bucket_Method.htm

[41] MODIS (o Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un instrumento a bordo de los satélites Terra y Aqua. Terra MODIS y Aqua MODIS están viendo toda la superficie de la Tierra cada 1 o 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales o grupos de longitudes de onda. https://modis.gsfc.nasa.gov/

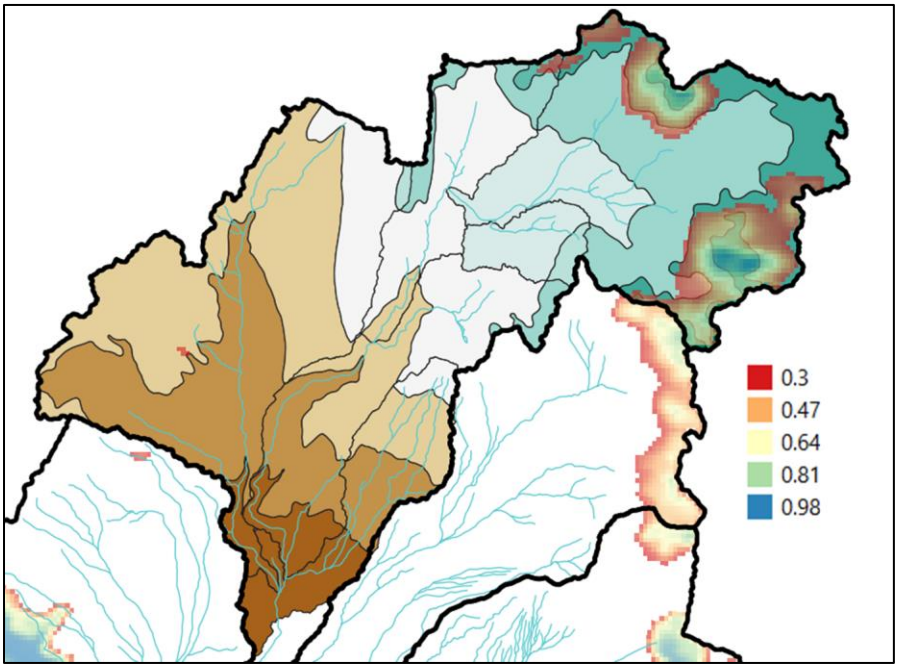


Figura III-6: Presencia relativa (porcentaje de tiempo) de cobertura nival en base a imágenes satelitales en relación a definición de catchments por bandas de altura en la zona alta de la subcuenca del Rio San Pedro en Cuchabrachi.
Fuente: Elaboración propia.

b) Para los catchments bajo esta altura, se utiliza el algoritmo de cálculo MABIA[42] (Dehghanipour et al., 2019). Este método permite una simulación del balance hídrico de cada unidad a un paso de tiempo diario, lo que permite una caracterización hidrológica más adecuada en ambientes áridos. El algoritmo MABIA también destaca por una detallada caracterización del uso de agua por la agricultura, al considerar mejoras en la representación de las pérdidas de agua por parte de la cobertura vegetal, y permitir además la implementación de regímenes de riego de diverso tipo, entre los cuales destaca el riego por turnos, relevante en el caso de la cuenca del Salar de Atacama.

c) Para cada uno de los catchments que operan con el método MABIA, estos son conectados a elementos acuíferos de limitada capacidad, en relación con su superficie y factores relativos a su capacidad de almacenamiento. Estos elementos acuíferos[43] asociados a cada catchment tienen la posibilidad de descargar parte de su volumen almacenado en los ríos inmediatamente aguas abajo del límite que define el catchment (afloramientos, línea punteada roja en la Figura III-7) o se acumulan como recarga subterránea lateral al acuífero que se ubica en la base de

[42] Método de modelación hidrológica en WEAP utilizado en contextos semi áridos https://www.weap21.org/WebHelp/index.html#Mabia_Algorithms.htm

[43] Estos elementos acuíferos no están conectados entre sí a través de ecuaciones de flujo por lo que a diferencia de lo que ocurre en el modelo Salar-Monturaqui no es posible determinar ubicación de la napa freática.

la cuenca (línea continua azul en la Figura III-7). Este acuífero lateral en la base de cada cuenca es el encargado de transferir la recarga subterránea hacia el modelo hidrogeológico para el área del Salar de Atacama.

d) Para la incorporación de los procesos de infiltración y recarga directa de estos cuerpos acuíferos desde los cauces y desde los mismos catchments, el modelo considera la interconexión entre cada acuífero asociado a las catchments de cuencas laterales, con determinados tramos de río, así como a partir de la definición de una recarga directa a nivel de catchment, asociada a la precipitación no-efectiva y a los procesos de percolación desde el perfil de suelo.

e) Para representar la interacción entre el aporte superficial asociado a eventos de altas precipitaciones en las cuencas laterales del salar, con la hidrología del área del núcleo, los caudales altos asociados a estos eventos son capaces de recargar superficialmente el acuífero mediante un aporte areal.

f) Adicionalmente a la modelación de los flujos y balances de agua, el modelo incorpora la infraestructura de extracción de agua mediante la consideración de los puntos de captación asociados a derechos de aprovechamiento de agua y algunos canales de distribución, tanto para riego como agua potable. Así la herramienta conecta la oferta de agua disponible con aquellos catchments y sitios de demanda que simulan el uso de agua potable y/o el uso de agua para riego.

El esquema conceptual de los catchments en las cuencas laterales se presenta en la Figura III-7.

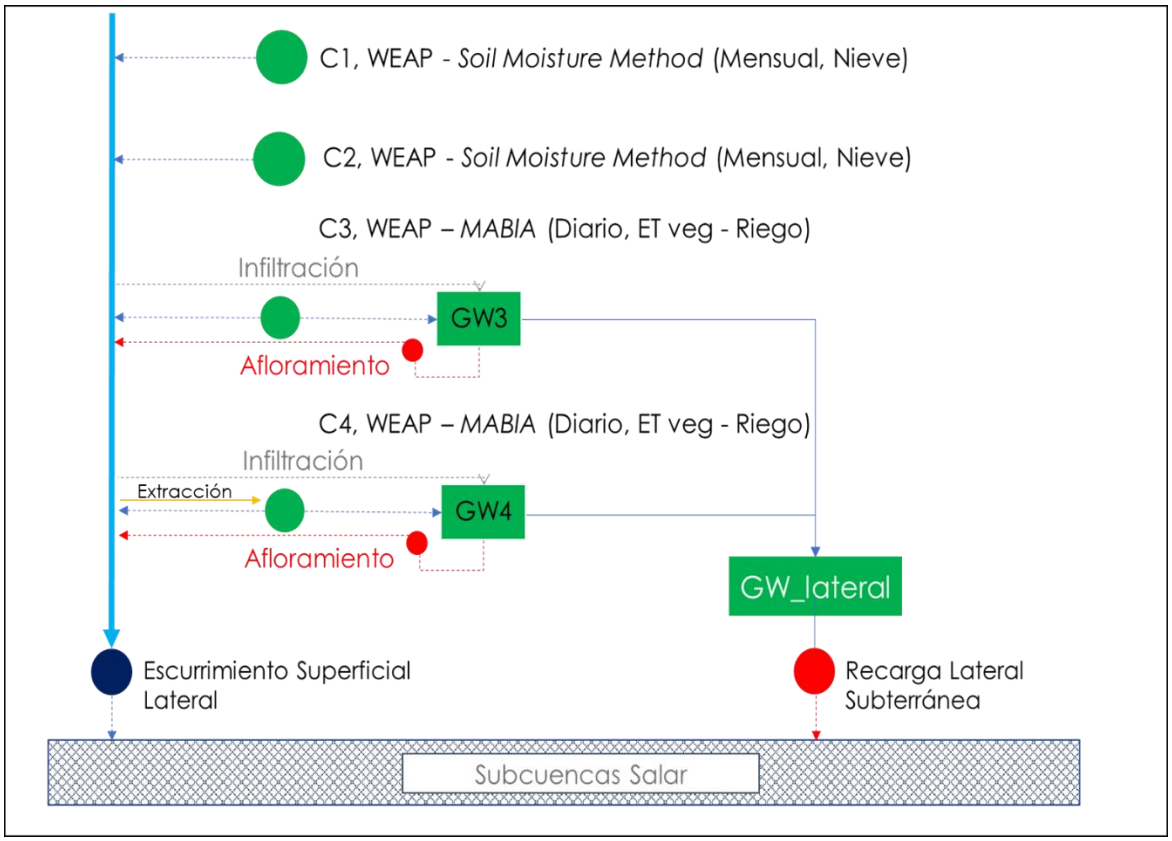


Figura III-7: Esquema de conceptual de caracterización de catchments en subcuencas laterales y su relación con el sistema de aguas subterráneas de la zona del salar.
Nota: Círculos verdes (C1, C2, C3 y C4) representan lo catchments (Notar que C1 y C2 representa catchments altos y que solo C3 y C4 conectan con un acuífero -GW- dado el algoritmo utilizado); Rectángulos verdes (GW3, G4 y GW_lateral) representan los acuíferos. Puntos rojos representan los sitios de demanda, los cuales permiten representar los afloramientos y la recarga lateral subterránea de acuerdo con lo que percola desde los acuíferos laterales.
Fuente: Elaboración Propia

Los caudales superficiales y subterráneos del modelo lateral no llegan directamente al modelo Salar-Monturaqui, sino que se considera que, de la escorrentía superficial del modelo lateral, una fracción se evaporan a la atmósfera y que los caudales menores a 500 l/s infiltran antes de entrar a la zona del modelo Salar-Monturaqui, incorporándose a los excesos subterráneos. Detalles respecto de cómo se realiza esta distribución de flujos se presenta en el Capítulo III.5.

En el caso de los catchments ubicados en el modelo superficial Salar-Monturaqui, se utiliza el algoritmo MABIA. La interacción entre el sistema superficial y subterráneo se representa a través del acople entre los modelos WEAP y MODFLOW (detalles se describen en el Capítulo III.5). En este caso en la modelación del balance hidrológico se reemplaza el segundo balde[44] por el acuífero representado en MODFLOW. De manera especial se incorpora en

[44] Representación de la percolación en la zona profunda, debajo del primer balde (el cual representa la zona de raíces). Más información en https://www.weap21.org/

este sistema la interacción existente entre las formaciones vegetales, presentes principalmente en lo que se conoce como la zona marginal del salar, y la disponibilidad de agua fresca proveniente de la zona saturada (acuífero). Dependiendo del desarrollo radicular esta vegetación puede acceder a la napa freática tal como se representa de manera esquemática en la Figura III-8. En el caso de las unidades de modelación hidrológica al interior del salar, no se define una red de drenaje que los conecte, dado el escaso desnivel topográfico. Se genera escorrentía que puede infiltrar o evaporarse, pero no hay una simulación de cauces con caudal bien definido.

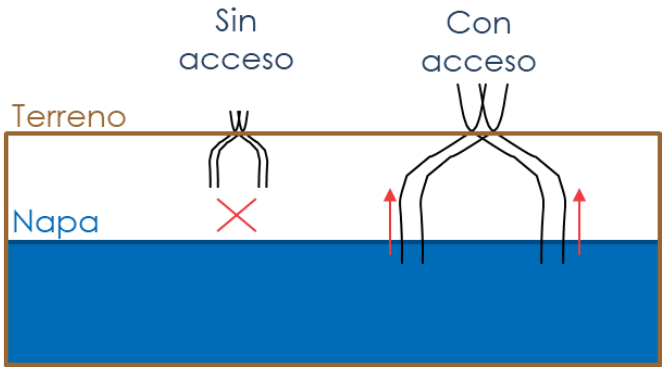


Figura III-8: Representación esquemática del acceso de agua subterránea de vegetación en la zona marginal del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración Propia

Tanto en el caso del sistema hidrológico de cuencas laterales y de la zona del salar se definen las unidades de modelación y sus características a través de un proceso de desagregación espacial. La definición de estas unidades de modelación hidrológica superficial considera en una primera etapa la definición de subcuencas, posteriormente la división de estas subcuencas en catchments y finalmente la definición de las distintas coberturas y tipos de suelo al interior de estos catchments. Cada uno de estos procesos se explica a continuación tomando en cuenta la información de base utilizada y resultados obtenidos.

a) Delimitación de cuenca y subcuencas

Las subcuencas definidas para el presente trabajo fueron desarrolladas tomando en cuenta los límites de la cuenca delineados por el trabajo de definición de las Cuencas DGA-DARH (DGA-CIREN 2014) la delimitación de cuencas realizada por CORFO-Amphos21 (2021), la ubicación de puntos de interés (ej. estaciones fluviométricas, puntos de extracción) y tomando en cuenta la topografía del terreno y los límites del modelo numérico MODFLOW CA-21. A continuación, se explican en detalle cada uno de estos pasos.

Para determinar los limites exteriores de la cuenca y la definición de subcuencas hidrológicas se utilizó lo definido en base a las Cuencas DGA-DARH que fueron determinadas por estudio desarrollado por el Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN) para el Departamento de Administración de Recursos Hídricos de la DGA el año 2014 (DGA-CIREN 2014). En este estudio, se redelimitó las cuencas hidrográficas y las

subunidades derivadas a partir de la actual delimitación del Banco Nacional de Aguas. El producto generó una delimitación actualizada a una escala de 1:35.000, con la correspondiente codificación de cuencas, subcuencas y sub-subcuencas. En la Figura III-9 se presenta la definición de subcuencas para el área de estudio de acuerdo con esta base de información.

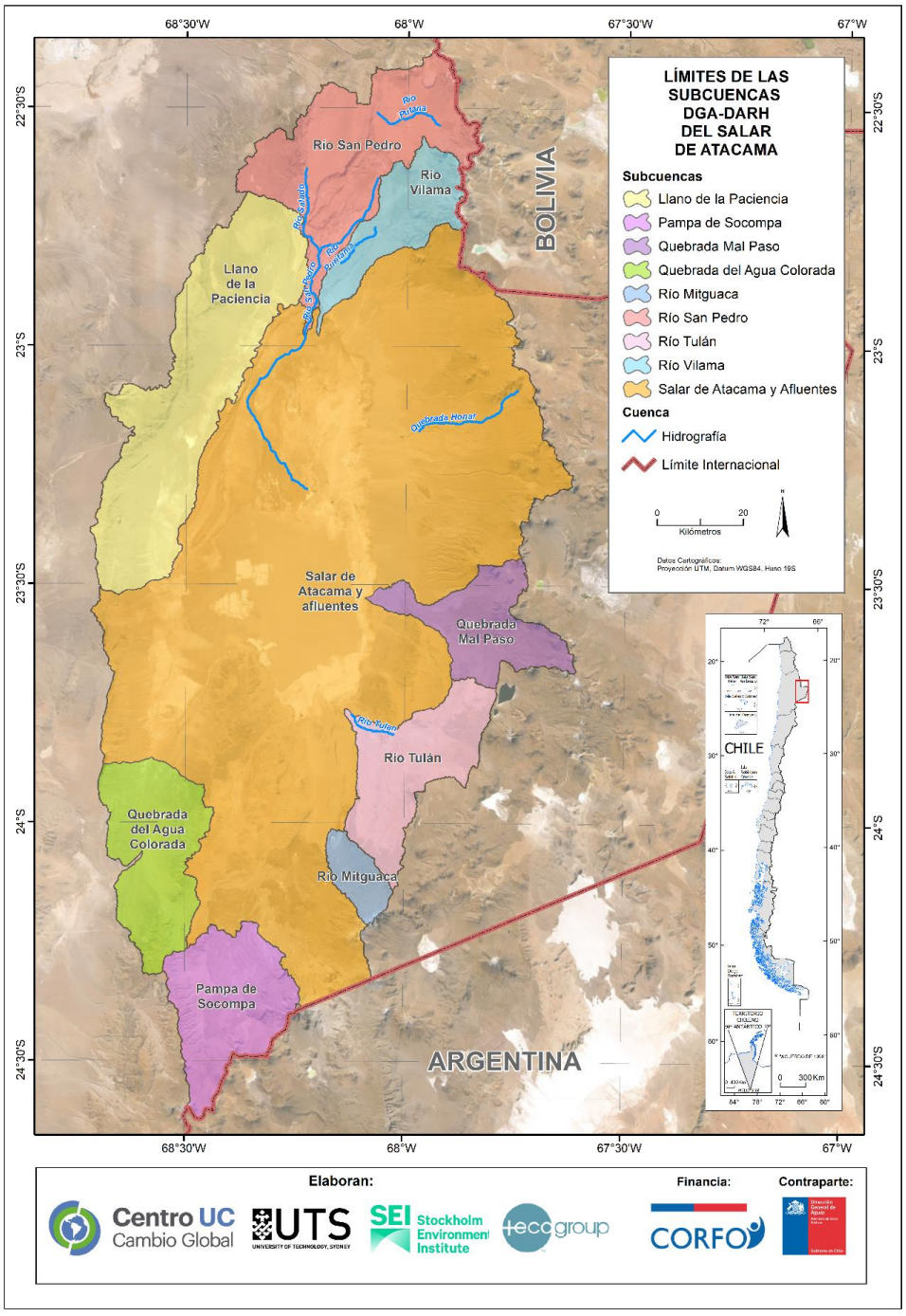


Figura III-9: Delimitación de subcuencas en la cuenca del Salar de Atacama de acuerdo a DGA-DARH.

Fuente: DGA-CIREN 2014

El segundo insumo utilizado corresponde al estudio realizado por CORFO-Amphos21 (2021),el cual considera la definición de subcuencas a partir del análisis de un modelo digital de elevación (DEM). Como resultado, generan 17 subcuencas para toda el área de la cuenca del Salar de Atacama, las que consideran al núcleo y a las cuencas laterales en todo el contorno del salar (Figura III-10).

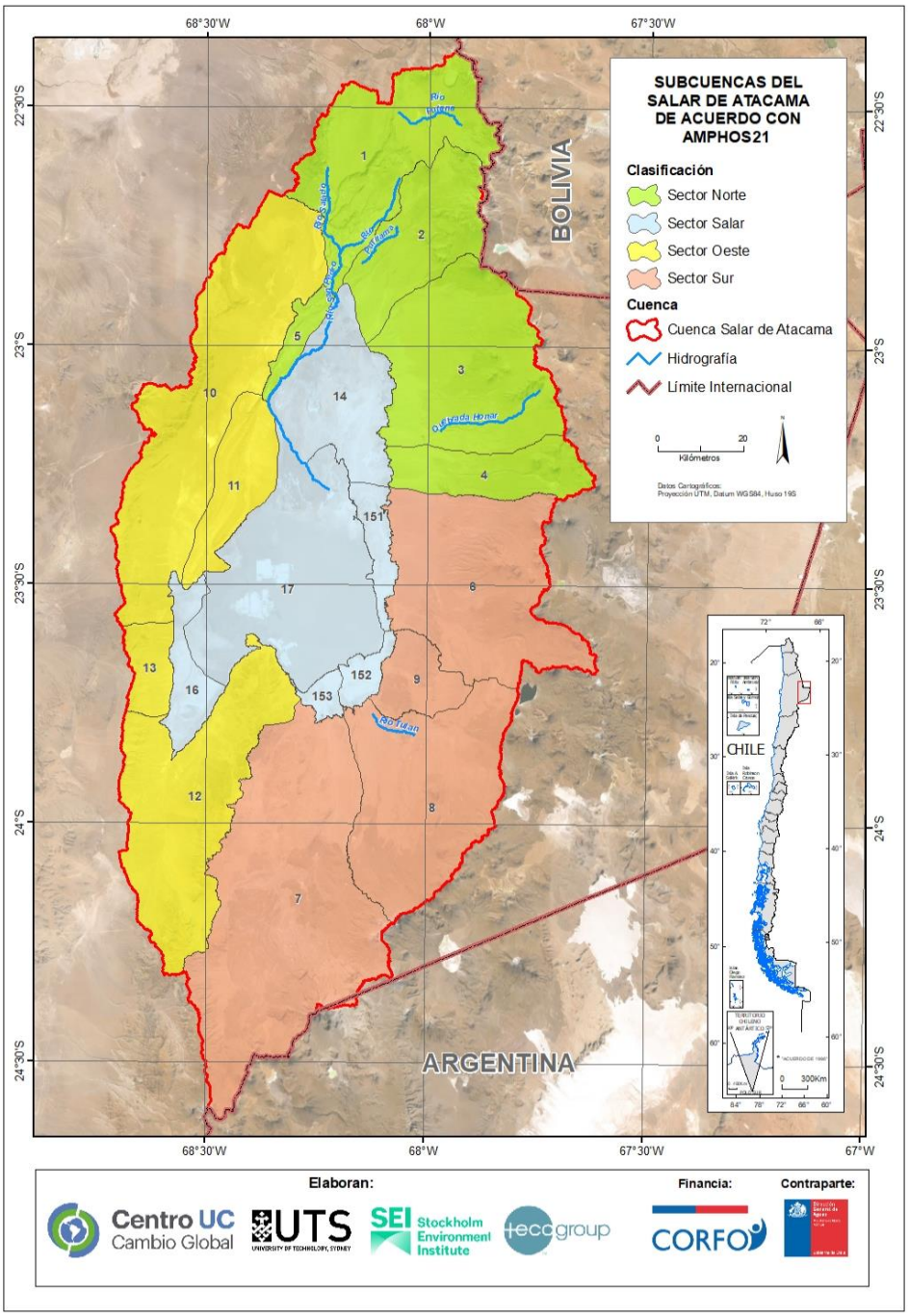


Figura III-10: Delimitación de subcuencas en la cuenca del Salar de Atacama de acuerdo a AMPHOS21.

Fuente: CORFO-Amphos21 (2021)

Es importante destacar que los bordes de la cuenca del Salar de Atacama de acuerdo a la definición de CORFO-Amphos21 (2021) no coinciden con los bordes de cuenca definidos en el trabajo de CIREN (2014). Para los propósitos de este trabajo, se definió como límite exterior el desarrollado por DGA-CIREN (2014) debido a que corresponde a la delimitación oficial de la cuenca.

Un segundo nivel de discretización espacial ha tomado en cuenta una separación de la cuenca del Salar de Atacama en los 2 modelos definidos con anterioridad: el modelo lateral y el modelo Salar-Monturaqui. El límite entre ambas zonas ha quedado delimitado por la zona de la cuenca que ha sido representada por el modelo MODFLOW (modelo numérico) en el trabajo de CORFO-Amphos21 (2021) (ver
Figura III-1). La zona exterior comprende principalmente las subcuencas laterales donde se desarrollan ríos y quebradas y que aportan caudales de manera superficial y subterránea hacia la zona interior. La zona interior corresponde principalmente al área del Salar de Atacama, además de incluir un apéndice en la zona sur (zona de Monturaqui) que correspondería a las cuencas laterales, sin embargo, esta se incluye en la zona del salar debido a la modelación por parte del modelo numérico que permite representar lo que ocurre a nivel subterráneo.

Finalmente, en el modelo lateral se realizó un trabajo de delimitación de quebradas a partir de puntos de interés como estaciones fluviométricas, puntos de extracción y puntos con derechos de aprovechamiento de agua. Esta delimitación se realizó utilizando herramientas del software ArcGIS 10.0. El procesamiento considera las herramientas Hydrology, Surface, Zona Statistic, Extraction y Raster Dataset, además del uso del algoritmo Watershead Delimitation.

Se definieron de esta manera un total de 82 subcuencas (67 corresponden al modelo lateral y 15 al modelo del Salar-Monturaqui) dentro de la cuenca del Salar de Atacama. En la Figura III-11 se muestran las subcuencas finales definidas para el estudio resultantes de todas estas delimitaciones.

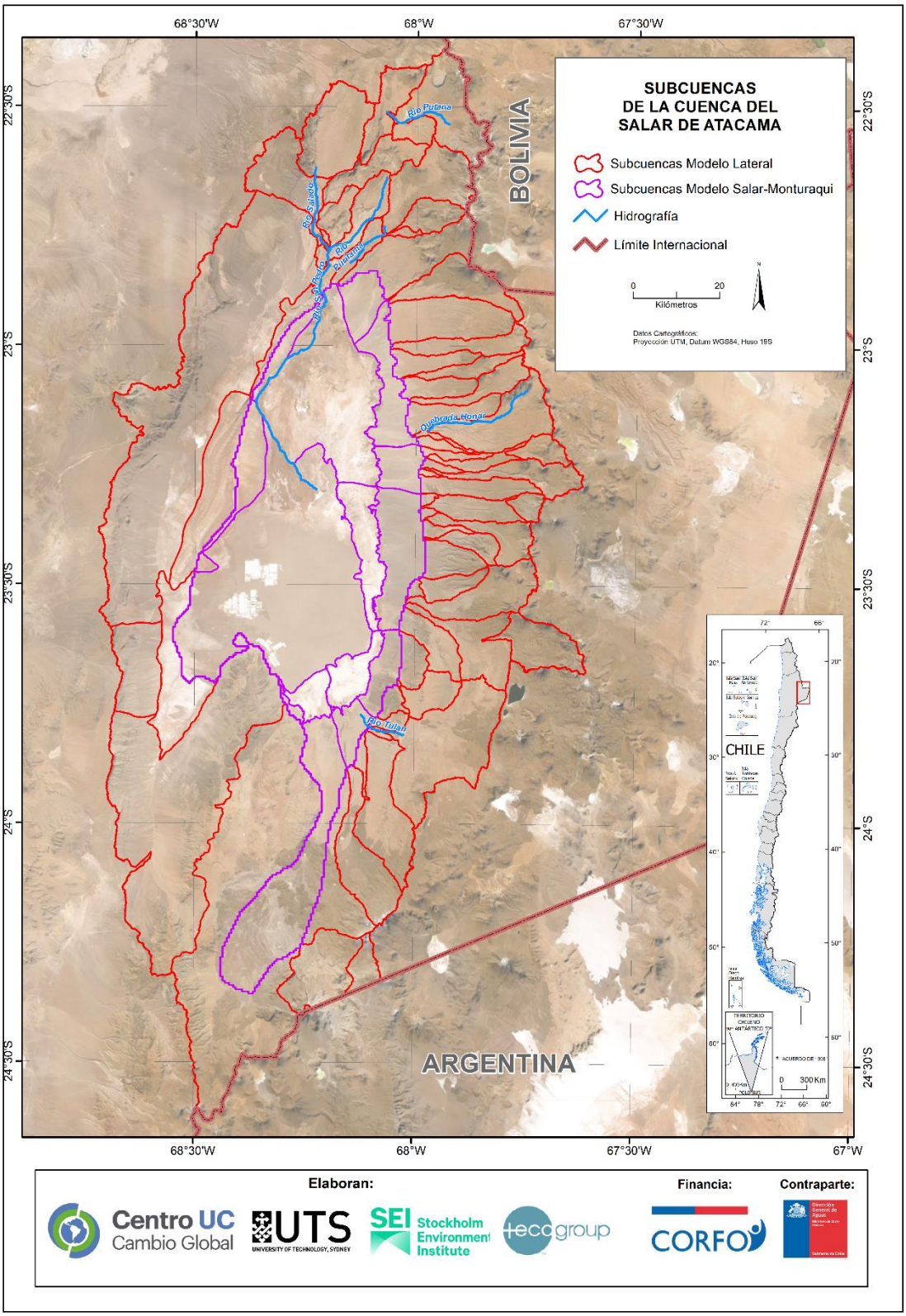


Figura III-11: Subcuencas definidas para la modelación hidrológica en la cuenca del Salar de Atacama.

Fuente: Elaboración propia.

b) Delimitación de catchments

Las subcuencas antes descritas, fueron posteriormente divididas en catchments (unidades de modelación hidrológica climáticamente homogéneas). En ambos modelos, las subcuencas se dividieron por bandas de elevación. Adicionalmente, en el modelo del Salar-Monturaqui, las subcuencas fueron divididas para representar áreas de interés de modelación, como reservas naturales y sistemas lagunares, vegetación natural (bosque y matorral) y cultivada contenidas dentro de ellas, las cuales poseen la capacidad de acceder a fuentes de agua subterráneas.

Esta discretización permite definir 323 catchments en la cuenca del Salar de Atacama (264 catchments en el modelo lateral y 59 en el modelo del Salar-Monturaqui). Las unidades que contaban con una superficie total menor a 50 ha, se procedió a incorporarlas al catchment más cercano y que perteneciera a la misma subcuenca. La Figura III-12 muestra un ejemplo de la construcción de catchments en el modelo lateral para la subcuenca del Río Salado que es uno de los afluentes del Río San Pedro y en la Figura III-13 muestra un ejemplo de la construcción de catchments en el modelo del Salar-Monturaqui, particularmente en el catchment que representa la zona de la Laguna Tebenquiche.

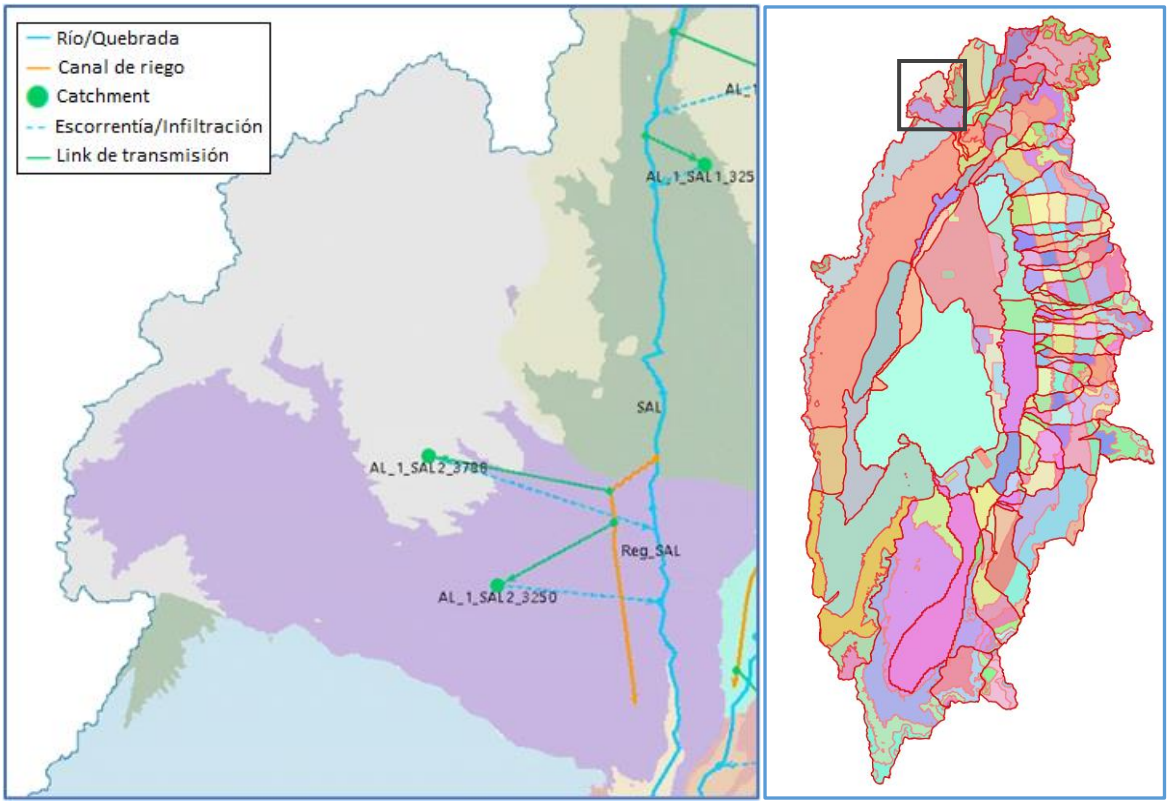


Figura III-12: Esquema de catchments del modelo lateral en WEAP (izquierda) y catchments en la cuenca del Salar de Atacama (derecha).
Nota: En la nomenclatura del catchment AL_1_SAL2_3788: "AL" indica área lateral, "1" indica la división de subcuencas definida por CORFO-Amphos (2021)45, "SAL2" indica el sector dentro de la cuenca (puede corresponder a un río o quebrada, en este ejemplo Río Salado) y "3788" indica la altura media del catchment.
Fuente: Elaboración propia.

[45] Se definen un total de 17 subcuencas.

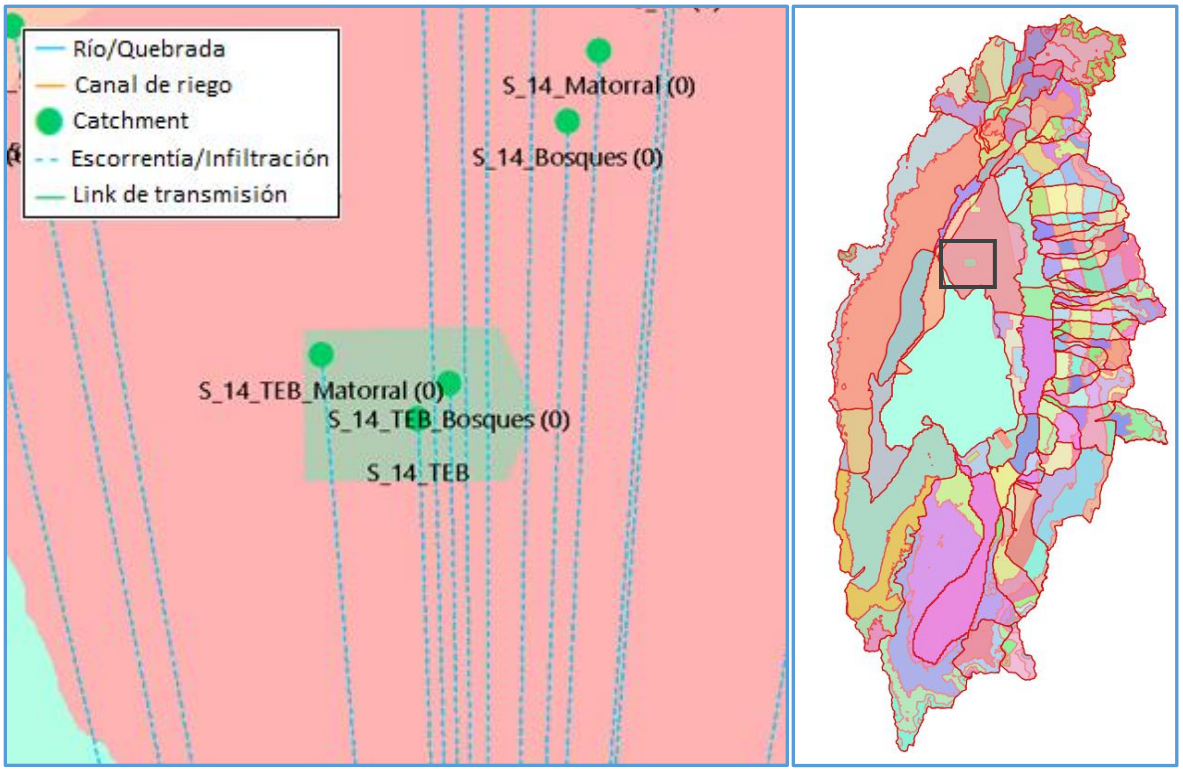


Figura III-13: Esquema de catchments del modelo del Salar-Monturaqui en WEAP (izquierda) y catchments en la cuenca del Salar de Atacama (derecha).
Nota: En la nomenclatura del catchment S_14_TEB: "S" indica área salar, "14" indica la división de subcuencas definida por CORFO-Amphos (2021)46, "TEB" indica el sector de interés dentro de la cuenca (puede corresponder a una reserva natural o sistema lagunar, en este ejemplo Laguna Tebenquiche). Si hay presencia de matorral, bosque y/o área cultivada, se definen nuevos catchments como unidades de modelación independientes.
Fuente: Elaboración propia.

c) Definición de estructura interna de catchments

Para completar la información de cada catchment, se debe realizar una caracterización del tipo de cobertura y características básicas de los tipos de suelo. Para realizar esta estimación cada una de las superficies de catchments se cruza con la información de las unidades hidrogeológicas (UH) dominantes y con los distintos tipos de cobertura de suelo. En el caso de las UH se tomó información disponible en el estudio CORFO-Amphos21 (2021). Al hacer el cruce con los catchments se determinó que en el caso de que una UH cubriese sobre el 70% de la superficie del catchment, se considera esa UH para el catchment completo. De lo contrario, se consideran todas las UH que cubren en conjunto sobre el 90% de la superficie del catchment de acuerdo con su proporción. Esta diferenciación permite obtener una mayor heterogeneidad entre catchments, otorgando diferentes propiedades de suelo e hidráulicas.

[46] Se definen un total de 17 subcuencas.

Además, para cada UH dominante en cada catchment se le asignó una distribución de superficie de las coberturas presentes en ella. Para la obtención de las coberturas presentes en la cuenca, se utilizó como base el mapa de cobertura de suelos de Chile (Zhao et al., 2016), considerando las coberturas bosques, cuerpos de agua, cultivos, humedales, matorrales, pastizales, salar y suelo desnudo. Esta capa fue actualizada en ciertas zonas de la cuenca utilizando el inventario nacional de humedales (MMA, 2020) para incorporar cuerpos de agua (categorías: lagos y lagunas) y humedales (categoría: andinos). Además, se utilizó el estudio realizado por el Centro de Ecología Aplicada (CEA, 2015) en donde proveen un producto que indica presencia de vegetación permanente en el tiempo. Dado que este producto no especifica a qué tipo de vegetación corresponde, los polígonos/áreas de vegetación fueron sumados a la cobertura dominante en su entorno de acuerdo con la clasificación de Zhao et. al. (2016): Bosque, Matorral o Pastizal. De esta manera, la superficie de las diferentes coberturas dentro de la cuenca del Salar de Atacama queda distribuida como se indica en la Tabla III-1 y la Figura III-14.

Es importante realizar una revisión la estimación de estas superficies de cobertura a través de trabajo en terreno o, en su defecto, a través de un trabajo participativo con actores que puede desarrollarse en el marco del PEGH de la DGA. Dado que la proporción de cobertura vegetal en relación a la superficie total de la cuenca es baja, es posible indicar que cualquier ajuste posterior en los valores aquí estimados no genera efectos relevantes en el funcionamiento del modelo hidrológico.

Tabla III-1: Distribución de coberturas de suelo consideradas en modelo hidrológico superficial de la cuenca del Salar de Atacama

Cobertura	Superficie (ha)
Bosques	718
Matorrales	101.080
Cuerpos de Agua	14.550
Humedales	2.780
Suelo Desnudo	1.509.480
Cultivos	1.530
Pastizales	4.650
Salar	68.240
Total	1.703.030
Total Cuenca DGA	17.030 km^2

Fuente: Elaboración propia a partir de Zhao et al. (2016), MMA (2020) y CEA (2015).

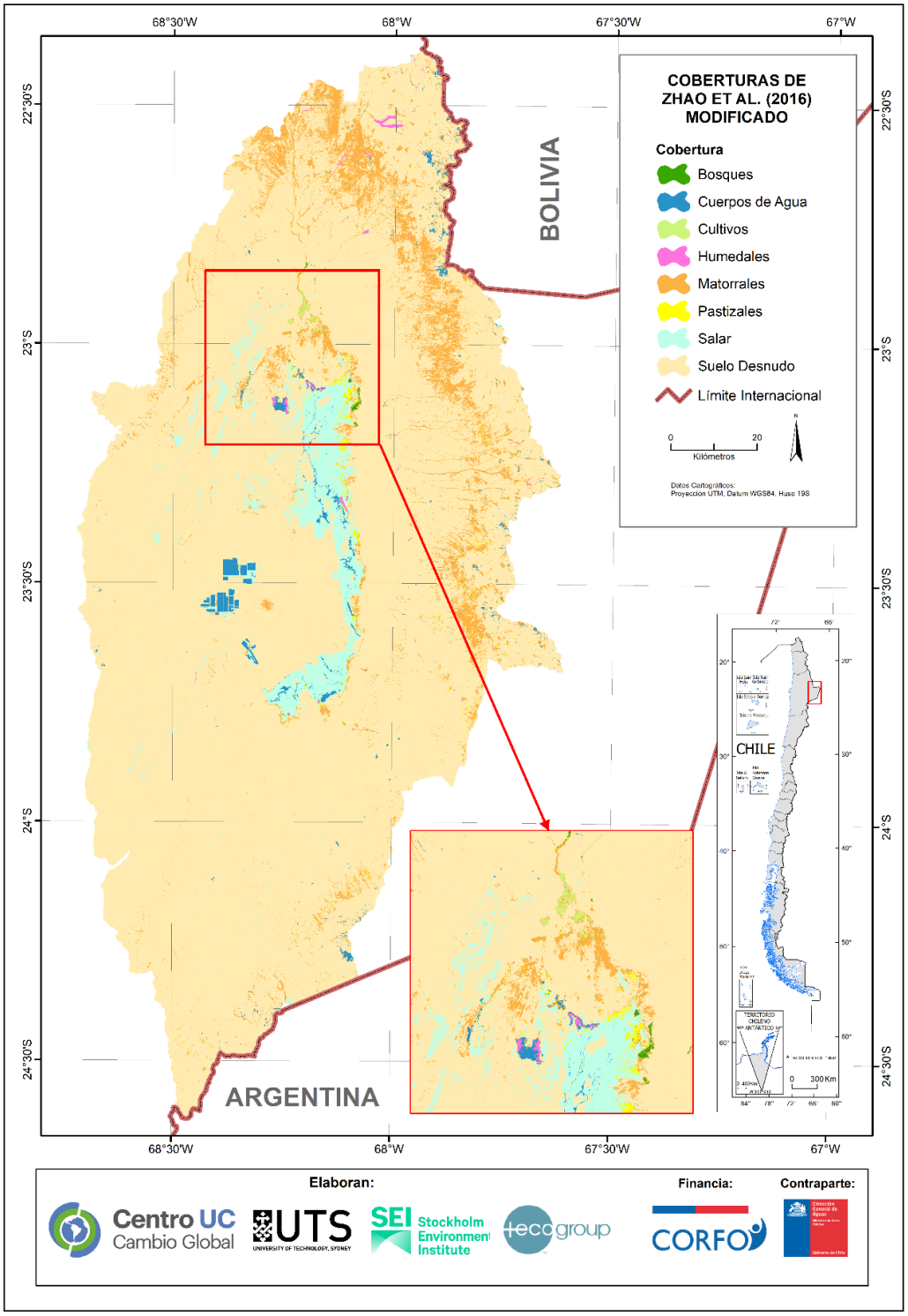


Figura III-14: Distribución espacial de las diferentes coberturas dentro de la cuenca del Salar de Atacama.

Fuente: Elaboración propia a partir de Zhao et al. (2016), MMA (2020) y CEA (2015).

III.4.2.2 Caracterización uso y extracciones de agua superficiales

Para poder representar las extracciones y consumo de recursos hídricos superficiales se toma en cuenta principalmente los consumos esperados de agua potable por los pueblos y localidades que se ubican en distintos sectores de la cuenca y los consumos esperados de agua para riego. Adicionalmente se consideran limitaciones en la extracción de recursos superficiales asociadas a la infraestructura de extracción y conducción, y los derechos de aprovechamiento de agua.

III.4.2.2.1 Caracterización del consumo de agua potable

En el caso del consumo de agua potable, la caracterización de base toma en cuenta la población residente en distintas localidades existentes en el Salar de Atacama, de acuerdo a los resultados del Censo de Población del año 2017 (INE, 2017). También considera la dotación de agua esperada por habitante de acuerdo con los cálculos que consideran los volúmenes suministrados por las distintas APR's presentes en la cuenca, y la población permanente y flotante contabilizadas en toda la cuenca. Esta estimación resulta en una dotación estimada de 287 l/hab/día, la cual se aplica de manera homogénea a todas las localidades de la cuenca, según la distribución de habitantes que se presenta en la Tabla III-2.

Tabla III-2: Número de habitantes por localidad al interior de comuna de San Pedro de Atacama

Localidad	Entidades	Número de habitantes
Río Grande	San Juan, Lican, Matancilla, Quebrada de Río Grande	27
San Pedro de Atacama	Cúcuter, Larache, Quitor, Sequitor, Solcor, Vilama, Yaye, Beter, Club de rodeo, Orilla solor, Tulor, Villar solor, Checar, Condeduque, Coyo, Cuchabrache, Guatín, Alma	2.621
Paso Jama	Paso Jama	1
Toconao	Zapar, La banda, Toconao	742
Talabre	Soncor, Talabre	55
Camar	Camar	83
Socaire	Flor de chile, Desierto, Peñaloza, Santa rosa, Socaire	408
Peine	Peine, Campamento andino	1.475

Fuente: INE, (2017)

III.4.2.2.2 Caracterización del consumo de agua para riego

En el caso del consumo de agua para riego se consideró la información base de diferentes estudios realizados en el área de estudio, siendo los principales CNR-ARRAU (2014) y CNR-AMPHOS21 (2017). A continuación, se detalla la información considerada para determinar los consumos de agua para riego tomando como base las condiciones en la subcuenca

de San Pedro en Cuchabrachi. La información y decisiones tomadas en este conjunto de subcuencas se extrapolaron hacia las otras subcuencas de la zona lateral y del salar.

a) Caracterización coberturas de cultivos

A continuación, se detalla la cobertura de suelo considerada en el modelo con énfasis en la cobertura dedicada a distintos tipos de cultivos. Como ya se mencionó en el Capítulo III.4.2.1, la cobertura de suelo se categorizó en 8 grupos: Agua, Bosques, Cultivos, Humedales, Matorrales, Pastizales, Salares y Suelo Desnudo.

En términos del área agrícola dedicada a cultivos, existen distintas fuentes que presentan diferencias en la estimación de la cobertura agrícola. El censo agropecuario nacional de 2007 (INE, 2007) identifica, para la comuna de San Pedro de Atacama, una superficie de uso agrícola regada de 1.467 ha. Por otra parte, el trabajo de Zhao et al. (2016) considera para la cuenca un total de 1.530 ha identificadas como cultivos. Para el desarrollo del modelo, se consideró la distribución espacial de Zhao et al. (2016) (modificado de acuerdo con lo presentado en el Capítulo III.4.2.1) debido a que permite identificar la distribución espacial de la superficie de cultivos en las distintas áreas de la cuenca, a una resolución adecuada. Esto permite a su vez, representar las áreas agrícolas existentes en las distintas zonas de la cuenca. La distribución de esta cobertura de suelo en distintos tipos de cultivos presentes en la comuna de San Pedro de Atacama se ha definido en base el Censo Agropecuario de 2007 (INE, 2007). Este censo entrega la distribución de grupos que se presentan en la Tabla III-3. Algunos de estos grupos se han agregado para definir una distribución en base a 6 cultivos representativos de acuerdo con lo presentado en la Tabla III-4. Se asume esta distribución porcentual de cultivos para todas las zonas con actividad agrícola en la cuenca.

Tabla III-3: Cultivos agrícolas principales presentes en la comuna de San Pedro de Atacama

Cultivo	Superficie Comuna San Pedro (ha)
Plantas Forrajeras	750,7
Huerto casero	83
Choclo	82,4
Maíz (grano seco)	26
Trigo blanco	17,8
Peral europeo	14,9
Haba	14,8
Membrillo	12,7
Ajo	10,2
Huerta casera	9,4
Quínoa	7,3
Otros frutales	4,8
Tintas viníferas Corrientes	4,2
Naranjo	3,9

Fuente: INE, 2007

Tabla III-4: Categorización de los cultivos agrícolas presentes en la comuna de San Pedro de Atacama

Categoría	Superficie Comuna San Pedro (ha)	Porcentaje %
Plantas forrajeras	750,7	72,0
Huertas y Hortalizas[1]	199,8	19,2
Cereales Verano[2]	33,3	3,2
Cereales Invierno[3]	17,8	1,7
Frutales[4]	36,6	3,5
Cítricos[5]	3,9	0,4
Total	1.042,1	100,0

Notas: 1 Incluye choclo, habas, ajo, huerto y huerta casera; 2 Incluye maíz y quínoa; 3 Incluye trigo blanco; 4 Incluye peral, membrillo, tintas viníferas corrientes y otros frutales; 5 Incluye naranjo.
Fuente: Elaboración propia a partir de INE, 2007.

b) Cálculo de la demanda de agua para riego y cobertura

La extracción de agua para riego que ocurre a nivel de las unidades de modelación (catchments) es determinada por la caracterización del riego implementado para los distintos cultivos presentes, no siendo necesariamente representativa de las demandas de evapotranspiración de agua por las plantas representadas en esa unidad de modelación. Así, para un sistema de riego que opere independiente de las condiciones ambientales (ej. turno de riego con una frecuencia y lámina de aplicación regular), la demanda de agua desde esa unidad será de carácter constante. Como consecuencia, la demanda de agua extraída para riego[47] podrá no dar cuenta de la fenología del cultivo (representada por los valores de Kc utilizados) o de las condiciones climáticas. Independiente de lo anterior el modelo WEAP registra las necesidades de evapotranspiración asociadas a los distintos cultivos por lo que es posible también incluir en los resultados la cobertura en la satisfacción de esa demanda física.

En la Figura III-15, se presenta el caudal demandado por una unidad de modelación que representa solo áreas de cultivo regadas. El escenario "Reference" muestra la serie de caudales demandados a partir de un esquema de riego mediante un turno hipotético de riego cada 25 días, con una lámina de aplicación de 50 mm. Por su parte, el escenario "Prueba Riego SPC" representa la demanda de la misma unidad de modelación bajo un esquema de riego que se gatilla cuando el contenido de humedad del suelo se encuentra por debajo del umbral de agua "fácilmente aprovechable" por el cultivo, con un monto equivalente al volumen de agua consumido desde el riego anterior. Se aprecia en este ejemplo que una lámina de riego de 50 mm aplicada cada 25 días no es suficiente para mantener las necesidades de evapotranspiración de este tipo de cultivo.

[47] En el Capítulo III.III.4.2.4.2 se indican los detalles de los parámetros utilizados tales como método, frecuencia y cantidad de riego aplicado. Así como también los parámetros que definen las necesidades de transpiración de los cultivos.

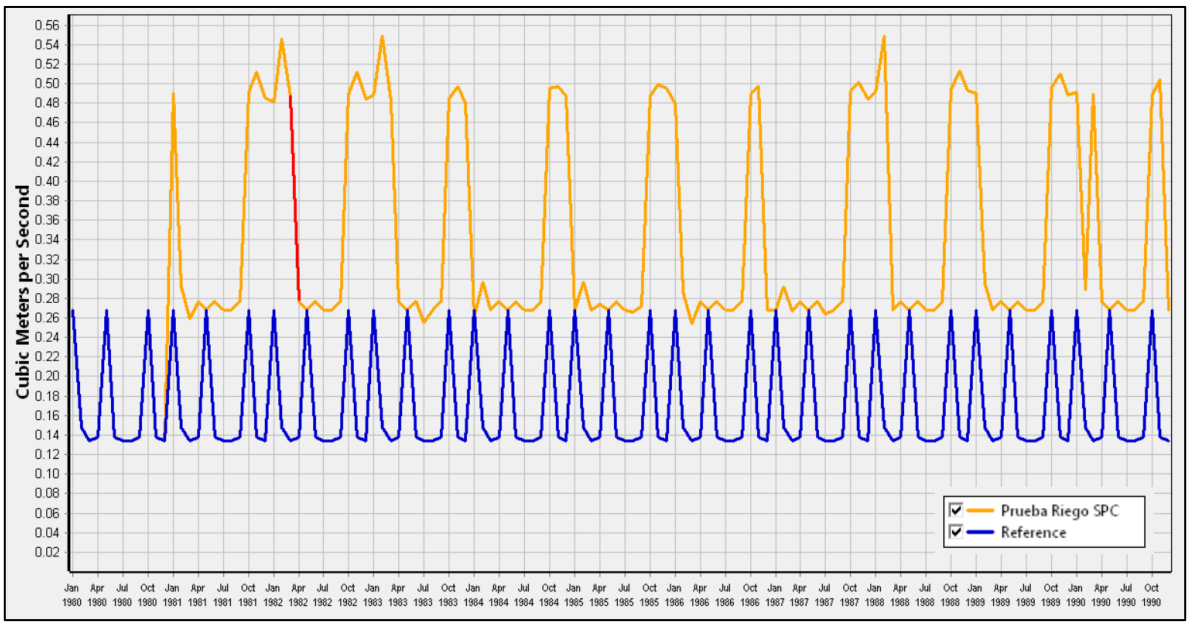


Figura III-15: Caudal demandado por una unidad de modelación para dos esquemas de riego. Nota: La serie azul representa un esquema de riego por turnos, mientras que la serie amarilla representa un esquema de riego comandado por agotamiento de agua en el perfil de suelo.
Fuente: Elaboración propia.

c) Canales y derechos de aprovechamiento

Adicionalmente a las necesidades de consumo de agua, la caracterización de estos usos incluye también las características de las potenciales limitantes físicas (infraestructura) o legales (derechos de aprovechamiento) que posibilitan estas extracciones.

Con respecto a las características de la infraestructura se consideran las características de los canales reportados por (CNR-ARRAU, 2014) tal como se presenta en la Tabla III-5. La infraestructura presente y su ubicación espacial fue obtenida desde las cartografías (capas) oficiales de la Comisión Nacional de Riego, lo que fue complementado por los puntos de captación de los derechos de aprovechamiento existentes a diciembre de 2019 en el Banco Nacional de Aguas (DGA, 2019). En la Tabla III-6 se indican los canales considerados en el modelo para las subcuencas del Río San Pedro, Río Vilama, Salar de Atacama y afluentes, Quebrada Mal Paso y Río Tulán. La eficiencia de la conducción en canales es considerada relativamente buena, por lo que se considera un valor de 80% (CNR-ARRAU, 2014). La Figura III-16 presenta un diagrama unifilar de referencia para la cuenca del Río San Pedro, hasta el punto de extracción de agua por parte de la comunidad de regantes del mismo nombre.

Tabla III-5: Capacidad de conducción de canales

Canal	Capacidad de conducción (L/s)	Superficie regada (ha)
Cuchabrache	100	12
Bellavista	140	3,5
Solor	100 – 150	-
Coyo	100 – 150	-
Bartolo	500	-
Patilla	100	13,6
Catarpe (derivado de Patilla)	-	9
Tambillo	-	12

Nota: Se incorpora únicamente los valores con información.
Fuente: CNR-ARRAU (2014).

Tabla III-6: Capacidad de conducción (L/s) y Derechos de aguas superficiales (L/s) en canales presentes en el modelo

Canal	Capacidad de conducción (L/s)	Derechos de aguas superficiales (L/s)
Extracción Regantes Putana	100[1]	30
Canal Juntas San Juan	100[1]	99
Canal Santiago Río Grande	150	125
Extracción "Varios Río Grande"	100	45
Canal Regantes Salado 1	100[1]	17
Canal Regantes Salado 2	100[1]	8
Extracción "Hotel Explora"	100	18
Canal Regantes San Pedro	1.000	870
Canal Machuca	100[1]	10
Regantes Vilama 1	100[1]	10
Regantes Vilama 2	100[1]	21
Regantes Paso Jama	100[1]	1,3
Canal Zapar	100[1]	20
Canal Toconao Norte	100[1]	8
Canal Toconao	100[1]	60
Canal Toconao Prelatura	100[1]	65
Canal Aguas Blancas	150[2]	110
Canal Talabre Norte	100[1]	12,7

Canal	Capacidad de conducción (L/s)	Derechos de aguas superficiales (L/s)
Canal Talabre	100[1]	10,8
Canal Talabre Soncor	100[1]	12,3
Canal Camar Alto	100[1]	13
Canal Camar Bajo	100[1]	13,6
Canal Socaire Norte	100[1]	5
Canal Regantes Socaire	150[2]	130
Canal Peine	100[1]	18,6
Canal Tilomonte	100[1]	43

Notas: 1 Valor de referencia dada la capacidad de conducción en canal Cuchabrache y Patilla (100 L/s);[2] Valor de referencia dada la capacidad de conducción del Canal Santiago Río Grande (150 L/s).

Fuente: CNR-ARRAU (2014).

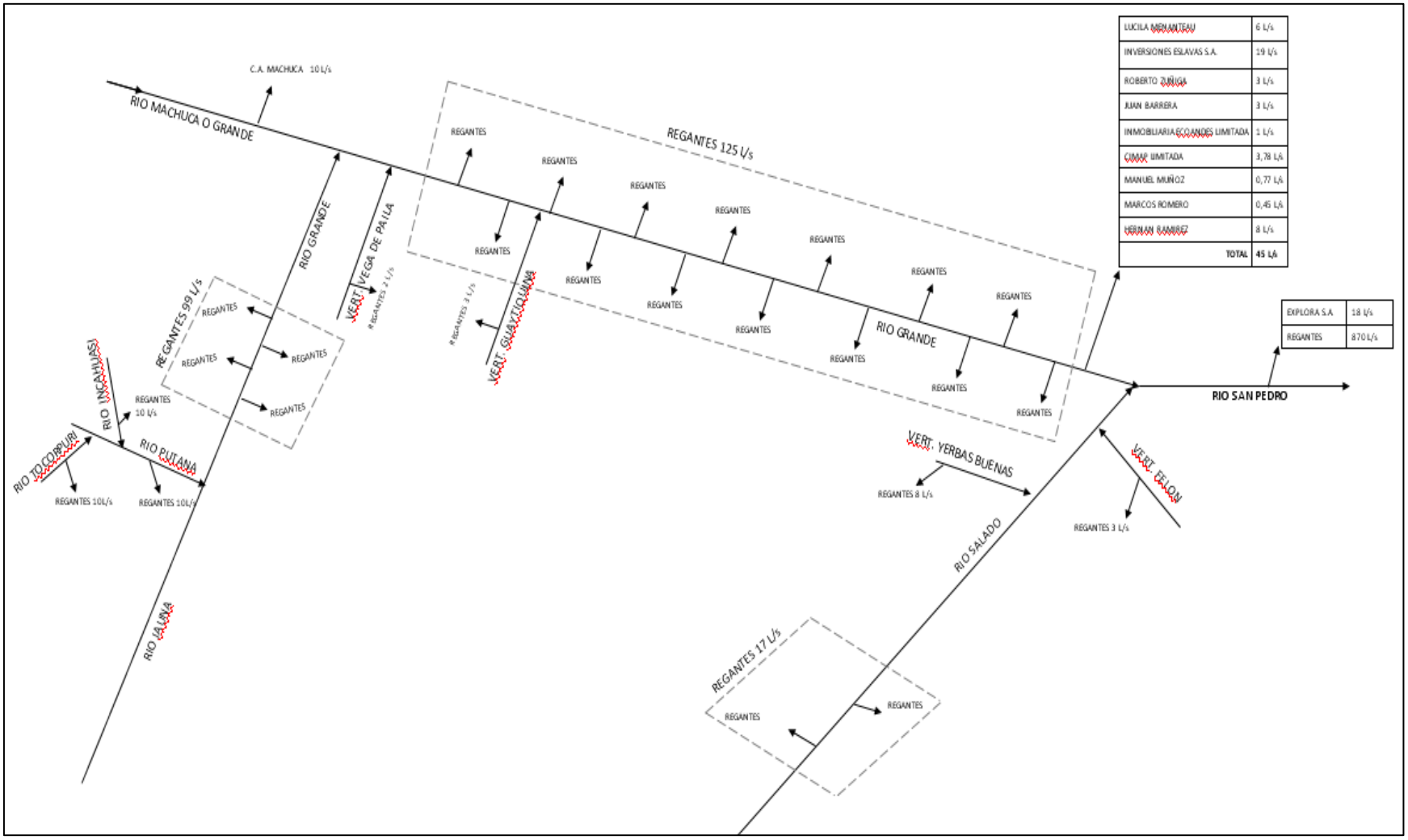


Figura III-16: Diagrama unifilar con extracciones de canales y derechos de aprovechamiento asociado para la cuenca del Río San Pedro. Fuente: CNR-ARRAU (2014).

d) Entrega de agua por canales a zonas de riego

La entrega de agua a las distintas áreas regadas considera una serie de elementos que es importante relevar. Según sea la ubicación de la bocatoma del canal o punto de extracción de caudales (puntos donde se definen derechos de aprovechamiento) desde el curso superficial, la cantidad de agua extraída dependerá en primer lugar, del caudal de derecho correspondiente. Este elemento ha sido representado en WEAP mediante el uso del elemento "Requerimiento de flujo", así como por la limitación en la capacidad de conducción del mismo canal. Esto con el objeto de asegurar en primer lugar una extracción de agua desde el río que sea efectivamente equivalente al caudal de derecho de aprovechamiento del canal, y, por otra parte, el limitar la extracción a ese derecho, impidiendo una extracción mayor en caso de que la demanda de los nodos con riego sea superior.

Esa extracción está sujeta a una pérdida por conducción desde el mismo canal hacia el acuífero, la que está definida como un 20% del caudal conducido, lo que determina el caudal finalmente disponible en el canal para suplir la demanda desde el nodo agrícola. La Figura III-17 presenta una serie de tiempo ilustrativa con la oferta de agua desde el Río San Pedro para el canal que abastece el área de riego del mismo nombre (serie azul). Se observa el límite de 0,870 m^3/s como límite superior a la extracción del canal (serie naranja), y lo disponible para suplir la demanda de riego luego de las pérdidas por infiltración (serie gris).

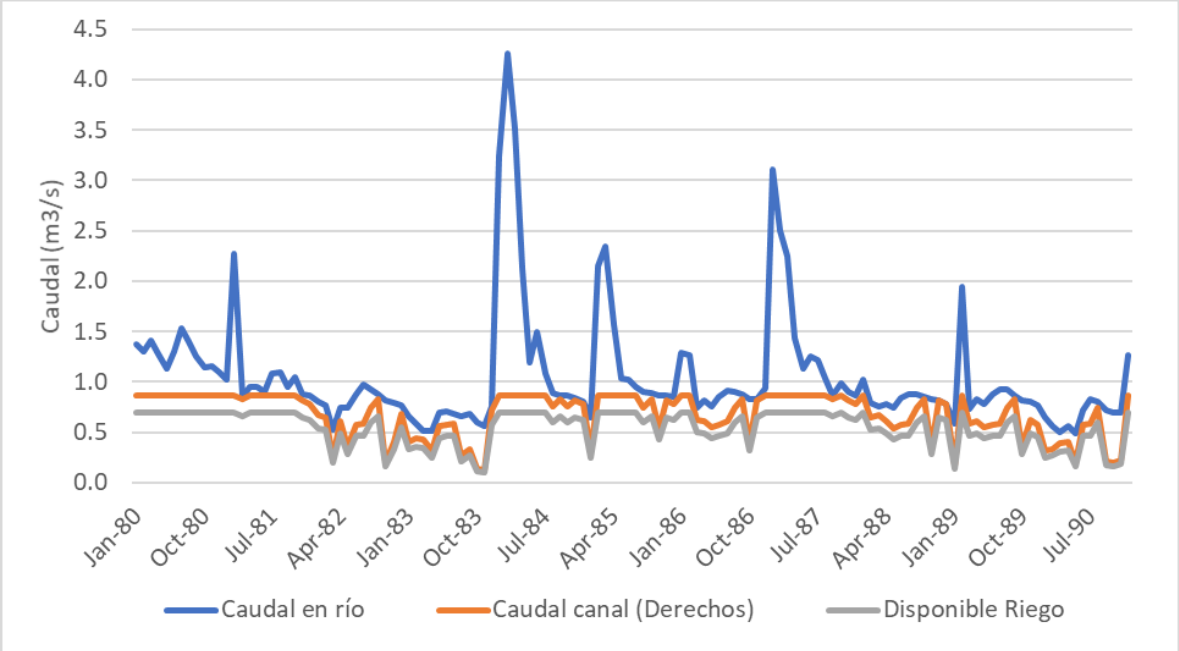


Figura III-17: Caudal disponible en río, extracción canal y caudal disponible para suplir demanda de riego para el periodo 1980-1990 en el río y canal San Pedro.
Fuente: Elaboración propia.

El caudal de agua bruta demandado por un nodo agrícola está determinado por la programación de riego definida en el catchment MABIA, tal como se presentó anteriormente (Figura III-15). A este caudal bruto demandado por el sistema de riego, es necesario adicionar las ineficiencias en la aplicación según el sistema de riego. Tal como se especifica en el Capítulo III.4.2.4.2, el sistema de riego predominante en la cuenca del Salar de Atacama es el riego por tendido, el cual posee una eficiencia de aplicación de 30%. Así para lograr una aplicación de agua de 362 l/s disponibles para los cultivos, el catchment deberá ser abastecido con 1.208 l/s.

A partir de la disponibilidad de agua en el canal, luego de la extracción desde el río, y considerando estas necesidades de agua para riego, es posible determinar el caudal efectivamente suministrado al catchment para todo el periodo de estudio. Asimismo, el porcentaje de cobertura de la demanda que es posible de ser abastecida, considerando las restricciones en la oferta y la demanda de agua para riego. La Figura III-18 presenta un ejemplo ilustrativo para el periodo 1980-1990 para el área de riego abastecida por el canal San Pedro.

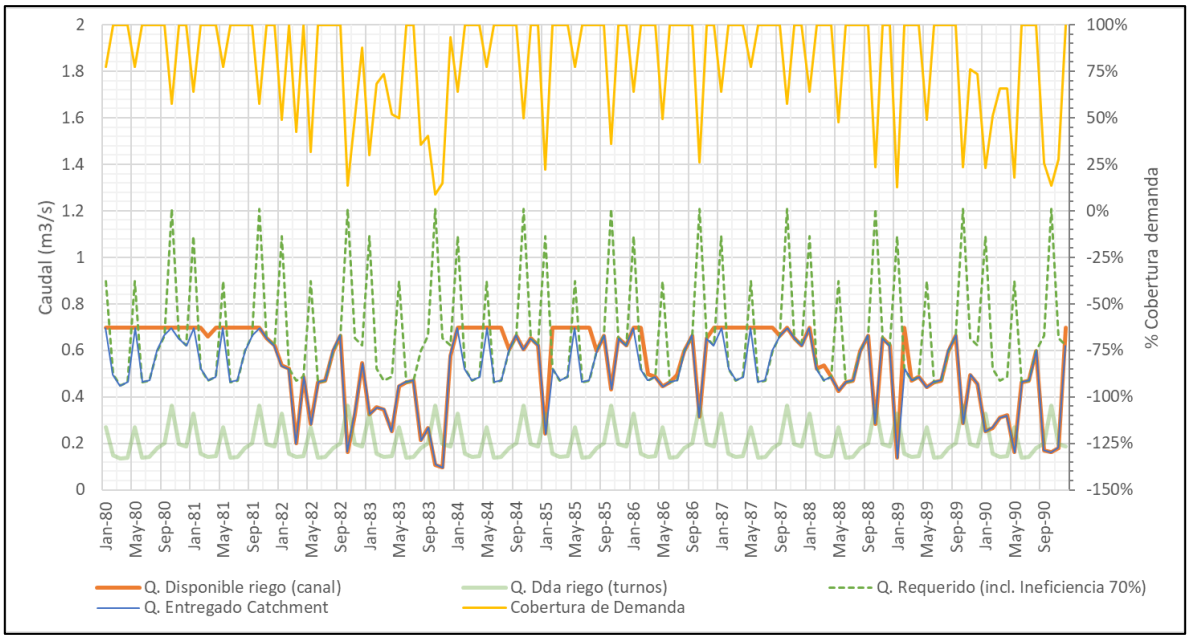


Figura III-18: Caudal disponible en canal, demanda bruta y neta de agua para riego y porcentaje de cobertura de la demanda de riego para el periodo 1980-1990 en sistema de riego San Pedro.
Fuente: Elaboración propia.

III.4.2.3 Caracterización del clima histórico y futuro

Con el propósito de contar con las series temporales de precipitación, temperaturas extremas, humedad relativa y velocidad del viento en la cuenca del Salar de Atacama, que se utilizan para la simulación hidrológica de cada uno de los catchments del modelo WEAP desarrollado, es que se han implementado distintos procedimientos de tratamiento de la información dependiendo del tipo de variable a trabajar. En estos procedimientos se ha tomado como base inicial la información de estaciones meteorológicas ubicadas tanto

al interior de la cuenca como en sus cercanías, y teniendo como apoyo para la espacialización de los resultados tanto el producto de isosuperficie de precipitación reportado por AMPHOS21 (CORFO-Amphos21, 2021) como el producto CR2Met versión 2.0 derivados del proyecto de Actualización de Balance Hídrico Nacional (DGA, UCh y PUC, 2017).

Estas series climatológicas deben ser representativas de cada catchment definido al interior de los límites de la cuenca, de modo de que exista consistencia en los resultados hidrológicos que se derivan de ellas. En ese sentido, los resultados obtenidos se han contrastado con observaciones asociadas a las estaciones de referencia, para propósitos de validación. Respecto del clima futuro, en base a modelos y proyecciones de cambio climático se obtienen series de tiempo para cada uno de los catchments en las variables mencionadas.

III.4.2.3.1 Clima histórico

Se presenta a continuación la estrategia utilizada para caracterizar las distintas variables climatológicas para las proyecciones climáticas históricas.

a) Precipitación

La obtención de series diarias de precipitación en cada uno de los catchments de la cuenca se basó en un proceso de evaluación de distintas metodologías para representar los montos totales de precipitación y las condiciones de variabilidad interanual y estacionalidad predominante[48]. La metodología consiste entonces, en el uso de las series observadas en estaciones pluviométricas que se consideran como estaciones índices, cuyos valores son posteriormente extrapolados en distintas partes de la cuenca a través de factores de corrección. El producto CR2Met no fue utilizado en precipitación para obtener series de tiempo de la variable por catchment debido a que no se halló concordancia entre las variaciones anuales del modelo y las observaciones. Esto último, dado que si bien el producto CR2Met entrega valores en sintonía respecto de lo reportado por Amphos21 para el caudal de precipitaciones, presenta discrepancias con la estacionalidad de las estaciones de referencia, con valores de R2 y Nash-Sutcliffe inferiores a 0.3 en las cuatro estaciones comparadas (El Tatio, Río Grande, San Pedro de Atacama y Toconao Experimental). Lo anterior se explica en detalle en el Anexo 1 de la Etapa III.

Estaciones de base de precipitación

De las 29 estaciones pluviométricas existentes en la cuenca y reportadas en la Etapa II, tanto operadas por la DGA como sistemas privados de monitoreo con información pública, y con registros disponibles entre 1979 y 2018, se deben seleccionar aquellas, las cuales se han

[48] En particular se toma como información de base el trabajo previo de Comité de Minería No Metálica-Amphos21(2018) que fuera parte del diagnóstico presentado en la Etapa II de este proyecto. En dicho trabajo se entrega un valor total de precipitación de 29.049 L/s que se considera como información de base en esta metodología.

denominado "estaciones de base", cuya cantidad de registros sea suficiente para poder caracterizar la pluviometría de la cuenca, y poder realizar inferencias de carácter espacial a partir de esta información.

En ese sentido, en la cuenca y sus alrededores se cuenta con 12 estaciones pluviométricas con registros de mayor longitud y relativamente completas con un criterio de calidad de registros (N° datos/Total periodo 1979-2018) de 70%. La excepción es la estación San Pedro de Atacama, que pese a tener calidad de 40% se ha incorporado de todas formas debido a la posición estratégica que tiene la estación al interior de la cuenca. La Tabla III-7 presenta las estaciones de base seleccionadas.

Tabla III-7: Estaciones pluviométricas de base a utilizar en la metodología de obtención de series por catchments en la cuenca del Salar de Atacama.

Código BNA	Estación	Lat.	Lon.	msnm
02500016-1	Toconao Experimental*	-23,1924	-67,9997	2.500
02500017-K	Camar*	-23,4085	-67,9619	2.700
02500019-6	Socaire*	-23,5904	-67,8945	3.251
02500020-K	Peine*	-23,6877	-68,0600	2.460
02510006-9	San Pedro de Atacama*	-22,9088	-68,2023	2.450
02510007-7	Rio Grande*	-22,6557	-68,1678	3.250
02104010-K	ChiuChiu	-22,3422	-68,6461	2.524
02105016-4	Linzor	-22,2266	-68,0208	4.096
2105018-0	Ayquina	-22,2753	-68,3183	3.031
02105020-2	Salado Embalse	-22,2851	-68,2034	3.200
02105021-0	Caspana	-22,3350	-68,2078	3.260
02105022-9	El Tatio	-22,3714	-68,0133	4.370

Notas: Todas las estaciones son administradas por la DGA. Aquellas estaciones con un * se encuentran dentro de los límites de la cuenca.

Fuente: Elaboración propia.

La definición de estaciones de base, además de solo considerar su cantidad de registros, para ser aplicada a la espacialización de series de tiempo al interior de los límites la cuenca, debe ser completada en sus registros faltantes en el periodo definido de análisis (1979-2018), por lo que se aplica una metodología de relleno de datos que posea coherencia temporal con los eventos registrados en las otras estaciones y espacial respecto a los montos esperados de precipitación según la elevación sobre el nivel del mar.

Producto CORFO-Amphos21 de isosuperficie de precipitación

En el trabajo de CORFO-Amphos21(2021) se ha establecido una relación entre precipitación anual y ubicación espacial en la cuenca que ha permitido definir volúmenes de aporte de agua por precipitación para distintas subcuencas y zonas aportantes. El efecto que posee la ubicación y la altura sobre las precipitaciones se condensa en un indicador denominado Índice de Ubicación y Altura (IUA), el cual es utilizado para obtener una relación no lineal con la precipitación para poder extrapolarla y así estimarla a nivel de

cuenca. La ecuación que refleja esta relación produce el producto reportado en la Figura III-19, extraída del informe elaborado por Amphos21(CORFO-Amphos21, 2021).

Precipitación media anual = (11,92 * IUA^2) - (89,94 * IUA) + 172,63

$$IUA = \left(\frac{N - N*}{300} + \frac{E - E*}{200} + z\right) * \frac{1}{1.000}$$

Donde N representa la coordenada Norte en la proyección y el Huso descrita y E la coordenada Este, z corresponde a la elevación desde el modelo de elevación digital mientras que N* = 7.000.000 y E* = 350.000.

Al aplicar esta ecuación sobre el modelo de elevación digital STRM reportado en la geodatabase del proyecto SIG de los entregables (que permite obtener las coordenadas en proyección UTM huso 19 Sur de cada una de las celdas del modelo de elevación para calcular el IUA) se puede construir un mapa con las precipitaciones anuales distribuidas para toda la cuenca.

Si bien este producto resuelve la precipitación media anual esperada, el área que abarca no comprende la delimitación de cuenca publicada por el Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH, 2014), de modo que se debió expandir espacialmente el producto.

Para ello, se generó un buffer de 1 km desde los límites de la cuenca y se espacializó la precipitación media anual basado en la relación IUA y los valores de precipitación de las estaciones. Este producto presenta coherencia con el que AMPHOS21 publicó originalmente dado que solo es una expansión espacial del método hacia zonas de la cuenca que actualmente presentan catchments (Figura III-19).

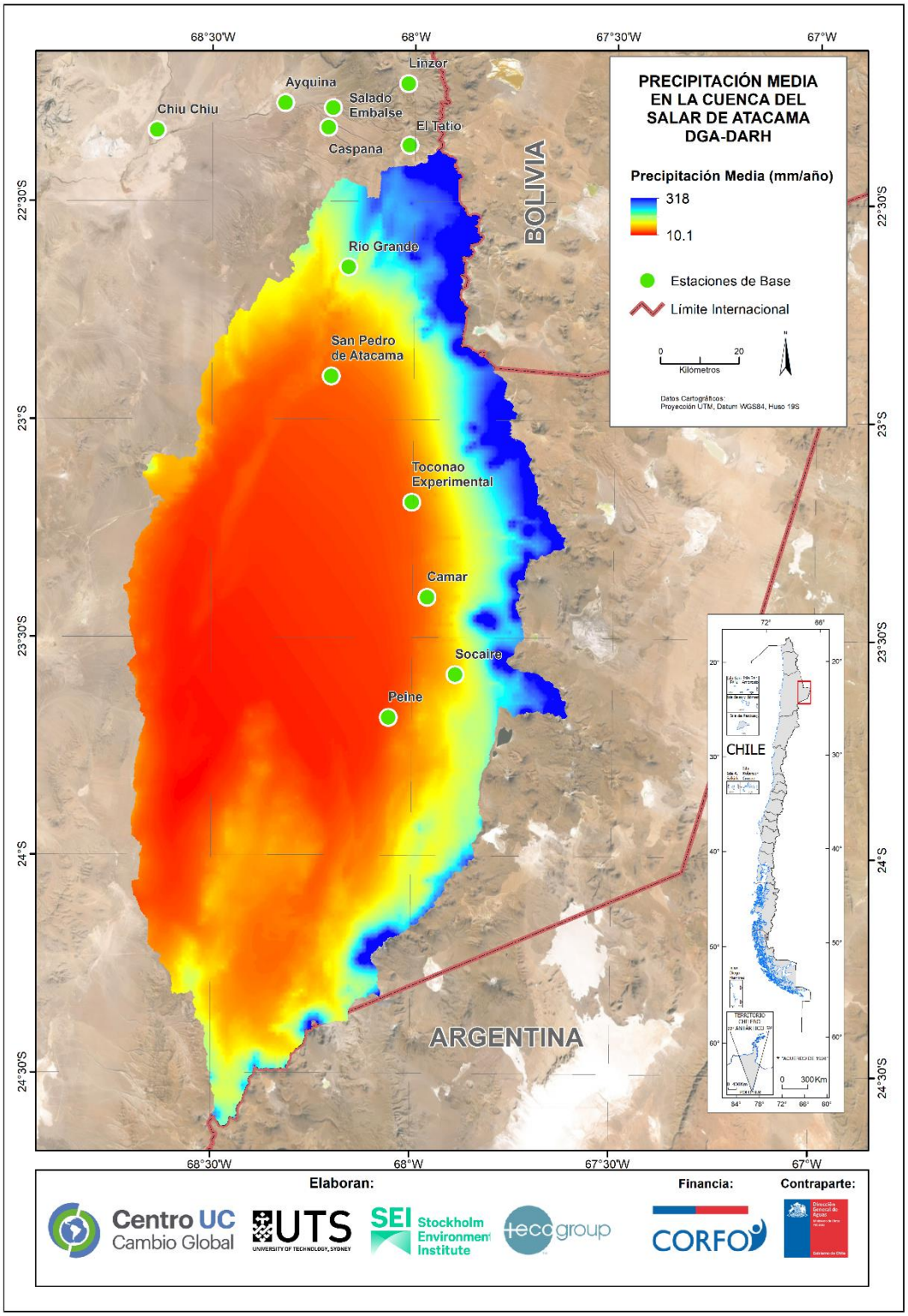


Figura III-19**:** Re-espacialización del producto de isolíneas de precipitación mediante el IUA para los límites de la cuenca del Salar de Atacama en base a la delimitación DARH.
Fuente: Elaboración propia.

Con este producto elaborado, es posible establecer relaciones con las estaciones de base para obtener series de precipitación en cada uno de los catchments definidos en base a las estaciones índice que se definirán a continuación.

Relleno de información de precipitaciones en estaciones índice

Con el objeto de completar el registro de series en las estaciones de base, y poder luego asignar un número específico de ellas, como estaciones índice representativas, a cada uno de los catchments, en primer lugar, se establecen las relaciones entre las observaciones de las estaciones de base analizadas para poder realizar un relleno de datos.

Este relleno, agrega los registros diarios a escala mensual para el periodo 1979-2018, a partir de la suma de los registros/observaciones por mes en las 12 estaciones de base. Para que exista valor consistente en el mes-año que corresponda, solo se considera mes completo si contiene al menos 25 observaciones válidas, sumándose los valores correspondientes, de lo contrario el valor correspondiente queda en vacío.

Con las series mensuales agregadas, se obtiene una matriz de coeficientes de determinación (R^2, el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson) para identificar aquellas estaciones con mayor similitud estadística. Luego, se identifica el número de observaciones totales con las cuales se calcula la correlación entre los distintos pares de estaciones, de modo de identificar aquellas correlaciones altas que puedan atribuirse a comparaciones de bajas cantidades de datos, y tenerlas en consideración para asignarlas a rellenar otra estación, por ejemplo. La Tabla III-8 muestra este comportamiento para el caso del R^2 y la Tabla III-9 para el número de observaciones coincidentes desde el cual se obtiene la correlación.

Tabla III-8: Coeficiente de Determinación entre series mensuales de precipitación para 12 estaciones índice en la cuenca del Salar de Atacama.

R^2	Linzor	Ayquina	Salado	Caspana	Chiuchiu	Tatio	RG*	SPA	Toconao*	Camar	Socaire	Peine
Linzor	-											
Ayquina	0,55	-										
Salado	0,67	0,81	-									
Caspana	0,65	0,86	0,86	-								
Chiuchiu	0,17	0,20	0,27	0,32	-							
Tatio	0,86	0,63	0,71	0,65	0,20	-						
RG*	0,68	0,69	0,69	0,79	0,25	0,69	-					
SPA*	0,28	0,55	0,48	0,42	0,14	0,34	0,50	-				
Toconao*	0,41	0,51	0,45	0,54	0,21	0,36	0,67	0,36	-			
Camar	0,47	0,62	0,56	0,61	0,22	0,48	0,69	0,36	0,76	-		
Socaire	0,50	0,50	0,47	0,54	0,22	0,59	0,56	0,30	0,59	0,76	-	
Peine	0,22	0,44	0,30	0,35	0,20	0,28	0,35	0,32	0,45	0,54	0,54	-

Notas: *RG: Rio Grande; *SPA: San Pedro de Atacama; *Toconao: Toconao Experimental

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III-9: Número de observaciones con el cual se realizan las correlaciones para obtener los valores del coeficiente de determinación.

N	Linzor	Ayquina	Salado	Caspana	Chiuchiu	Tatio	RG*	SPA	Toconao*	Camar	Socaire	Peine
Linzor (416)	-											
Ayquina (470)	411	-										
Salado (442)	399	435	-									
Caspana (350)	337	347	344	-								
Chiuchiu (471)	413	461	434	347	-							
Tatio (445)	391	437	417	329	438	-						
RG (476)	414	467	440	348	467	443	-					
SPA (192)	167	187	188	117	191	188	191	-				
Toconao (352)	337	349	342	343	350	327	350	117	-			
Camar (478)	416	469	442	350	469	445	476	192	352	-		
Socaire (448)	396	441	424	341	440	418	446	184	342	448	-	
Peine (473)	413	463	437	348	470	439	469	191	352	471	442	-

Notas: *RG: Rio Grande; *SPA: San Pedro de Atacama; *Toconao: Toconao Experimental. Entre paréntesis se muestra el número total de observaciones a escala mensual agregada por estación.

Fuente: Elaboración propia.

En base a estos resultados, y aplicando un modelo de regresión lineal de carácter recursivo, vale decir, una estación rellenada que quede incompleta puede ser completada con otra siempre que su coeficiente de determinación sea al menos 0,6 (para no aumentar excesivamente el sesgo). Si la correlación sigue siendo alta de una estación rellenada con otra que aún posea vacíos, se utilizará para completar otras estaciones siempre que respete el umbral mínimo de R^2. El algoritmo continúa hasta completar todos los registros a escala mensual. En síntesis, y de forma secuencial, el procedimiento opera de la siguiente manera:

- Ayquina es rellenada por Río Grande.
- Socaire es rellenada por Camar. Los vacíos restantes son rellenados por Peine.
- El Tatio es rellenada por Río Grande. Las celdas que queden sin relleno son rellenadas por Ayquina rellena.
- Salado Embalse es rellenado por Ayquina rellena. Los vacíos restantes son rellenados por Río Grande. Si aún existen vacíos y se rellenan con El Tatio.
- Linzor es rellenada por Río Grande. Si quedan celdas sin rellenar se completan con El Tatio. Los vacíos restantes son rellenados por la serie rellena de Salado Embalse.
- Toconao es rellenada por Camar. Si existen celdas por rellenar aún el relleno se hace con Río Grande.
- Caspana es rellenada por Ayquina rellena. Observaciones faltantes son rellenadas por Río Grande.
- San Pedro de Atacama es rellenada por Ayquina rellena. Los vacíos remanentes son rellenados por Toconao.
- Río Grande es rellenada por Camar.
- Peine es rellenada por Camar.

En aquellas estaciones que aun posean registros sin completar, estos se rellenan utilizando el valor de la estación más cercana solo si este corresponde a 0, si el valor es distinto de cero se debe revisar el R^2 con esta estación cercana, y si este es mayor que 0,6, se usa la regresión correspondiente para rellenar, de lo contrario se usa la mediana del mes correspondiente de la misma estación incompleta. La Figura III-20 muestra para 4 estaciones asociadas a la cuenca (El Tatio se encuentra fuera de los límites) la curva estacional de las precipitaciones medias de las series rellenas agregadas a nivel mensual.

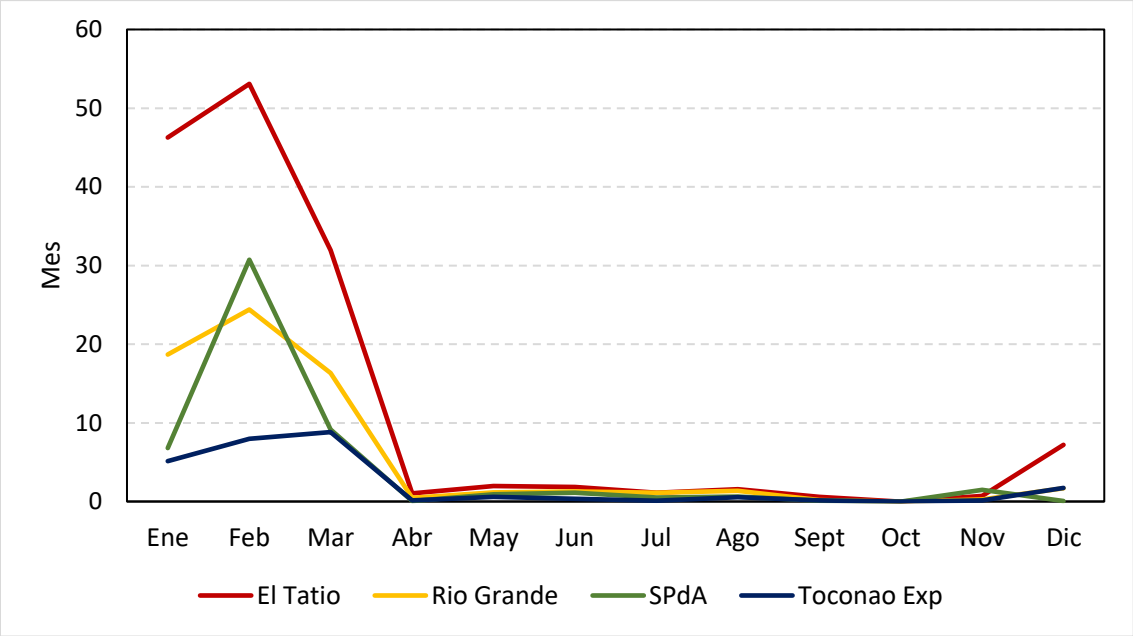


Figura III-20: Curva estacional de precipitaciones en series completas (con vacíos rellenos) agregadas a escala mensual en cuatro de las estaciones índice de la cuenca del Salar de Atacama.
Fuente: Elaboración propia.

Con las series de precipitación mensual completas para el periodo de estudio en las 12 estaciones, se procede a la expansión diaria de los registros. Este considera una redistribución de los valores considerando las ocurrencias en la estación rellenadora. Vale decir, la rellenadora posee eventos de precipitación que deben reproducirse en la rellenada, pero escalando sus valores de forma tal que la suma mensual sea igual a la obtenida desde el modelo de relleno. Esto se hace para todas las estaciones que corresponda.

No obstante, pueden existir casos especiales en donde si se realizó un relleno a partir de estaciones previamente rellenadas, no habrá observaciones en el diario de la rellenadora, en ese caso, se ocupa la secuencia de la estación con observaciones más cercana. En el caso de discrepancias dado que en la rellenadora ocurrieron menos de 25 registros, se escala sobre esos valores dejando el resto en cero.

Procedimiento de obtención de series de precipitación en los catchments

Para obtener las series de precipitación corregidas en cada uno de los catchments, el procedimiento considera escoger dentro de las estaciones de base rellenas, aquellas representativas, las cuales son denominadas "estaciones índice", que puedan caracterizan la cuenca en base a 2 criterios:

1) El primer criterio de asignación es utilizar estaciones que se encuentren en una banda de elevación definida según umbrales asociados a montos de precipitación. Se consideran para este efecto tres bandas de elevación: bajo (bajo los 3.000

m.s.n.m.), intermedio (entre los 3.000 y bajo los 4.000 m.s.n.m.) y alto (sobre los 4.000 m.s.n.m.).

2) El segundo criterio de asignación corresponde a la estación dentro de la banda de elevación que se encuentre más cercana al catchment.

La Figura III-21 muestra las estaciones de precipitación (rellenas) que han sido utilizadas en los distintos catchments asignados basado en los dos criterios descritos con anterioridad. En base a ello seleccionaron 7 estaciones cuyas series temporales de precipitación fueron utilizadas para obtener la pluviometría histórica en cada una de estas áreas de acumulación. Para catchments bajo los 3.000 m.s.n.m. se utilizan las estaciones Peine, Camar, San Pedro de Atacama y Toconao Experimental, en la banda de elevación intermedia las estaciones Socaire y Rio Grande fueron empleadas, y en la banda sobre los 4.000 m.s.n.m. se utilizó la estación El Tatio, la única de este grupo de estaciones que se encuentra fuera de los límites de la cuenca.

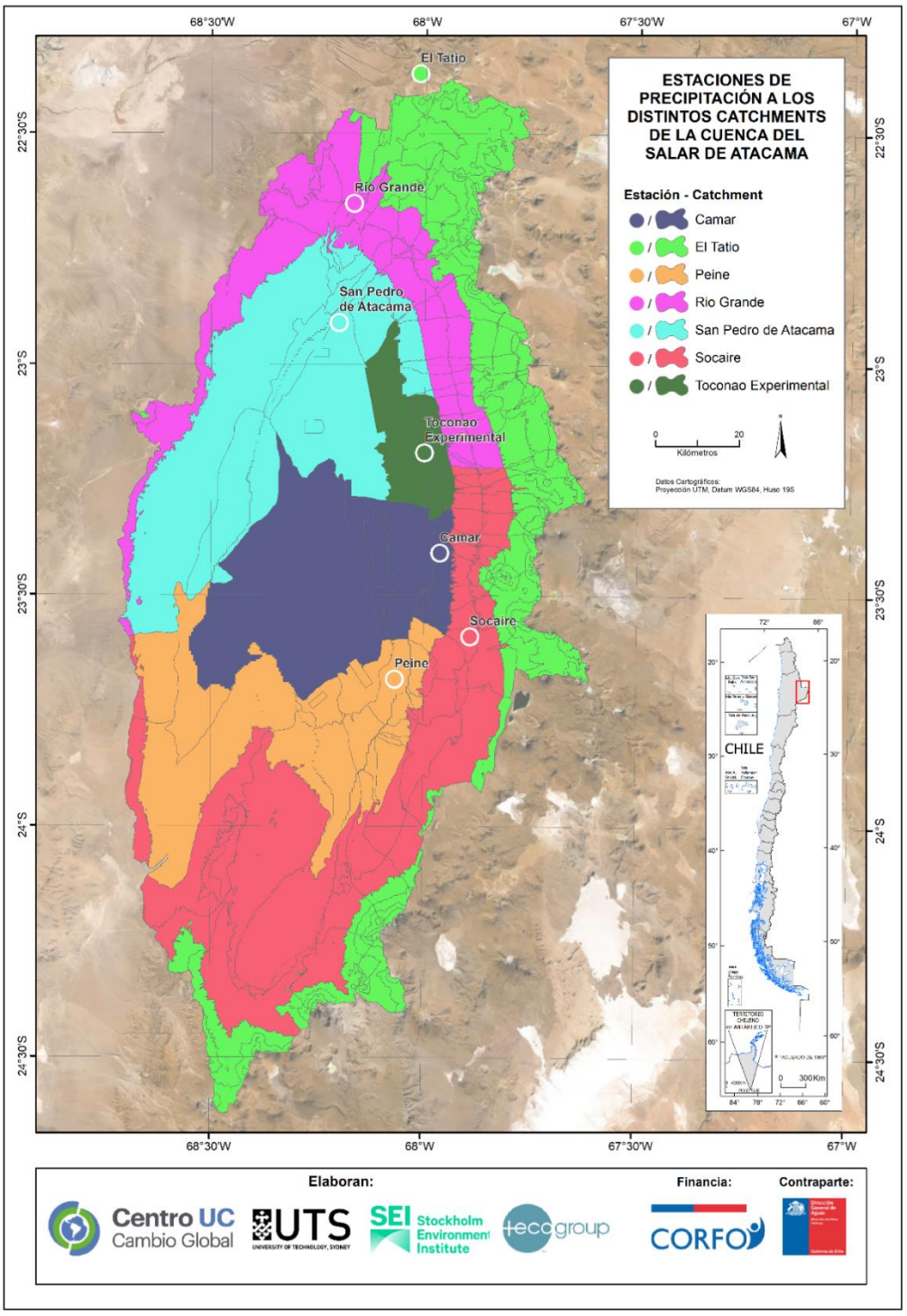


Figura III-21: Asignación de estaciones de precipitación a los distintos catchments que componen la cuenca del Salar de Atacama.

Nota: Se destacan en los polígonos las 7 estaciones índice utilizadas para la obtención de las series de precipitación en cada catchment respecto del total de estaciones de base analizadas para completar los vacíos de información.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, con las estaciones asignadas a los catchments definidas, se obtiene desde el producto espacial de AMPHOS21 de isosuperficie de precipitación expandido a los límites de la delimitación DARH, el valor agregado medio de precipitación anual para cada una de estas áreas de acumulación. La serie de tiempo histórica de precipitación (1979-2018) del catchment i se calcula finalmente desde la serie de la estación índice rellena j correspondiente a esta área multiplicada por la razón existente entre la precipitación agregada en aquel catchment y la media anual de precipitaciones las observaciones en la estación correspondiente.

$$Serie\ pp\ catchment_i = Serie\ pp\ rellena\ estación\ índice_j * \frac{Pp\ media\ anual\ AMPHOS\ en\ catchment_i}{Pp\ media\ anual\ estacion\ índice_j}$$

b) Temperatura

En el caso de la obtención de series de temperatura (mínima y máxima) para cada uno de los catchments generados en la cuenca del Salar de Atacama, se aplica un procedimiento de corrección de sesgo a la serie resultante de la agregación espacial del producto CR2Met versión 2.0 (DGA, UCh y PUC, 2017) en el catchment correspondiente, mediante la adición de un delta mensual en base a la diferencia entre las observaciones de las estaciones índice correspondientes y el producto grillado.

Estaciones índices de temperatura

Al igual que en precipitaciones, la selección de estaciones índice de temperatura requirió resolver criterios de cercanía y similitud con cada catchment correspondiente, en desmedro de una caracterización por elevación dada la cantidad de registros disponibles y en favor tanto de una caracterización con un componente más cardinal, dividiendo a los catchments en zonas norte, sur, oriente y poniente. Cabe mencionar, que sobre esta variable no se realizó un procedimiento de relleno de series, dado que en primer lugar el número de estaciones disponibles con información suficiente en el periodo 1979-2018 es menor respecto de las de precipitación (solo considerando información DGA), y luego, debido a que la información que estas estaciones contienen no es espacialmente densa para caracterizar toda la superficie de la cuenca del Salar de Atacama. Por ese motivo, y dada su coherencia espacio-temporal con las observaciones (a diferencia de lo que ocurría con temperatura) para esta variable se una como entrada el producto CR2Met versión 2.0.

Bajo esa perspectiva, se asignó la estación El Tatio a los catchments de la parte norte de la cuenca, Peine en el sector sur, Toconao Experimental en el oriente y San Pedro de Atacama en la zona poniente (Figura III-22).

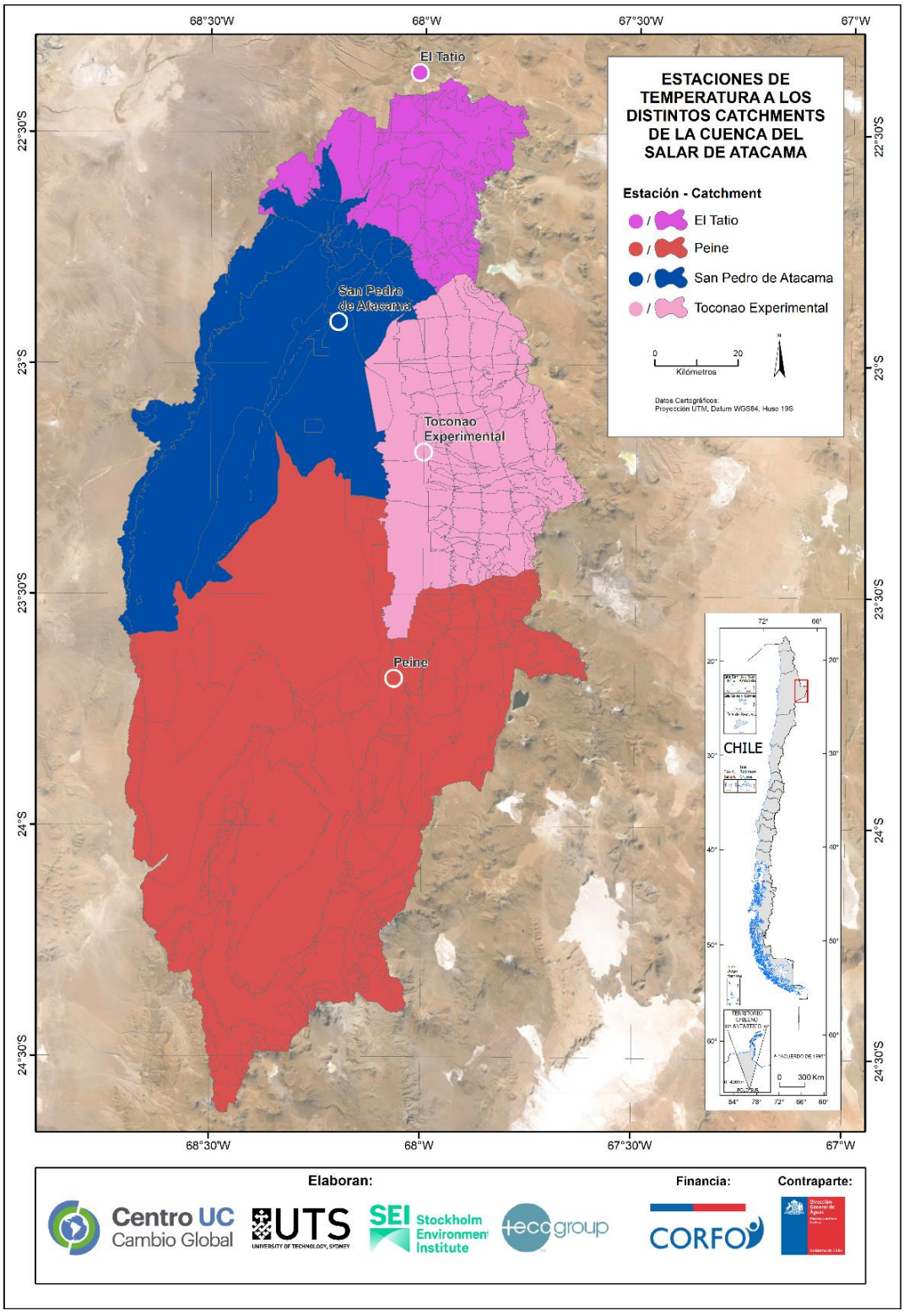


Figura III-22: Asignación de estaciones de temperatura a los distintos catchments que componen la cuenca del Salar de Atacama. Se destacan en los polígonos las 4 utilizadas para la corrección de sesgo en las temperaturas extremas del producto CR2Met.

Fuente: Elaboración propia.

Producto CR2Met

El producto meteorológico CR2met (DGA, UCh y PUC, 2017) corresponde a un modelo grillado espacial que incluye series temporales de variables de temperaturas extremas, precipitaciones, humedad relativa y velocidad del viento, obtenidas en base a información de estaciones junto con imágenes satelitales e información de reanálisis, y validadas con observaciones no utilizadas en la construcción de los modelos.

Los productos de precipitación y temperatura corresponden a espacializaciones en Chile continental de las observaciones en base a relaciones estadísticas basadas en regresiones lineales con productos MODIS de temperatura superficial y de los reanálisis ERA-Interim y ERA5, para un periodo entre enero de 1979 y diciembre de 2018 en la versión 2 del producto. Adicionalmente en el trabajo de Actualización del Balance Hídrico (DGA, UCh y PUC, 2017) y el Atlas de Riesgo Climático (https://arclim.mma.gob.cl/) se han construido series de tiempo sobre la misma grilla, pero en base a proyecciones climáticas futuras lo que resulta especialmente valioso para el trabajo que debe realizarse en el presente estudio.

En el caso de los productos de humedad relativa y viento, estos corresponden a reducciones de escala de productos similares del reanálisis ERA-Interim. En específico, se añaden variables particulares, como el resultado espacializado de temperatura mínima para la obtención de humedad relativa, y los resultados del explorador eólico (http://eolico.minenergia.cl/) para conseguir resultados de velocidad de viento a 2 metros.

La resolución horizontal del modelo es de 0,05 x 0,05°[49], de modo que, en la cuenca del Salar de Atacama, cada celda del modelo representa una resolución[50] media de aproximadamente 28,4 km^2.

Procedimiento de obtención de series de temperaturas extremas en los catchments

Tanto para temperatura mínima como para temperatura máxima, el procedimiento de corrección de sesgo se aplica de forma similar. Este implica en primer lugar obtener el valor de las observaciones a escala diaria para el periodo 1979-2018 en las 4 estaciones índice seleccionadas. Luego, y en base a la coordenada latitud/longitud (WGS84) de ubicación de la estación se obtienen las series CR2Met de las 4 celdas más cercanas, para obtener una serie en la ubicación de la estación mediante interpolación por el método del Inverso Ponderado de la Distancia (IDW, por sus siglas en inglés).

Luego, las series observadas y del modelo se agregan para cada variable a escala mensual con objeto de obtener los coeficientes de corrección de sesgo, calculados como la

[49] El concepto de grado en este contexto tiene una interpretación sexagesimal, en donde cada grado (°) representa un ángulo corresponde a la razón 1/360 sobre una circunferencia. En términos prácticos, desde el ecuador a los polos existen 90°.

[50] Existe variabilidad de equivalencia de unidades de carácter geodésico (en °) con aquellas planimétricas (en m)., 1° de latitud en el Ecuador es equivalente a 110,57 m mientras que en los polos 111,7 m.

diferencia simple entre la media mensual de las observaciones y la del CR2Met interpolado en la coordenada de la estación, para cada mes y en cada estación. La Tabla III-10 muestra los sesgos (°C) entre observaciones y modelo por mes. Se aprecia que el modelo CR2Met tiende a sobreestimar los valores de temperatura mínima y a subestimar los valores de temperatura máxima. No se aprecia una señal evidente generalizada de estacionalidad en el sesgo tanto en las mínimas como en las máximas, pero en las estaciones El Tatio y San Pedro de Atacama los sesgos en meses de invierno son aún más negativos que en el resto de los meses para temperatura mínima. En las máximas la estación El Tatio se desprende más del sesgo positivo de las otras tres estaciones, aunque se debe considerar que es la estación que se encuentra ubicada a mayor altura (4.370 m.s.n.m.), aunque fuera de los límites de la cuenca.

Tabla III-10: Coeficientes de corrección de sesgo mensual para temperatura mínima y máxima basados en la diferencia entre CR2Met y observaciones en estaciones índice.

	Tmin				Tmax			
Mes	**El Tatio**	**SPA**	**Toconao**	**Peine**	**El Tatio**	**SPA**	**Toconao**	**Peine**
Ene	-0,61	-1,63	-0,46	0,73	2,54	1,62	0,61	1,86
Feb	-0,29	-1,20	-0,45	0,49	2,55	1,79	0,63	1,52
Mar	-0,23	-0,56	-0,54	0,25	2,79	2,10	0,46	1,67
Abr	-0,29	-0,28	-0,05	0,00	2,77	3,29	1,18	2,17
May	-1,27	-1,54	0,42	0,08	2,70	1,57	1,35	2,24
Jun	-1,32	-2,11	-0,19	-0,36	2,77	0,76	0,29	1,50
Jul	-2,35	-3,01	0,13	-0,15	3,11	0,89	-0,40	0,90
Ago	-2,41	-2,50	0,34	-0,06	2,17	1,03	0,33	0,74
Sep	-0,58	-2,33	-0,57	-0,78	2,95	0,72	-0,21	1,02
Oct	-0,31	-1,96	-0,23	-0,26	2,94	0,90	0,38	1,48
Nov	-0,87	-2,08	-0,19	-0,02	2,69	1,19	0,55	1,84
Dic	-0,58	-0,84	0,68	0,95	2,72	1,62	1,42	2,00

Fuente: Elaboración propia

Con los coeficientes de corrección de sesgo obtenidos, se procede a la obtención de la serie agregada CR2Met de temperatura mínima y máxima en cada catchment, la que será corregida aplicando el sesgo correspondiente según la estación que se asigne al catchment respectivo, tal como se representó en la Figura III-22.

Para que la serie CR2Met dentro del catchment sea consistente, se obtuvo el porcentaje del área de cada celda CR2Met que se inscribe dentro de la superficie de cada catchment, con objeto de ponderar el peso que cada celda del modelo tiene sobre el valor final de la serie en el área de acumulación respectiva. La Figura III-23 ejemplifica lo expuesto para uno de los 245 catchments laterales definidos.

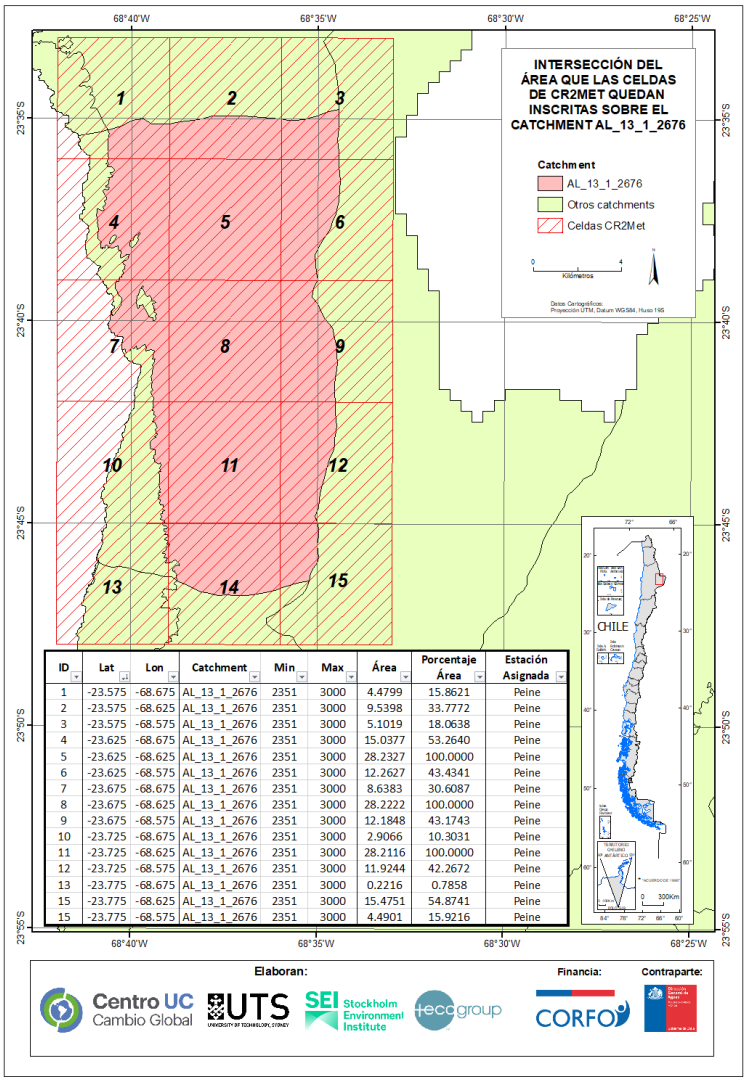
Con las series CR2Met de temperaturas (STCR2Met) extremas de cada una de las celdas j que forman parte de los catchments i, y los porcentajes de área presentes en cada una de ellas (w_j), el valor de temperatura mínima o máxima en un día h, añadiendo el coeficiente de corrección de sesgo (CCS) del mes m asociado a la estación k se obtiene de la siguiente

forma:

$$Valor\ temp_{ih} = \left(\sum_j STCR2Met_{jh} * W_j\right) + CCS_{mk}\ , \forall\ j,k\ \in i \wedge \forall\ h\ \in m$$

$$donde\ W_j = \left(\frac{w_j}{\sum_j w_j}\right)\ y\ \sum W_j = 1$$

La Figura III-24 muestra el efecto del coeficiente de corrección de sesgo sobre la curva estacional de series de temperatura mínima y máxima en uno de los catchments de ejemplo que se corrige con la estación Peine.



ID	Lat	Lon	Catchment	Min	Max	Área	Porcentaje Área	Estación Asignada
1	-23.575	-68.675	AL_13_1_2676	2351	3000	4.4799	15.8621	Peine
2	-23.575	-68.625	AL_13_1_2676	2351	3000	9.5398	33.7772	Peine
3	-23.575	-68.575	AL_13_1_2676	2351	3000	5.1019	18.0638	Peine
4	-23.625	-68.675	AL_13_1_2676	2351	3000	15.0377	53.2640	Peine
5	-23.625	-68.625	AL_13_1_2676	2351	3000	28.2327	100.0000	Peine
6	-23.625	-68.575	AL_13_1_2676	2351	3000	12.2627	43.4341	Peine
7	-23.675	-68.675	AL_13_1_2676	2351	3000	8.6383	30.6087	Peine
8	-23.675	-68.625	AL_13_1_2676	2351	3000	28.2222	100.0000	Peine
9	-23.675	-68.575	AL_13_1_2676	2351	3000	12.1848	43.1743	Peine
10	-23.725	-68.675	AL_13_1_2676	2351	3000	2.9066	10.3031	Peine
11	-23.725	-68.625	AL_13_1_2676	2351	3000	28.2116	100.0000	Peine
12	-23.725	-68.575	AL_13_1_2676	2351	3000	11.9244	42.2672	Peine
13	-23.775	-68.675	AL_13_1_2676	2351	3000	0.2216	0.7858	Peine
15	-23.775	-68.625	AL_13_1_2676	2351	3000	15.4751	54.8741	Peine
15	-23.775	-68.575	AL_13_1_2676	2351	3000	4.4901	15.9216	Peine

Figura III-23: Ejemplo de intersección del porcentaje de área que las celdas del CR2Met quedan inscritas sobre el área del catchment AL_13_1_2676.
Nota: Las columnas "Lat" y "Lon" en la tabla inserta corresponden a la coordenada central de la celda CR2Met, "h Min" y "h Max" indican la altura mínima y máxima de ubicación del catchment, en m.s.n.m. La estación índice asignada a este catchment corresponde a Peine.
Fuente: Elaboración propia.

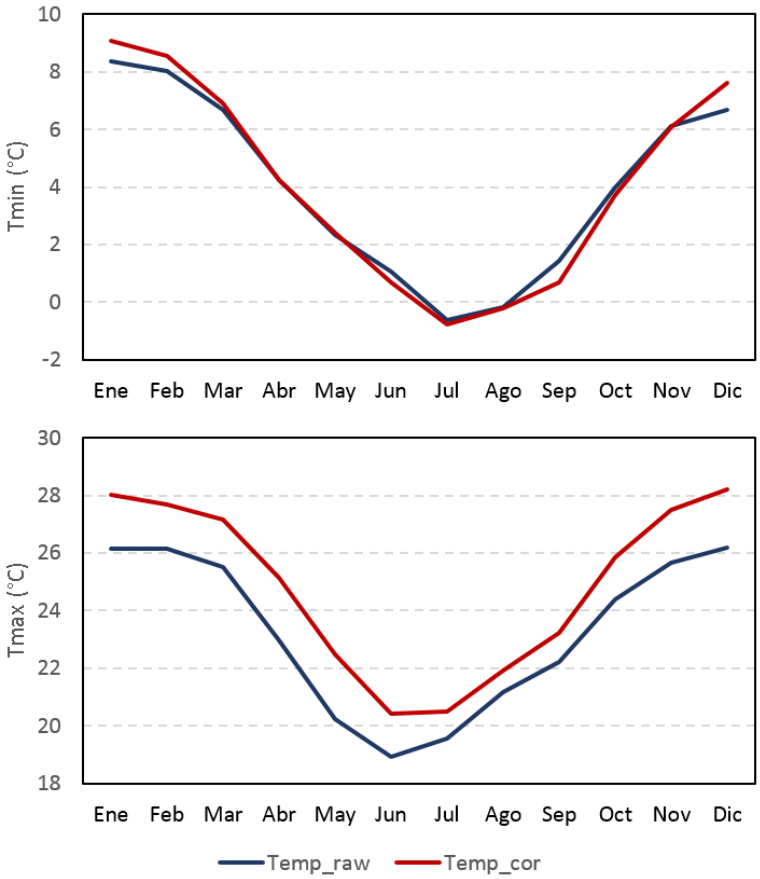


Figura III-24: Cambio en las curvas estaciones de temperatura mínima (imagen superior) y máxima (inferior) producto de la corrección de sesgo mensual.
Nota: En este caso, según la asignación de estaciones, este catchment se corrige con la estación Peine.
Fuente: Elaboración propia.

c) Otras variables climáticas

Se describe a continuación el procedimiento utilizado para definir las series históricas de las otros variables climáticas relevantes para la modelación hidrológica.

Humedad Relativa

La humedad relativa (HR) se obtiene directamente del producto CR2Met considerando la superficie de cada catchment y el porcentaje de área que cada celda posee en ella. Como concepto, la HR expresa el grado de saturación del aire a cierta temperatura, es decir, la razón entre la cantidad de agua que contiene el aire a una determinada temperatura, y la cantidad que podría contener si estuviera saturada a la misma temperatura. Matemáticamente se caracteriza por la razón entre la presión real de vapor a cierta temperatura, $e_a(T)$, y la presión de saturación de vapor, $e^0(T)$. Dado que la temperatura del punto de rocío es la temperatura a la cual el aire necesita ser enfriado para saturarlo, la presión real de vapor corresponde a la presión de saturación de vapor a

la temperatura de punto de rocío, $e^0(Tr)$. Como no se dispone de esta temperatura de punto de rocío, se utilizó el producto de temperatura mínima (Tn) en su reemplazo para el cálculo de la humedad relativa, obteniéndose e_a como la presión de vapor a temperatura media (Tm, considerando máximas y mínimas) y aplicando la siguiente ecuación a cada celda de la grilla:

$$HR = \frac{e_a}{e^0} = \frac{\exp\left(\frac{17{,}27 * Tm}{Tm + 237{,}3}\right)}{\exp\left(\frac{17{,}27 * Tn}{Tn + 237{,}3}\right)}, donde\ Tn\ reemplaza\ a\ Tr$$

En la versión 2.0 del producto (el utilizado en el presente), se hace un cambio importante al considerar la temperatura real de rocío derivado de la combinación de los reanálisis ERA-Interim y ERA-5, más una corrección de sesgo por altura que corrige valores de humedad relativa en altas elevaciones (como en el Salar de Atacama) que estima valores mayores que los reales (DGA, UNTEC y PUC, 2018).

Finalmente, dado que ya existe una caracterización del área que cada celda j del CR2Met aporta a los catchments i, las series de humedad relativa para cada uno de ellos corresponde a la combinación ponderada de las series del CR2Met de HR (SHRCR2Met) en las celdas respectivas por el peso j de cada una de ellas. La siguiente ecuación explicita lo expuesto:

$$Valor\ HR_i = \left(\sum_j SHRCR2Met_j * W_j\right), \forall\ j \in i$$

$$donde\ W_j = \left(\frac{w_j}{\sum_j w_j}\right)\ y\ \sum W_j = 1$$

La Figura III-25 muestra una comparación del producto CR2Met de Humedad relativa, obtenido mediante interpolación en las coordenadas de las estaciones San Pedro de Atacama (lat: -22,93°, lon: -68,21°), Socaire (lat: -23,59°, lon: -67,89°) y Toconao (lat: -23,19°, lon: -68,00°), operadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), con sus respectivas observaciones a escala diaria para el periodo coincidente entre septiembre de 2010 y diciembre de 2015 (definido desde la puesta en marcha de estas estaciones). Se observan buenos ajustes, con correlaciones entre medias mensuales sobre 0,9 en San Pedro de Atacama (0,98) y Toconao (0,96) pero más baja en Socaire (0,76). Respecto de la diferencia absoluta entre observaciones y estimaciones, Socaire se desvía un 6,4% entre, mientras que en las otras dos estaciones esta variación ronda el 2%. El sesgo, por su parte, indica que tanto en San Pedro de Atacama como en Socaire el modelo CR2Met subestima la humedad relativa en 1,8 y 5,3%, por su lado la tiende a sobreestimar en 2,1% en Toconao. En rigor, existen correctas aproximaciones desde el modelo para la estimación de esta variable.

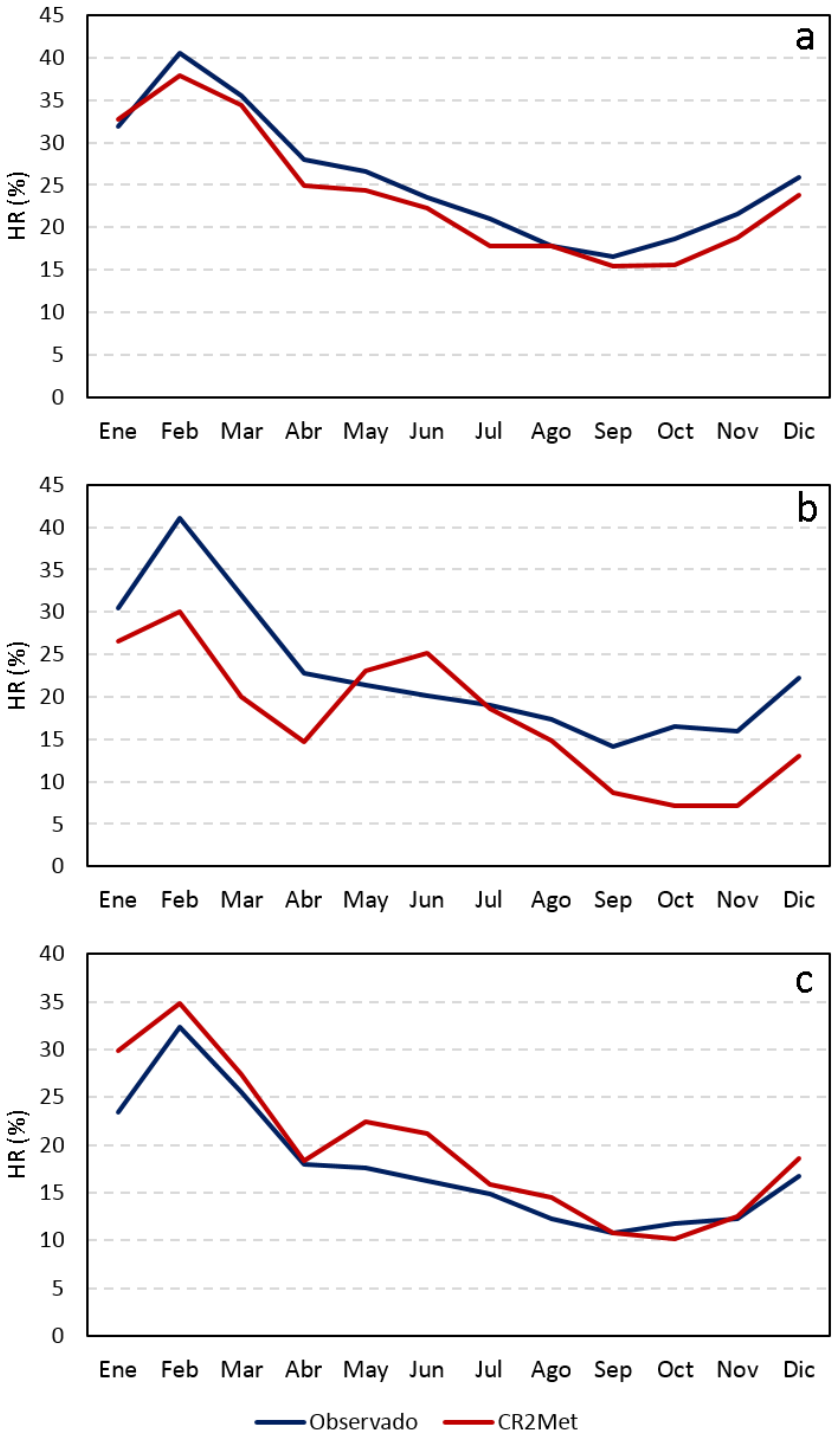


Figura III-25: Comparación entre las curvas estaciones observadas y modeladas por el producto CR2Met para la variable Humedad relativa (%), en tres estaciones ubicadas al interior de la cuenca del Salar de Atacama, y operadas por el INIA: a) San Pedro de Atacama, b) Socaire y c) Toconao. Fuente: Elaboración propia.

Velocidad del viento

La velocidad del viento (en m/s) se obtiene para cada catchment siguiendo la misma metodología que aquella aplicada para humedad relativa, que considera el área inscrita de las celdas en la superficie de aportación.

El producto CR2Met consultado para esta variable, se construye a partir de la información combinada de los reanálisis ERA-Interim y ERA5, y bajando la escala de resolución de estos modelos a la del producto analizado (0,05°) mediante la información rescatada del Explorador Eólico (http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/). Este procedimiento implica generar funciones de regresión lineal para cada celda para poder obtener las condiciones de circulación de gran escala. Si bien es una metodología que produjo resultados aceptables, presenta algunos sesgos que se han corregido.

Así, dado que ya existe una caracterización del área que cada celda j del CR2Met aporta a los catchments i, las series de velocidad del viento (U2) para cada uno de ellos corresponde a la combinación ponderada de las series del CR2Met de U2 (SU2CR2Met) en las celdas respectivas por el peso j de cada una de ellas. La siguiente ecuación explicita lo expuesto:

$$Valor\ U2_i = \left(\sum_j SU2CR2Met_j * W_j \right), \forall\ j \in i$$

$$donde\ W_j = \left(\frac{w_j}{\sum_j w_j} \right)\ y\ \sum W_j = 1$$

La Figura III-26 muestra una comparación del producto CR2Met de velocidad del viento, obtenido mediante interpolación en las coordenadas de cuatro estaciones San Pedro de Atacama (lat: -22,93°, lon: -68,21°), Socaire (lat: -23,59°, lon: -67,89°) y Toconao (lat: -23,19°, lon: -68,00°), operadas por el Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), con sus respectivas observaciones a escala diaria para el periodo coincidente entre septiembre de 2010 y diciembre de 2015. Se obtuvieron asociaciones estadísticas mixtas en cuanto al patrón estacional, con una discrepancia de correlación en San Pedro de Atacama (-0,53), una correlación positiva pero no representativa en Socaire (0,51) y una alta correlación en Toconao (0,92). Respecto de la diferencia absoluta entre observaciones y estimaciones, San Pedro de Atacama se desvía un 1,69 m/s y Toconao 1,98 m/s, la mayor diferencia se encuentra en Socaire, con 8,01 m/s. El sesgo, por su parte, indica que el modelo CR2Met en todos los casos subestima los valores observados, por consiguiente, con valores similares a los reportados a la diferencia absoluta.

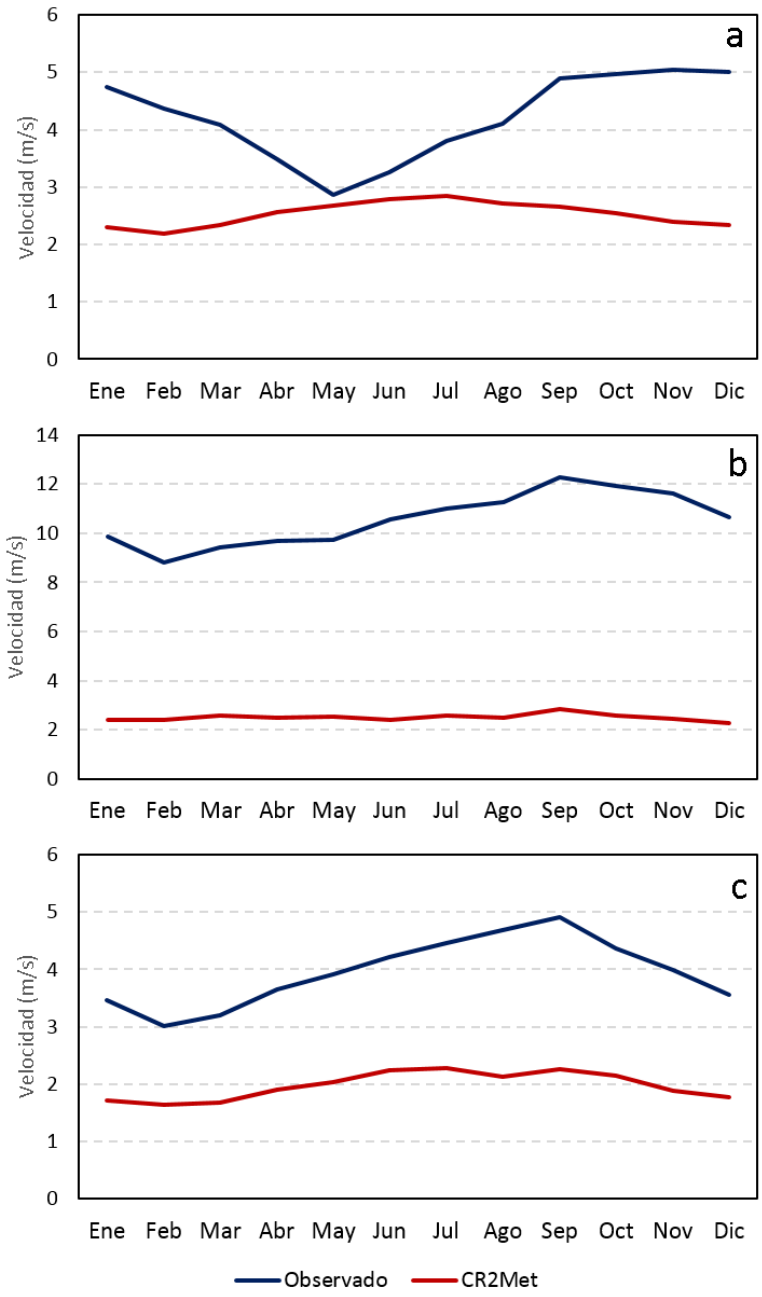


Figura III-26: Comparación entre las curvas estaciones observadas y modeladas por el producto CR2Met para la variable Velocidad del viento (m/s), en 3 estaciones ubicadas al interior de la cuenca del Salar de Atacama, y operadas por el INIA: a) San Pedro de Atacama, b) Socaire y c) Toconao.

Fuente: Elaboración propia.

En virtud de los resultados de esta variable, se establece la necesidad de hacer una corrección de sesgo en base a ciertas estaciones con información suficiente. Para ello, se utilizan las mismas estaciones INIA usadas en la comparación anterior, asignándolas a distintos catchments en la cuenca en base a criterios de distancia.

III.4.2.3.2 Clima futuro

a) Introducción: disponibilidad de información

En Chile se han realizado estudios encargados por instituciones públicas que han evaluado distintas alternativas de proyecciones futuras de cambio climático incluyendo metodologías de reducción de escala para evaluarlos a una escala local. Estas alternativas con reducción de escala permiten obtener las condiciones hidrometeorológicas que se requiere posteriormente para evaluar los impactos en distintos sectores como por ejemplo la disponibilidad de agua o efectos productivos en el sector silvoagropecuario entre otros.

Dentro de estos proyectos se destacan principalmente tres: a) La Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, UCh y PUC, 2017), el cual evaluó en distintas macrozonas, y a nivel de cuenca, el impacto de cuatro modelos GCM[51] para el escenario más severo (RCP 8.5[52]) impactos sobre balance hídrico; b) El estudio "Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile" (MMA, 2019), evalúa los impactos del cambio climático en 21 modelos para el escenario RCP 8.5 sobre el nivel medio del mar y ocurrencia de eventos extremos para el periodo 2026-2045, en las comunas costeras de Chile continental e insular; y c) Finalmente, el proyecto "ARClim: Atlas de Riesgos Climáticos para Chile" (Pica-Téllez et al., 2020), el cual reporta a nivel comunal distintas métricas e indicadores asociadas al riesgo climático en función de la exposición, amenaza y sensibilidad que el sistema analizado posee, los cuales son reportados en distintos mapas de riesgo.

Lo relevante, es que estas 3 iniciativas basan sus análisis en la regionalización de condiciones climáticas históricas incluyendo el producto grillado CR2Met (Boisier et al., 2018), y técnicas estadísticas de *downscaling* para obtener series de temperaturas extremas, precipitación, viento, humedad relativa y otras variables a una resolución espacial de 0,05°, para en escenario RCP8.5.

En particular, el proyecto ARClim consideró una expansión de la cantidad de modelos a los cuales se les aplicó el procedimiento de *downscaling* estadístico desde los 4 modelos originales utilizados en los proyectos de Balance Hídrico. En ese sentido, existe un total de 26 modelos para los cuales se obtuvieron series climáticas para temperaturas extremas y precipitación a una escala diaria. Esta es la base más completa de proyecciones climáticas llevados a una escala operativa suficiente para realizar impactos del cambio climático en Chile. Teniendo como base este conjunto de modelos, considerando adicionalmente aquellos en los que existe coincidencia entre modelos para las variables de temperaturas,

[51] Los GCMs (Modelo de Circulación General o Modelos de Clima Global) son modelos numéricos capaces de evaluar el efecto que los cambios en los forzamientos climáticos (concentración de gases de efecto invernadero, irradiancia solar, etc.) producen en un gran número de variables a escala global.

[52] Una trayectoria de concentración representativa (o RCP por sus siglas en inglés) es una trayectoria de concentración de gases de efecto invernadero (no de emisiones) adoptada por el IPCC. En el Quinto Informe del IPCC del 2014 se utilizaron cuatro RCP: 2,6, 4,5 6,0 y 8,5, reflejando niveles crecientes de forzamiento radiativo.

precipitación, humedad relativa y viento, en el presente estudio, se dispone de 18 modelos GCM para el escenario severo de cambio climático (RCP 8.5) para la grilla regular de 0,05° del CR2Met.

Estos son las alternativas de proyecciones climáticas futuras que se analizan a continuación. Estos modelos comprenden un periodo de tiempo establecido entre 1970 y 2069, identificándose 2 periodos de contraste para establecer los patrones de cambio de variables climáticas atribuibles a un contexto de cambio climático: 1980-2010 (en concordancia con lo establecido en el proyecto ARClim para sus proyecciones (Pica-Téllez et al, 2020)) como periodo histórico de control y 2035-2065 como periodo futuro[53].

Pese a que una alta disponibilidad de modelos ayuda a evaluar el grado de incertidumbre de la variable a analizar hacia el futuro, en ciertos contextos, por propósitos pragmáticos en el manejo de proyecciones, es necesario seleccionar un número reducido de estos que sirvan para representar condiciones futuras características. En ese sentido, la selección de modelos definitivos debe considerar en primer lugar alternativas de proyecciones climáticas futuras dispersos respecto de sus predicciones, que ayuden a generar contraste entre los resultados, y, en segundo lugar, que su periodo de control tenga sesgos reducidos al compararse con las condiciones meteorológicas observadas para el periodo histórico.

A continuación, se describen primero la propuesta de análisis de sesgo y dispersión que sirve para el proceso de selección de modelos GCM. Tomando en cuenta este proceso de selección de modelos en las siguientes secciones se explican los métodos utilizados para la construcción de series futuras de las distintas variables climáticas.

b) Análisis de sesgo y dispersión para la selección de modelos GCM

Los trabajos de dowscaling recién explicados, remueven en parte del sesgo asociado a las diferentes escalas o limitaciones en la representación de condiciones atmosféricas específicas a una cierta localidad, sin embargo, es posible que este sesgo se mantenga y sea considerado en una selección de modelos GCM para posterior uso en análisis hidrológicos.

De modo de poder hacer una selección de modelos representativos para evaluarlos en sus series temporales en el modelo hidrológico, primero se realiza una caracterización de la dispersión de los resultados a través del análisis de deltas de cambio para las variables de temperaturas y precipitación en cada uno de los 18 modelos agregados en las celdas de 0,05° de la cuenca del Salar de Atacama.

Por este motivo, y en base a las 679 celdas de la grilla CR2Met que consideran algún sector del polígono que delimita la cuenca, se calculan los promedios climatológicos para el periodo histórico (1980-2010) y futuro (2035-2065) para toda la superficie de la cuenca para la precipitación total anual y el promedio anual de las temperaturas mínima y máxima.

[53] Se espera obtener en el corto plazo las series completas continuas para estas mismas proyecciones climáticas futuras.

Posteriormente se calculan los deltas de cambio asociados a las variables de precipitación y temperaturas extremas. La Tabla III-11 muestra las diferencias entre los 2 periodos expuestos para cada una de las variables en los 18 modelos mencionados. En términos de precipitación se muestran los cambios (en mm y %) apreciándose en general cambios positivos que indican aumentos en precipitación hacia el futuro. La excepción corresponde a los modelos: CMCC-CM y CSIRO-Mk3-6-0. En cuanto a las temperaturas extremas, todas presentan incrementos hacia el futuro, con un promedio de modelos de 2,66°C en el caso de las temperaturas mínimas y 2,51°C en el caso de las máximas. La Figura III-27 presenta gráficamente lo expuesto en la Tabla III-11 respecto los cambios en temperatura media (delta en °C[54]) y precipitación (delta en milímetros y %).

[54] Delta, en el contexto expuesto, corresponde al cambio en la magnitud de la variable (temperatura o precipitación) en su valor medio para el periodo futuro respecto del periodo histórico. Se reporta, en la unidad de la variable, como la diferencia simple entre ambos periodos (futuro – histórico), o en variación porcentual como el cociente entre este delta y el valor del periodo histórico, multiplicado por 100 (((futuro – histórico)/histórico)*100).

Tabla III-11: Cambios en precipitación y temperaturas para distintos GCM en la cuenca del Salar de Atacama.

	Precipitación (mm/año)				Temperatura mínima (°C)			Temperatura máxima (°C)		
Modelo	**Histórico**	**Futuro**	**Delta (mm)**	**Delta (%)**	**Histórico**	**Futuro**	**Delta (°C)**	**Histórico**	**Futuro**	**Delta (°C)**
ACCESS1-3	28,55	35,99	7,44	26,06	1,28	4,11	2,83	17,29	20,32	3,03
BNU-ESM	23,97	28,38	4,41	18,42	1,35	4,53	3,19	17,43	19,58	2,15
CanESM2	27,88	43,07	15,19	54,48	1,26	4,09	2,83	17,34	19,93	2,59
CMCC-CESM	25,20	52,82	27,62	109,58	1,34	4,11	2,77	17,40	20,23	2,82
CMCC-CM	27,33	22,32	-5,01	-18,35	1,33	4,27	2,94	17,31	20,39	3,08
CNRM-CM5	25,97	46,18	20,21	77,80	1,27	3,29	2,02	17,43	18,66	1,23
CSIRO-Mk3-6-0	28,21	16,65	-11,55	-40,96	1,38	3,80	2,42	17,34	21,07	3,73
GFDL-ESM2G	28,84	277,70	248,86	862,85	1,29	5,13	3,84	17,23	18,87	1,64
GFDL-ESM2M	25,68	77,48	51,80	201,72	1,08	4,18	3,10	17,46	19,30	1,84
inmcm4	28,38	34,93	6,55	23,09	1,39	2,33	0,94	17,36	19,02	1,66
IPSL-CM5A-MR	26,30	27,12	0,81	3,09	1,31	4,16	2,85	17,29	21,59	4,30
IPSL-CM5B-LR	28,55	38,63	10,07	35,28	1,34	3,12	1,78	17,35	19,85	2,49
MIROC-ESM	29,02	31,29	2,28	7,84	1,30	3,87	2,57	17,32	19,16	1,83
MIROC-ESM-CHEM	27,32	33,31	5,99	21,94	1,21	4,37	3,16	17,28	19,47	2,19
MPI-ESM-LR	28,82	29,01	0,19	0,66	1,20	3,92	2,72	17,20	20,49	3,29
MPI-ESM-MR	25,65	33,00	7,35	28,66	1,32	4,13	2,81	17,36	20,67	3,31
MRI-CGCM3	27,45	32,98	5,53	20,16	1,29	3,93	2,65	17,34	19,33	1,99
MRI-ESM1	25,17	25,29	0,12	0,48	1,31	3,71	2,40	17,44	19,47	2,03

Nota 1: La media de precipitaciones a nivel de cuenca por cada modelo es más baja que la reportada por el producto de isosuperficie de precipitación de CORFO-Amphos21 (2021), de 56,6 mm/año, lo que justifica el procedimiento de corrección de sesgo para la obtención de series en los modelos CMIP5 a seleccionar tanto para el periodo de control como para el futuro cercano.

Nota 2: En el Anexo 1 de la Etapa III se presenta información de los modelos GCM utilizados.

Fuente: Elaboración propia

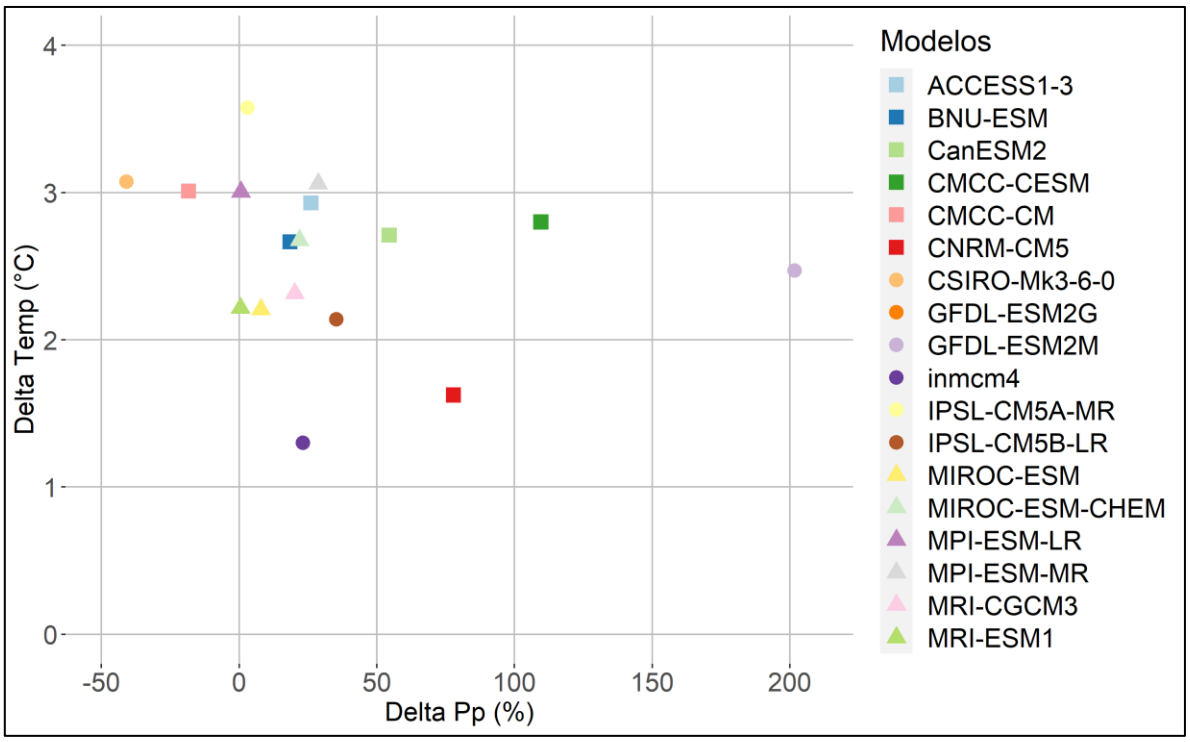


Figura III-27: Deltas de precipitación y temperatura en los 18 modelos CMIP5 disponibles contrastados entre el periodo histórico de control (1980-2010) y el futuro (2035-2065).
Nota 1: En el Anexo 1 de la Etapa III se presenta un resumen del origen de los modelos GCM utilizados.
Nota 2: no se incluye el resultado de modelo GFDL-ESM2G por estar fuera de la escala de la figura.
Fuente: Elaboración propia.

Con motivo de reducir la cantidad de modelos a utilizar considerando la potencial información redundante en ellos se plantea un análisis de sesgos basado en las proyecciones de precipitaciones que tienen una dispersión grande en resultados. El propósito es entonces, hallar aquellos modelos que mejor representen la climatología de precipitaciones del periodo de histórico (periodo control en los modelos GCM) respecto de la climatología de precipitaciones en las observaciones para el mismo periodo. Debe tenerse en consideración que los 18 modelos evaluados fueron construidos en su proceso de *downscaling* de forma tal que el sesgo implícito de ellos fue removido en base a las observaciones utilizadas para la construcción del producto CR2Met, de modo que es esperable que las series de tiempo que se extraigan de los modelos para cada punto de ubicación de las estaciones tengan una concordancia aceptable con lo que ocurre en las observaciones.

El procedimiento considera en primer lugar, obtener las series diarias para el periodo 1980-2010 de las 7 estaciones índice utilizadas en precipitación (El Tatio, Toconao, Camar, Socaire, Peine, San Pedro de Atacama, Río Grande), y mediante interpolación espacial obtener las series diarias de precipitación para el mismo periodo en la ubicación de estas estaciones, y en los 18 modelos analizados a su vez. Esta información se agrega a escala anual como la suma de las observaciones diarias y se calcula para cada combinación modelo-estación un sesgo promedio anual (SPA) como la razón entre la precipitación

media anual de la serie interpolada y la serie media anual de las observaciones.

Adicionalmente, se calcula un sesgo del coeficiente de variación (la razón entre la desviación estándar y el promedio de un conjunto de datos) (SCV) para cada combinación modelo-estación. Finalmente, tanto SPA como SCV se agregan a nivel de cuenca promediando los valores de cada indicador en cada estación para un mismo modelo. En rigor, si la climatología histórica de precipitaciones anuales de un modelo con sus observaciones es perfecta, tanto el valor de SPA como SCV será 1, vale decir, para el primer caso existe una concordancia perfecta entre los valores de las observaciones y lo que reporta el modelo mientras que, en el segundo indicador, en un caso perfecto indica que la variabilidad de la serie climatológica es idéntica, independiente de la posición (año) de los valores.

En base a lo expuesto, en el presente estudio se considera que un modelo es candidato a ser utilizado cuando en cada uno de estos 2 indicadores se encuentre dentro del rango 0,75 – 1,25, lo que implica concordancia a nivel de cuenca con lo que reportan las observaciones. La Figura III-28 gráfica la distribución de estos modelos sobre los indicadores calculados. Se aprecia que todos los modelos subestiman el promedio anual de precipitaciones, vale decir los modelos que se seleccionen deben ser corregidos por aquel sesgo para la generación de series de clima futuro a utilizar en el modelo hidrológico. Además, 16 de ellos presentan una variabilidad menor de precipitaciones entre los años respecto de la variabilidad presente en las observaciones, solo uno de ellos es más heterogéneo (BNU-ESM) y uno (CSIRO-Mk3-6-0) un ajuste prácticamente perfecto. Todos los modelos reportan en promedio menos lluvia que las observaciones

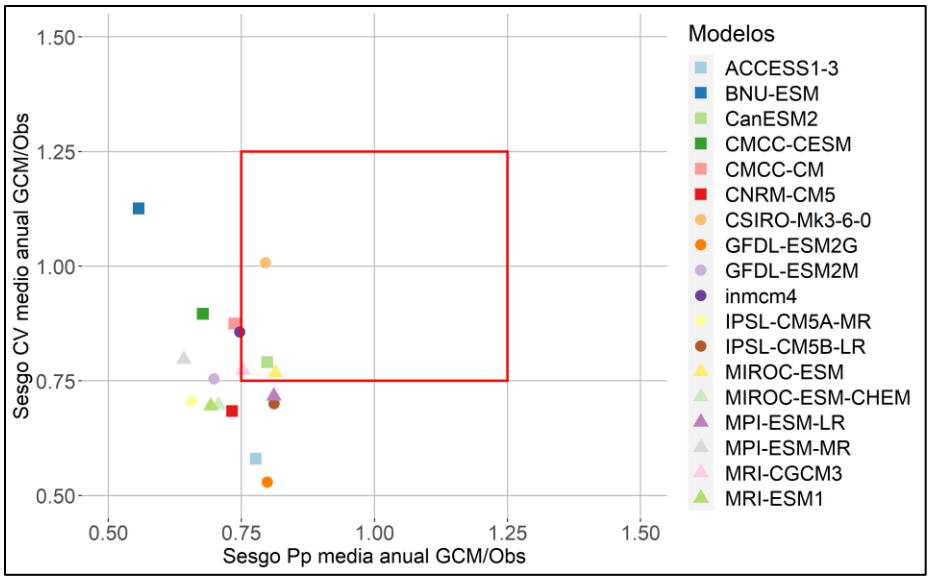


Figura III-28: Ajuste de modelos GCM para periodo control con las observaciones a nivel de cuenca para dos indicadores.

Nota: El sesgo se calcula respecto de la precipitación media anual (SPA) y del coeficiente de variación de esta precipitación anual (SCV).

Fuente: Elaboración propia.

Bajo el umbral propuesto con anterioridad, los modelos que podrían ser seleccionados como candidatos son **CanESM2, CSIRO-Mk3-6-0, inmcm4, MIROC-ESM y MRI-CGM3.** Los cambios esperados en la precipitación y temperatura promedio para estos modelos se presenta en la Tabla III-12.

Tabla III-12: Cambios en precipitación y temperaturas para GCM seleccionados

Modelo	Delta Precipitación (%)	Delta Temperatura media (°C)
CanESM2	54,48	2,7
CSIRO-Mk3-6-0	-40,96	3,1
inmcm4	23,09	1,3
MIROC-ESM	7,84	2,2
MRI-CGCM3	20,16	2,3

Fuente: Elaboración propia

Una vez seleccionados los modelos, se obtienen las series futuras de las variables de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, humedad relativa y velocidad del viento. Dado que, al igual que para la obtención de series históricas, existen sesgos asociados, estos deben corregirse en base al periodo de control para luego trasladar esta corrección al periodo futuro junto con el delta de cambio propio del modelo hacia el futuro, realizado los escalamientos correspondientes (por ejemplo, por el producto de isosuperficie de precipitación reportado por AMPHOS21).

El propósito tras la obtención de series en el periodo de control y futuro es realizar contrastes sobre los cambios en las series que alimentan el modelo hidrológico, de modo de evaluar los efectos que el cambio climático, para el escenario severo y a partir de los modelos seleccionados, tendría sobre la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca.

c) Construcción de series futuras de precipitación

La construcción de la serie de precipitaciones en los catchments sigue un proceso secuencial que parte de la misma lógica utilizada para la obtención de las series históricas para toda la cuenca (ver a). En este sentido el procedimiento consta de 2 partes. Una primera parte consiste en la corrección del sesgo del GCM y una segunda parte consiste en la extrapolación espacial de las series de precipitación.

Para ello, los GCM seleccionados son información de base con la cual se genera una serie de precipitaciones en el periodo de control cuya relación con las observaciones será llevada hacia el periodo futuro. El proceso que permite entonces la construcción de las precipitaciones futuras considera las siguientes etapas:

a) Se obtiene la serie de precipitaciones de una pseudo estación para cada GCM en el periodo de control, vale decir, una serie como la obtenida para el periodo histórico, pero utilizando la información del GCM correspondiente en el periodo de control interpolada a la ubicación de las estaciones, en vez de las observaciones en sí. Esto se hace por cada estación índice i.

$$Pp\ Control\ GCM\ estación\ ínidce_i = Pp\ Control\ GCM\ interpolada_{\ i} * \frac{Pp\ media\ hist\ anual\ estación\ índice_i}{Pp\ media\ anual\ Control\ GCM\ interpolada_i}$$

b) Luego, se obtiene la serie de precipitaciones para el catchment j correspondiente, en base a la serie de la pseudo estación obtenida en a). Esta considera el cálculo realizado para el periodo histórico (1979-2018) pero ahora en base a la esta nueva serie en el periodo de control.

$$Pp\ Control\ GCM\ catchment_j = Pp\ Control\ GCM\ estación\ ínidce_i * \frac{Pp\ media\ hist\ anual\ AMPHOS\ en\ catchment_j}{Pp\ media\ anual\ estacion\ índice_i}$$

c) Para la obtención de las series futuras se genera una serie de precipitaciones de una pseudo estación para cada GCM en el periodo futuro, vale decir, una serie como la obtenida para el periodo histórico, pero utilizando la información del GCM correspondiente en el periodo futuro interpolado a la ubicación de la estación índice utilizando el mismo factor de ajuste considerado para el periodo control.

$$Pp\ Futuro\ GCM\ estación\ ínidce_i = Pp\ Futuro\ GCM\ interpolada_{\ i} * \frac{Pp\ media\ hist\ anual\ estación\ índice_i}{Pp\ media\ Control\ anual\ GCM\ interpolada_i}$$

d) Finalmente, la serie para el periodo futuro del catchment j sigue un proceso de doble corrección, el primero para ajustar los cambios del futuro respecto del histórico considerando el procedimiento previo y el segundo el escalamiento utilizado en el presente para la concordancia expuestos por AMPHOS21. Finalmente, la serie futura en un catchment j se calcula:

$$Pp\ Futro\ GCM\ catchment_j = Pp\ Futuro\ GCM\ estación\ ínidce_i * \frac{Pp\ media\ hist\ anual\ AMPHOS\ en\ catchment_j}{Pp\ media\ anual\ estacion\ índice_i}$$

Al aplicar el procedimiento descrito a 2 estaciones índice (Peine y San Pedro de Atacama) en las series del periodo de control y futuras de los modelos CSIRO MK3-6-0 y Can-ESM2 (2 modelos candidatos que presentan proyecciones opuestas y extremas en términos de cambios en precipitación), se aprecian correctos ajustes a escala de medias anuales respecto de las observaciones respectivas (Figura III-29). Se aprecian importantes aumentos en la precipitación anual esperada en el modelo Can-ESM2 y diferencias en el caso del modelo CSIRO concordante con lo expresado en el análisis de deltas (ver Tabla III-12).

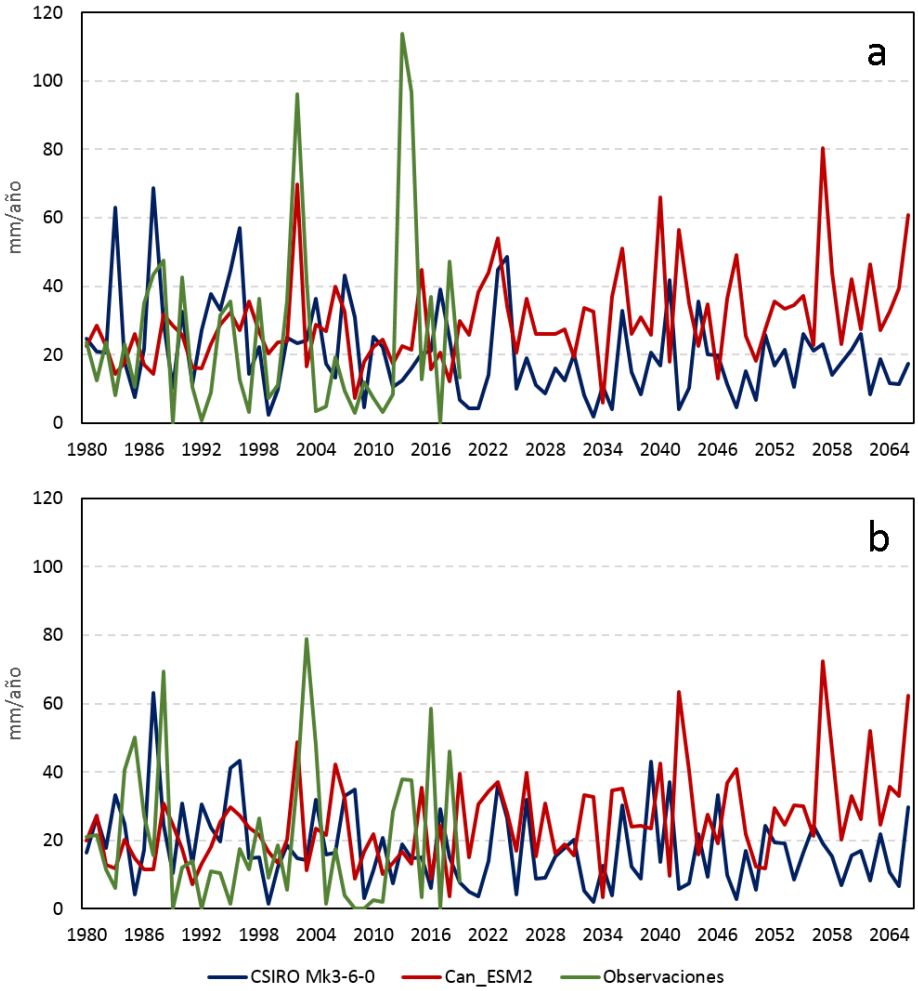


Figura III-29: Series de precipitación anual a nivel de estación e interpoladas a la coordenada de esta en 2 modelos de cambio climático.
Nota: Se muestra el periodo de control (observaciones) y futuro (modelos CSIRO MK3-6-0 y Can-ESM2) para las estaciones a) San Pedro de Atacama y b) Peine.
Fuente: Elaboración propia

d) Construcción de series futuras de temperatura

En el caso de las temperaturas extremas, se sigue una metodología similar a la diagramada para el periodo histórico, en base a la corrección de sesgo mensual del producto CR2Met respecto de las observaciones. En este caso, esta corrección se realiza sobre el periodo de control del GCM, y los coeficientes se traspasan al periodo futuro para obtener series ajustadas por esta corrección basada en las estaciones índice en cada catchment.

El procedimiento, aplicable tanto a temperatura mínima como máxima se puede resumir de la siguiente manera:

a) Se obtiene el sesgo por mes m del GCM (SGCMe) para el periodo control respecto de las estaciones índice i:

$$Sesgo\ GCM\ estación_{i,m} = Temp\ Control\ GCM\ interpolada_{i,m} - Temp\ historica\ índice_{i,m}$$

b) La serie corregida por catchment j, en periodo de control, corresponde a la serie agregada por pesos de las celdas que se encuentran en el catchment correspondiente, a la que se le suma el sesgo del GCM asociado a la estación i en el mes m:

$$Temp\ control\ GCM\ corregida_j = \left(\sum_j Temp\ control\ GCM_j * W_j\right) + \mathrm{SGCMe}_{im}\ , \forall\ j, m\ \in i$$

$$donde\ W_j = \left(\frac{w_j}{\sum_j w_j}\right)\ y\ \sum W_j = 1$$

Donde W_j describe los pesos de cada celda del catchment.

c) La serie futura finalmente sigue la misma lógica, pero ahora con la serie futura en el GCM que corresponda.

$$Temp\ futuro\ GCM\ corregida_j = \left(\sum_j Temp\ futuro\ GCM_j * W_j\right) + \mathrm{SGCMe}_{im}\ , \forall\ j, m\ \in i$$

$$donde\ W_j = \left(\frac{w_j}{\sum_j w_j}\right)\ y\ \sum W_j = 1$$

De modo de evaluar los modelos de cambio climático en base al procedimiento expuesto, se contrastó la temperatura máxima de las estaciones Peine y San Pedro de Atacama con los modelos CSIRO MK3-6-0 y Can-ESM2 interpolados a la ubicación de la estación. Se aprecia una tendencia de incremento en temperatura mínima y máxima respecto del periodo histórico concordantes con la corrección de sesgo mensual (Figura III-30 y Figura III-31).

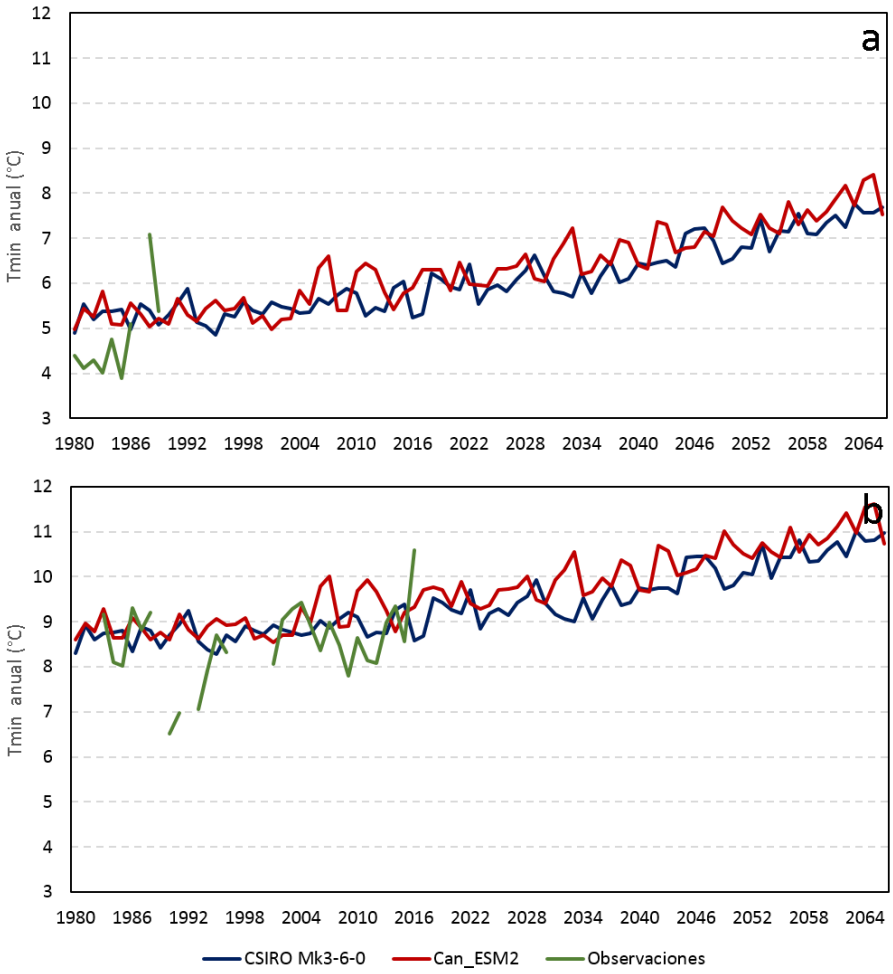


Figura III-30: Series de temperatura mínima a nivel de estación e interpoladas a la coordenada de esta en 2 modelos de cambio climático.
Nota: Se muestra el periodo de control (observaciones) y futuro (modelos CSIRO MK3-6-0 y Can-ESM2) para las estaciones a) San Pedro de Atacama y b) Peine.
Fuente: Elaboración propia

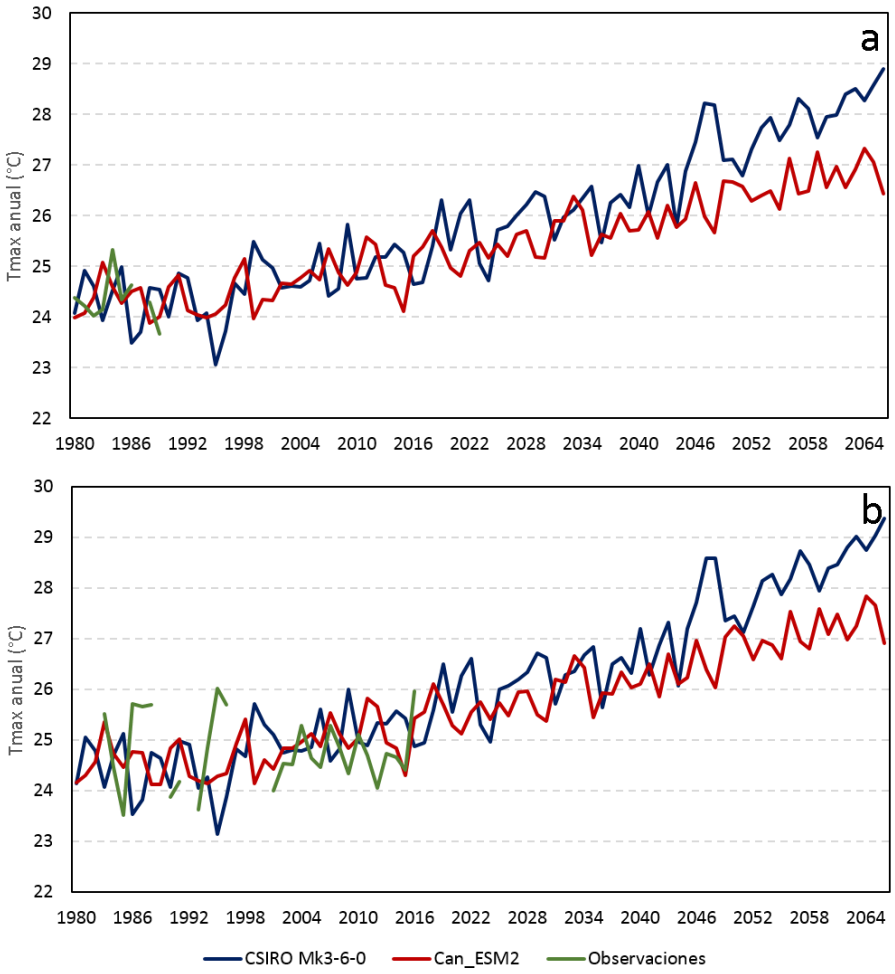


Figura III-31: Series de temperatura máxima a nivel de estación e interpoladas a la coordenada de esta en 2 modelos de cambio climático.
Nota: Se muestra el periodo de control (observaciones) y futuro (modelos CSIRO MK3-6-0 y Can-ESM2) para las estaciones a) San Pedro de Atacama y b) Peine.
Fuente: Elaboración propia

e) Construcción de otras variables climáticas

Dada la densidad (3 estaciones INIA) y cantidad de registros (datos desde 2009) de observaciones de humedad relativa y viento, la realización de un procedimiento de corrección de sesgo para la información grillada puede levantar más incertidumbre de la que intenta resolver.

En ese sentido, las series climatológicas de humedad relativa y viento (hacia 2060), considera la replicación de las series corregidas para ambas variables. Esto implica que la serie futura corresponde a la serie corregida por sesgo en el periodo histórico en base a las estaciones INIA, a partir de sesgos mensuales en base a estaciones índice asignadas a cada catchment. Sin embargo, se deben tener en consideración dos aspectos relevantes respecto de este paso: primero, que la distribución espacial de las estaciones INIA puede inducir más sesgo del que se desea corregir al asignarse a catchments lejanos tanto en

distancia como ubicación, y segundo, que la cantidad de registros en estas variables no puede clasificarse como climatología, ya que la mayoría se encuentra operativa desde 2010, que en justamente el año donde culmina el periodo de control.

III.4.2.4 Definición de parámetros y validación de resultados

Luego de incorporar el componente climático, la herramienta de modelación debe representar adecuadamente aquellos elementos que modifican la manera en que el agua es distribuida en los distintos componentes del balance hídrico dentro de cada unidad de modelación. En esta sección se presenta la información de base y los resultados en la determinación de los parámetros considerados para la modelación de los distintos componentes del ciclo hidrológico en WEAP a nivel superficial[55] para cuencas laterales y en el área del salar (extensión de dominio modelo numérico). Como punto de partida en la determinación de estos parámetros se han considerado experiencias previas disponibles.

Una primera fuente de referencia respecto a parámetros hidrológicos en WEAP para cuencas áridas, son los antecedentes levantados por las empresas consultoras Hídrica-Eridanus (UTP) en el marco del desarrollo para la DGA, del PEGH de la cuenca del Río Copiapó. Desde estos antecedentes se pudo obtener una primera configuración de parámetros de suelo para catchments altos que utilizan el método de cálculo Soil Moisture Method (Figura III-7, el Capítulo III.4.1).

Adicionalmente, y a partir de la colaboración del SEI como socio del proyecto, fue posible contar con un modelo WEAP desarrollado para un área en California, el cual utilizó el método de cálculo MABIA a paso de tiempo diario, aplicado para condiciones áridas, tal como es la situación del Salar de Atacama. Desde este modelo de referencia, se obtuvo valores iniciales de parámetros de vegetación y características de suelo asociadas a tipos de cobertura natural, así como referencias para ciertos tipos de cultivos.

Otra fuente complementaria relevante fue el estudio "Modelo ecosistémico de la respuesta vegetacional en sector sur del Salar de Atacama – Sector Tilopozo" desarrollado por el Centro de Ecología Aplicada (CEA) para Minera Escondida Limitada (2017). Este estudio consideró el desarrollo de un modelo que permitiera representar la respuesta de la vegetación azonal del sector sur del Salar de Atacama, ante variaciones en el suministro hídrico que las sostiene. Desde esta fuente fue posible obtener valores referenciales para parámetros de la fenología y de desarrollo para especies representativas de la vegetación natural del salar.

Finalmente, y asociada a la modelación de los cultivos, tal como se detalla más adelante, valores de referencia sobre su fenología fueron obtenidos del mismo algoritmo WEAP-MABIA. Este algoritmo incluye una biblioteca con datos para más de 100 cultivos y coberturas de suelo para diferentes climas y regiones del mundo. Parte importante de esta información proviene del Boletín FAO Nª56 sobre Riego y Drenaje (Allen et al., 1998).

[55] Revisión de parámetros del modelo MODFLOW para la zona del salar se presenta en el Capítulo III.5.

Las secciones siguientes presentan un resumen de los parámetros considerado para distintos componentes del ciclo hidrológico representados por el modelo hidrológico superficial WEAP.

III.4.2.4.1 Parámetros asociados a caracterización de vegetación natural y cultivos

Respecto de la caracterización de la cobertura vegetal, tanto natural como de los cultivos en áreas agrícolas, el modelo WEAP-MABIA necesita que se definan una serie de parámetros. Tanto para cultivos como coberturas naturales, es necesario incorporar información respecto al inicio y duración de las distintas etapas fenológicas, coeficientes de cultivo, altura máxima de desarrollo, sensibilidad a la disponibilidad de agua del suelo y el rango de profundidad de desarrollo radicular.

Para determinar los parámetros se utilizó como referencia la librería MABIA proveniente del modelo WEAP de California, ajustando las fechas de siembra de acuerdo con la realidad local[56]. Esta primera asignación de parámetros se complementó con otras fuentes, como la base de datos con la que cuenta el modelo WEAP-MABIA basada en el boletín FAO Nº56 (Allen et al., 1998). En particular, el proceso de calibración de los parámetros usados para coberturas naturales incorporó ajustes a los coeficientes de base, a partir de estudios desarrollados en el mismo Salar de Atacama.

Los valores para los coeficientes de cultivo para la cobertura vegetal se definieron con valor 1 para la vegetación "abundante o vigorosa" y para el bofedal, mientras que un valor de 0,5 para la vegetación "dispersa o poco vigorosa". En el caso de la cobertura humedal, se consideró una condición a partir de los valores de Kc mensual de la cobertura tipo Vega y Bofedal (valor constante mensual 1) desde estudios Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) y Salazar et al. (1999).

Tabla III-13: Coeficientes de cultivo de consumo de agua en vegas y bofedales

Tipo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Vega	0,63	0,63	0,63	0,56	0,41	0,41	0,41	0,56	0,56	0,56	0,63	0,63
Humedal[1]	0,815	0,815	0,815	0,78	0,705	0,705	0,705	0,78	0,78	0,78	0,815	0,815

Notas: [1] El valor mensual del coeficiente de cultivo para humedal se obtiene del promedio entre el valor de Kc de Vega y Bofedal.

Fuente: Adaptado de Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018) y Salazar et al. (1999).

Para la caracterización de la vegetación natural presente al interior del sector del salar (dominio superficial del modelo hidrogeológico), y de acuerdo con la información

[56] Se consultó fichas productivas de la región de Antofagasta para ajustar fechas de siembra de alfalfa y maíz. https://www.indap.gob.cl/fichas-tecnicas-para-la-agricultura-familiar-campesina---temporada-2019-2020/fichas-productivas-afc-antofagasta).

disponible en CEA (2017) sobre parámetros característicos de su desarrollo vegetativo, se complementó la información del modelo lateral a partir de la definición de una especie representativa para cada una de las clases de cobertura vegetal consideradas en el modelo (humedales, matorrales y pastizales). La elección de esta especie permitió ajustar los valores de profundidad de raíces, altura máxima de desarrollo y largo de la temporada de crecimiento para cada cobertura. Las clases de vegetación se representan de acuerdo con las características particulares de *Tessaria absinthioides*, *Distichlis spicata* y *Juncus balticus* para las coberturas matorral, pastizal y humedal, respectivamente (Tabla III-14). La Tabla III-15 resume los parámetros finales considerados en el modelo WEAP para la hidrología superficial de las cuencas laterales al Salar de Atacama.

Tabla III-14: Parámetros para especies representativas de las distintas formaciones vegetales nativas de la zona del salar.

Clase de cobertura vegetal	Taxa	Forma de Vida	Cobertura (% del área total)	Altura máxima [m]	Profundidad Raíces [m]: Min	Profundidad Raíces [m]: Promedio/común	Profundidad Raíces [m]: Max reportado
Pastizal	*Distichlis spicata*	Hierba perenne	24,3	0,80	0,1	0,61	No reportado
Humedal	*Juncus balticus*	Hierba perenne	4,2	0,60	0,15	0,47	0,80
Matorral	*Tessaria absinthiodes*	Arbusto	1,1	0,50	0,25	0,77	1,5
Bosques	*Prosopis tamarugo*[1]	Árbol freatófito	Indet.	8 - 20	4	12	18-20

Notas: [1] Datos para especímenes de la Pampa del Tamarugal; Datos para raíces pivotantes.

Fuente: Sudzuki (1969), Calderón et al. (2015), Chavez et al. (2016), Decuyper et al. (2016), Stromberg (2013) y CEA (2017).

Tabla III-15: Parámetros y valores utilizados para diferentes coberturas vegetales en la cuenca del Salar de Atacama.

Cultivo o cobertura de suelo	Categoría	Mes típico de siembra/plantación	Duración etapa [días]: Inicial	Duración etapa [días]: Desarrollo	Duración etapa [días]: Media estación	Duración etapa [días]: Fin estación	Duración etapa [días]: Total	K_{cb}: Inicial	K_{cb}: Media estación	K_{cb}: Fin estación	Factor de Agotamiento [0-0.99]: Inicial	Factor de Agotamiento [0-0.99]: Media estación	Factor de Agotamiento [0-0.99]: Fin estación	Altura máxima [m]	Profundidad Raíces [m]: Min	Profundidad Raíces [m]: Max
Huerta y Horticultura	Cereales	Sept	31	38	46	38	153	0,45	1,15	1,05	0,55	0,55	0,55	1,5	0,15	1,2
Cereal Verano	Cereales	Sept	31	38	46	45	160	0,45	1,2	0,48	0,55	0,55	0,55	2	0,15	1,7
Cereal invierno	Cereales	Jul	53	79	39	41	212	0,65	1,11	0,64	0,55	0,55	0,55	1	0,15	1,8
Forrajeras	Forrajera	Sept	90	92	90	93	365	1,1	1,1	1,1	0,55	0,55	0,55	0,7	1,5	2
Cítrico	Frutales	Jan	0	120	125	120	365	0,65	0,64	0,65	0,5	0,5	0,5	4	1,35	2
Pastizal	Vegetación Nativa	Sept	0	120	125	120	365	1	1	1	0,5	0,5	0,5	1	0,15	1,5
Humedal	Vegetación Nativa	May	0	120	125	120	365	0,70	0,81	0,81	0,7	0,7	0,7	0,7	1,5	1,5
Matorral	Vegetación Nativa	Sept	0	120	125	120	365	0,5	0,5	0,5	0,7	0,7	0,7	2	1,5	1,5
Frutal	Frutales	Sept	30	50	130	30	240	0,68	1,08	0,83	0,5	0,5	0,5	4	1	2
Bosques	Vegetación Nativa	Sept	0	120	125	120	365	0,8	1	0,9	0,7	0,7	0,7	5	1	12

Fuente: Elaboración propia a partir de Allen et al. (1998), CNR-ARRAU (2014) y CNR-AMPHOS21 (2017).

Un factor relevante para el algoritmo MABIA es la definición de la fracción cubierta con vegetación para cada tipo de cobertura de suelo al interior de cada uno de los catchments. Esta fracción determinará aquella superficie sobre la cual aplican el cálculo de salidas de agua por evapotranspiración vegetal, mientras que su complemento representa el flujo evaporativo desde el suelo no cubierto por vegetación. La Tabla III-16 presenta los valores considerados actualmente en el modelo tanto en la zona del salar como en la zona de las cuencas laterales.

Tabla III-16: Fracción cubierta por vegetación

Cobertura		Fracción de suelo cubierta
Agua		0
Bosques		0,6
Cultivos	Plantas Forrajeras	1
	Huertas y Hortalizas	0,6
	Cereales Verano	1
	Cereales Invierno	1
	Frutales	0,6
	Cítricos	0,6
Humedales		0,5
Matorrales		0,3
Pastizales		1
Salares		0
Suelo Desnudo		0

Fuente: Elaboración propia.

III.4.2.4.2 Parámetros asociados a caracterización de riego

Según lo reportado por el censo agrícola y forestal (INE, 2007), para las 1.467 ha que comprenden la superficie regada en la comuna de San Pedro de Atacama (Tabla III-17), el principal sistema de riego corresponde a métodos gravitacionales, incluyendo el método por tendido (98,4% de la superficie regada total) y surco (0,6% de la superficie regada total) (CNR-ARRAU, 2014).

Esta información permitió caracterizar el régimen de riego en el modelo WEAP para aquellas unidades de modelación que poseen cultivos. Para las coberturas caracterizadas como "cultivos" se asume la existencia de riego, principalmente a partir de las condiciones desérticas del área de estudio y por lo reportado en el censo agrícola y forestal en donde no se reporta superficie cultivada en secano (INE, 2007).

Tabla III-17: Sistemas de riego presentes en la comuna de San Pedro de Atacama.

Método de riego		Superficie (ha)	%
Riego gravitacional	Tendido	1.444,2	98,4
	Surco	8,3	0,6
	Otro Tradicional	6,3	0,4
Mecánico mayor	Asperción tradicional	4,0	0,3
	Carrete o pivote	0,0	0,0
Micro-riego	Goteo y Cinta	4,4	0,3
	Microaspersión y microjet	0,1	0,0
Total		1.467,3	100

Fuente: Adaptado de CNR-ARRAU (2014).

En términos de la eficiencia de aplicación, y dada la alta participación del riego por tendido en toda la comuna, se consideró una eficiencia de riego de un 30% (Antúnez & Felmer, 2009). Del 70% restante, una fracción percola a aguas subterráneas (70%) y la otra fracción se evapora (30%) (Tabla III-18).

Tabla III-18: Riego utilizado y sus parámetros en la modelación

Parámetro riego: Tendido	Valor
Fracción mojada	1
Eficiencia de riego	30%
Ineficiencia de riego	70%
Aguas Subterráneas	70%
Escorrentía	0%
Evaporación	30%

Fuente: Antúnez y Felmer (2009).

En lo que respecta a la frecuencia y cantidad de agua para riego aplicada, CNR-Amphos21 (2017) identifica el área de San Pedro de Atacama y comunidades presentes en la cuenca del Salar de Atacama, un régimen de riego por turnos cada 22 – 30 días, con una lámina de riego en torno a los 50 mm por turno. Para efectos de la construcción de este modelo, se consideró una condición hipotética con una frecuencia de riego cada 25 días (dentro del periodo de crecimiento del cultivo) con una lámina de riego de 50 mm.

III.4.2.4.3 Parámetros asociados a los procesos de generación de escorrentía y flujo de agua en el suelo

Para caracterizar el proceso de escorrentía y flujo de agua en el suelo (primer receptáculo de suelo ya que el segundo se reemplaza por un acuífero en la conceptualización del modelo) se deben considerar parámetros distintos para el método de Soil Moisture y el método MABIA (mayor detalle ver III.4.2.1). Adicionalmente en el caso del método Soil Moisture se deben considerar parámetros para la simulación del proceso de acumulación y posterior derretimiento de nieve. En el caso de la aplicación del método MABIA además de considerar diferencias entre coberturas respecto de algunas coberturas se han modificado estos valores de base de acuerdo a un factor de corrección teniendo en cuenta la altura del catchment y la UH a la cual pertenece. La Tabla III-19 muestra los parámetros relevantes utilizados en el caso del método Soil Moisture. Las Tabla III-20 y Tabla III-21 muestran los parámetros relevantes utilizados en el caso del método MABIA.

Tabla III-19: Parámetros utilizados para el proceso de escorrentía y flujo en suelo en método Soil Moisture

Parámetro	Valor utilizado
Parámetros asociados a nieve	
Albedo LB	0,15
Albedo UB	0,25
Melting point (°C)	3
Freezing point (°C)	-1,5°C
Parámetros asociados a escorrentía	
Root zone Conductivity (mm/mes)	15-20
RRF	0,2
Soil Water Capacity (mm)	500
Deep Water Capacity (mm)	1.000
Preferred Flow Direction	0,7

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III-20: Parámetros de suelo utilizados en el método MABIA

Parámetro	Valor
Surface Layer Thickness (m)	1 - 5
Total Soil Thickness (m)	2,5 - 10
Soil Water Capacity (%)	14 - 16
Maximum Infiltration Rate (mm/día)	100
Maximum Percolation Rate (mm/día)	20
Effective Precipitation (%)	45 - 100
Direct Recharge to Groundwater (%)	100
Initial Bucket 1 Depletion (mm)	200 – 250
Initial Bucket 2 Depletion (mm)	200 - 250

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III-21: Factor de corrección de acuerdo a la altura del catchment

UH/Altura[1]	Alto	Medio	Bajo
UH 1 a UH 6	0,8	0,9	1

Nota: [1] Alto: > 4.000 m.s.n.m; Medio: 3.000-4.000 m.s.n.m.; y Bajo: < 3.000 m.s.n.m.

Fuente: Elaboración propia.

III.4.2.4.4 Parámetros asociados a la interacción hidrología superficial y subterránea

Como lo muestran estudios previos realizados para la cuenca del Salar de Atacama (CNR-ARRAU, 2014) la interacción río-acuífero es un proceso relevante en la hidrología de las cuencas laterales. Dada la necesidad de representar estos procesos en el modelo WEAP, y tal como se presentó en el Capítulo III.4.1, se implementó una estructura de elementos que vincula cada catchment con alturas medias bajo los 5.000 m.s.n.m. con un elemento acuífero, lo cual permite una mejor representación de la interacción superficial-subterránea en el modelo lateral. Los valores de estos parámetros fueron determinados a partir de una representación de estos procesos en la subcuenca del Río San Pedro en Cuchabrachi y después los resultados fueron extrapolados a las otras subcuencas laterales. Se realizó una diferenciación entre los catchments que estaban en una altura promedio alta (sobre 3.500 m.s.n.m.) o baja (bajo los 3.500 m.s.n.m.) con tal de representar diferencias a partir de la topografía y características del sistema subterráneo. Los parámetros que permiten definir los acuíferos se detallan a continuación:

- **Recarga directa al acuífero:** Corresponde a la recarga directa al acuífero desde cada uno de los catchments a partir de la precipitación que no ingresa al perfil de suelo. Se define como el porcentaje de la precipitación *no efectiva*, la cual recarga directamente cada acuífero.
- **Capacidad de almacenamiento**: Corresponde a la capacidad total de almacenamiento de cada uno de los acuíferos, cuyos coeficientes fueron determinados a partir de un factor vinculado a la profundidad de referencia y el área total del catchment asociado al acuífero. Los valores resultantes fluctúan entre 6 y 280 millones de m^3 para la zona de San Pedro en Cuchabrachi. Para los catchments del área lateral, se aplicó un coeficiente de corrección sobre este factor que fluctúa entre 0,9 y 1,2 según la altura media de cada unidad de modelación.
- **Almacenamiento inicial**: Corresponde al almacenamiento inicial de cada acuífero al inicio del periodo de modelación. Los valores fluctúan entre 3 y 42 millones de m^3 para la zona de San Pedro en Cuchabrachi. En los otros catchments del área lateral se aplicó un coeficiente de corrección que fluctúa entre los 0,006 y 0,003 para zonas altas y bajas, respectivamente. Dado que este parámetro está influenciado por el área del catchment, fue necesario corregir estos valores para aquellos catchments que tuvieran una superficie mayor a 10.000 ha. Esto debido a que valores iniciales generaban una sobreestimación de este volumen inicial de agua en los acuíferos. Esto se hizo evidente al contrastar una primera estimación con los resultados de la modelación del almacenamiento subterráneo luego de superado el efecto de esta condición inicial.

La construcción del modelo lateral consideró la representación de procesos de infiltración hacia el acuífero y afloramientos de agua desde ellos hacia el cauce (Figura III-7, Capítulo III.4.1). Un primer acercamiento tuvo foco en la subcuenca del Río San Pedro en Cuchabrachi dada la existencia de antecedentes de este proceso de infiltración y afloramiento desde los aforos de caudales para tramos de río obtenidos del estudio CNR (2014; Capítulo II.4.2.2.3). A partir de estos aforos, y la distribución espacial de las distintas Unidad Hidrogeológica (UH), se pudo inferir zonas de recarga y afloramiento de aguas subterráneas. A partir de ello se identificaron tramos de río en donde ocurría este proceso para zonas altas y bajas de la cuenca. Para representar estos afloramientos desde los acuíferos laterales hacia los tramos de río, se forzó la salida de agua desde los acuíferos a partir de nodos de demanda ficticios que extraen un determinado porcentaje (40%) del agua almacenada en el acuífero desde el paso de tiempo anterior. Este volumen fue inyectado como afloramiento en el tramo de río seleccionado. Finalmente, cada uno de los acuíferos laterales transfiere, ajustado por un factor (factor de transferencia de 0,01), su volumen acumulado a un elemento acuífero ubicado en la frontera del modelo numérico. Este elemento acuífero recibe y transfiere su volumen acumulado como parte de la recarga lateral subterránea al modelo hidrogeológico del área del Salar. También se considera pérdidas por evaporación directamente desde el acuífero (500 mm/año/ha). La distribución de los valores de otros parámetros considerados para simular estos procesos se presenta en la Tabla III-22.

Tabla III-22: Parámetros utilizados para representar la interacción entre la hidrología superficial y subterránea en cuencas laterales.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Factor de afloramiento acuíferos laterales (adimensional)	0,0005	0,0004	0,0003	0,0004	0,0004	0,0006	0,0008	0,0008	0,0007	0,0007	0,0007	0,0007
Infiltración desde río al acuífero	20%	20%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Fuente: Elaboración Propia

III.4.2.4.5 Validación de resultados

El proceso de validación de los parámetros de calibración arriba presentados consideró diversas fuentes de información. Una fuente de información crítica consiste en la información proveniente de estaciones fluviométricas existentes en la cuenca. Particularmente se consideraron las series de caudales para las estaciones San Pedro en Cuchabrachi, Quebrada de Jerez y Quebrada de Camar en Vertiente 1. Un aspecto relevante a considerar son los importantes problemas en la disponibilidad de información, particularmente asociados a caudales altos. Debido a la naturaleza de los fenómenos asociados a lluvias de alta intensidad en el periodo estival, los caudales en las condiciones extremas no son correctamente registrados (CNR-ARRAU, 2014). Por lo anterior el foco del trabajo estuvo en la correcta representación de caudales de base y la temporalidad de los mismos. Las Figura III-32, Figura III-33 y Figura III-34 presentan la comparación de los valores modelados en esos puntos contrastados con los valores registrados por las estaciones fluviométricas.

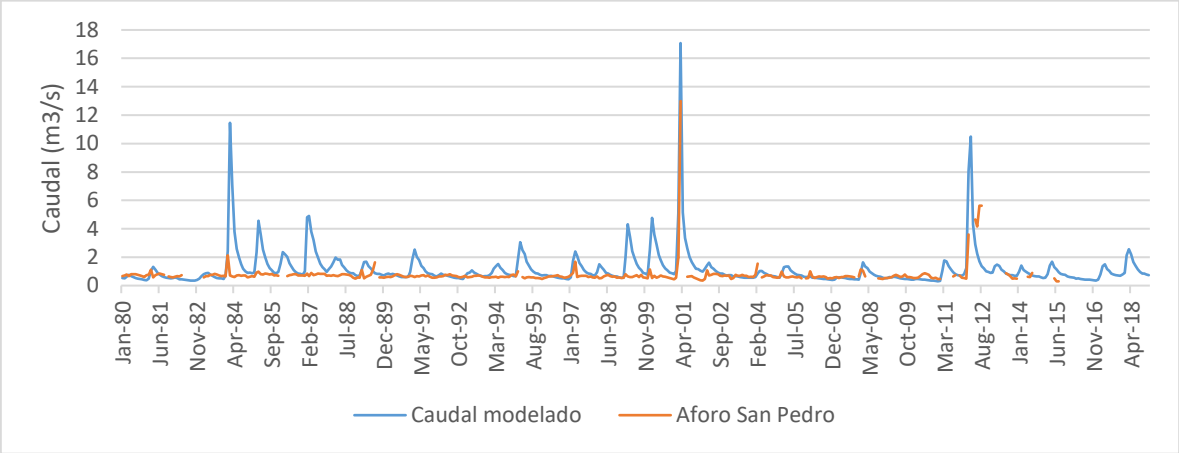


Figura III-32: Caudal promedio mensual modelado y observado en la estación DGA para la estación fluviométrica "Río San Pedro de Cuchabrachi".

Fuente: Elaboración propia.

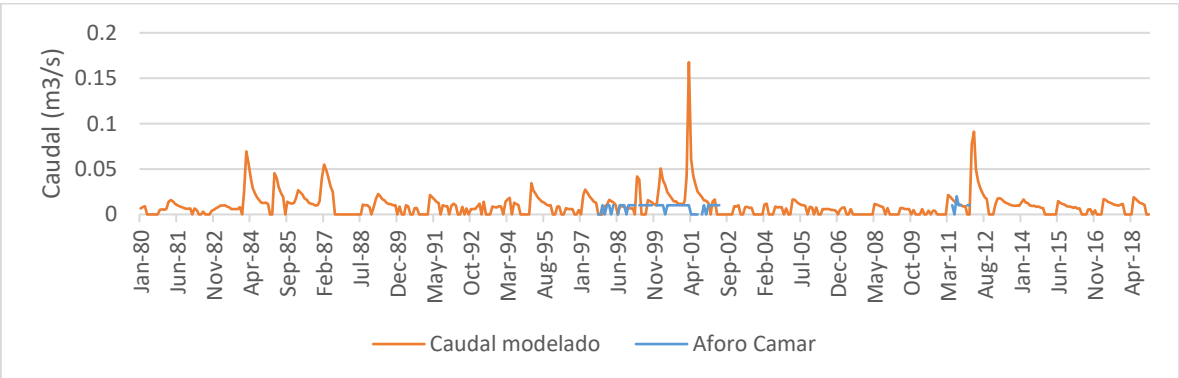


Figura III-33: Caudal promedio mensual modelado y observado en la estación DGA para la estación fluviométrica "Quebrada de Camar en vertiente 1".

Fuente: Elaboración propia.

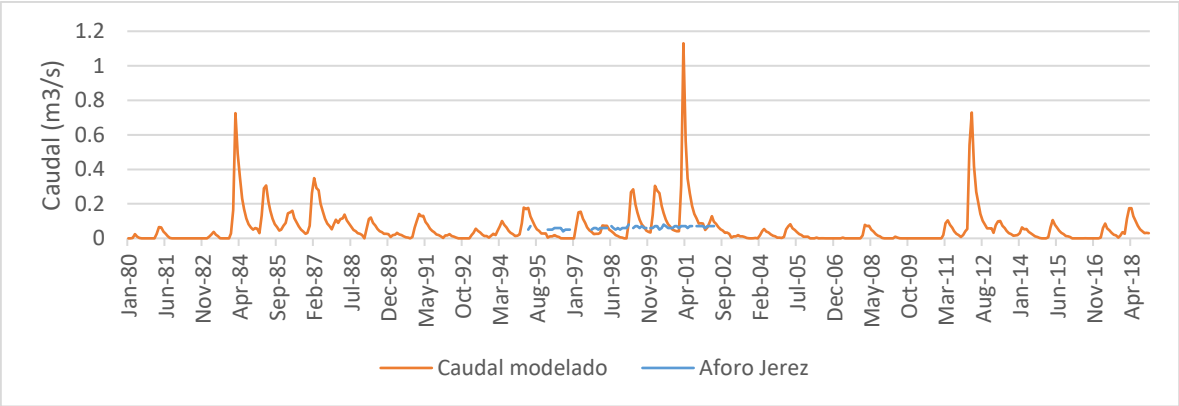


Figura III-34: Caudal promedio mensual modelado y observado en la estación DGA para la estación fluviométrica "Quebrada de Jérez".
Fuente: Elaboración propia.

Considerando que los gráficos anteriores solo permiten tener una aproximación de caudales base, el valor de referencia considerado de obtiene de las campañas de aforos disponibles para algunos tramos de río en la subcuenca del Río San Pedro en Cuchabrachi considerados en el estudio CNR-ARRAU (2014). Estos aforos permitieron ajustar y representar los procesos de infiltración y afloramiento asociados a la interacción río acuífero.

Finalmente, se consideró en la comparación la comparación de las series de caudales superficiales y subterráneos generados en cada una de las quebradas laterales, con las series de recarga lateral consideradas por CORFO-Amphos21 (2021) en su modelo numérico hidrogeológico. Los resultados de esta comparación se presentan en el Capítulo III.4.3.

III.4.3 Resultados

III.4.3.1 Modelos desarrollados

A continuación, se presentan los esquemas de los modelos hidrológicos superficiales WEAP desarrollados para el modelo lateral (Figura III-35A) y el modelo Salar-Monturaqui (Figura III-36A) de acuerdo con el marco conceptual presentado en el Capítulo III.3. En la Figura III-35B se observa la interacción entre los catchments, los acuíferos en las cuencas laterales y los ríos o quebradas. Desde el acuífero hay una porción que se evapora (sitio de demanda "EA_"), otra parte que aflora (sitio de demanda "AFL_") hacia la superficie y el remanente, se recolecta en un acuífero en el borde del área del salar (Figura III-35C, acuífero "GW_LAT_"). Más detalles de lo que ocurre en el límite de transición entre ambos modelos, se observa en la Figura III-35C tomando como ejemplo la zona de Peine, en donde el agua que escurre superficialmente se recolecta en el acuífero "GW_DIR_". Además, se observa la extracción mediante canales, para el consumo de agua por la agricultura y los poblados. En la Figura III-36B, se observa en mayor detalle la llegada del agua hacia el modelo Salar-Monturaqui mediante el elemento "Otros suministros". En "MF_LAT_" se representa lo que llega a nivel subterráneo, en "MF_RDIR_" corresponde a lo que llega superficialmente por escorrentía y los "C. Regantes" corresponde al agua que circula por los canales.

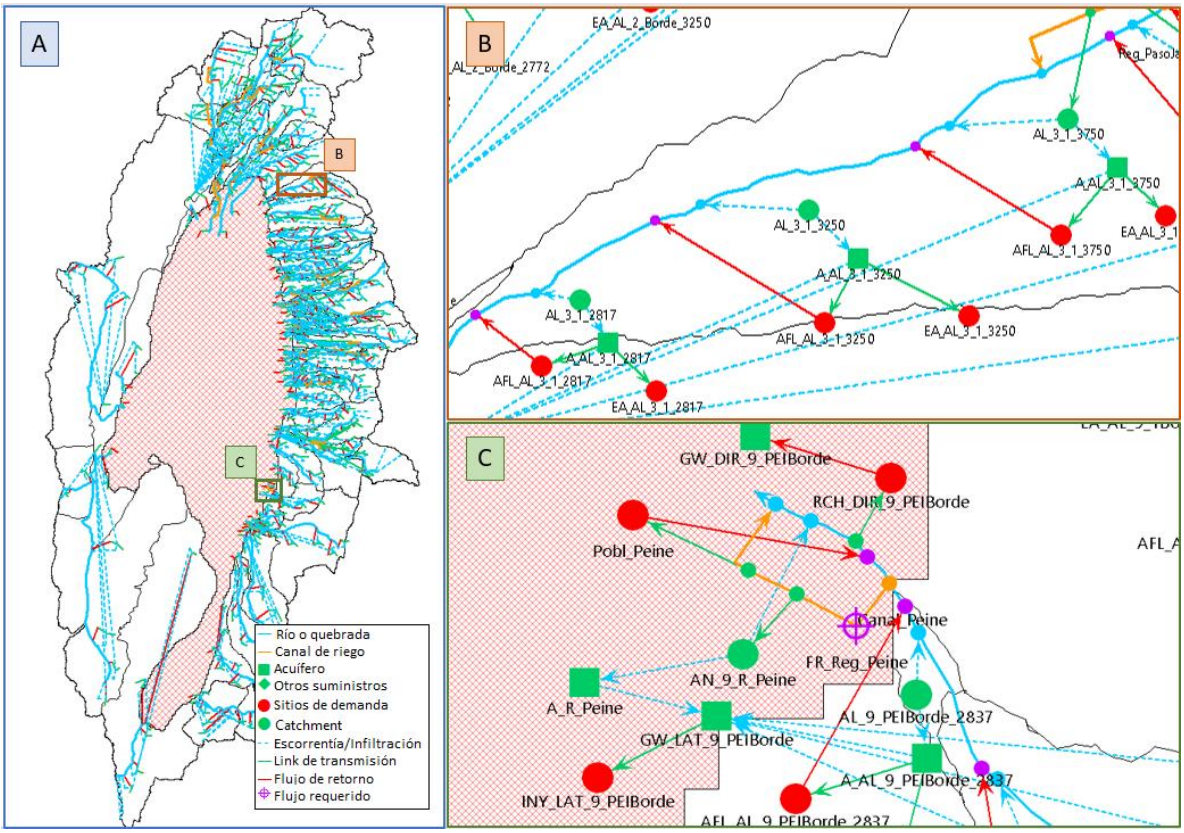


Figura III-35: Esquema del modelo hidrológico superficial WEAP para las cuencas laterales.

Nota: A) Esquema general del modelo en el sistema de cuencas laterales. B) Ejemplo de interacciones entre catchments, acuíferos laterales y sitios de demanda. C) Ejemplo de interacciones del borde salar y lateral en zona de Peine, junto con la extracción de agua para canales. Puntos violetas en B y C corresponden al nodo que permite conectar el flujo desde el sitio de demanda mediante un "Flujo de retorno" que llega al sistema hídrico superficial.

Fuente: Elaboración propia.

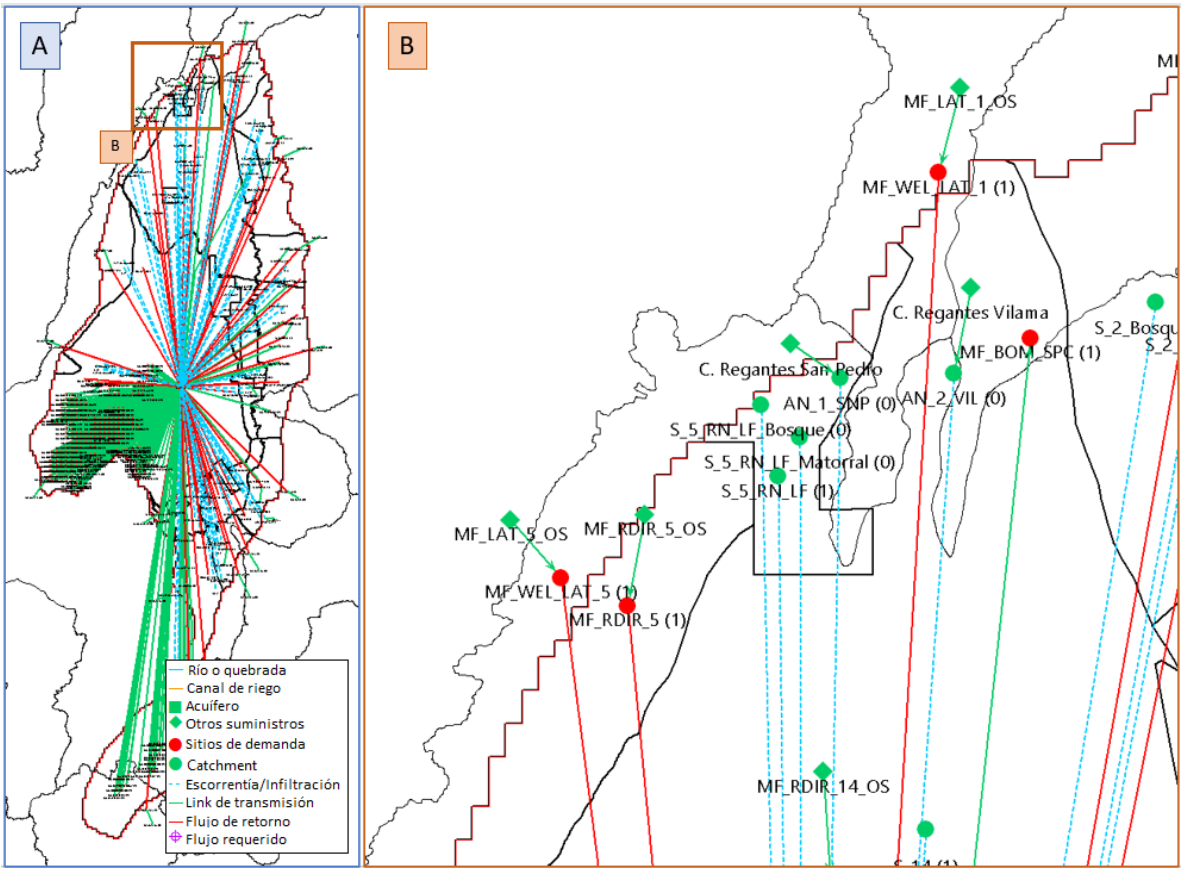


Figura III-36: Esquema del modelo superficial Salar-Monturaqui .

Nota: A) Esquema general del sistema de la zona del salar. B) Ejemplo de caracterización de catchments, recargas que se alimentan desde el modelo del sector lateral ("MF_LAT_" lo que llega desde lo subterráneo, en "MF_RDIR_" lo que llega por escorrentía superficial y en "C. Regantes" lo que circula en canales).

Fuente: Elaboración propia.

III.4.3.2 Condiciones hidrológicas y de uso de los recursos hídricos a nivel superficial

Se presentan a continuación algunos de los resultados representativos de los modelos hidrológico superficial del sistema de cuencas laterales y del sistema de la zona del salar. Se presentan primero los resultados del balance hidrológico de estos dos sistemas en un periodo histórico y posteriormente ejemplos de cómo la herramienta de simulación puede representar la manera en que las necesidades de agua a nivel superficial están siendo satisfechas para distintos tipos de usuarios.

III.4.3.2.1 Balance hidrológico

Tomando como base el marco conceptual presentado en el Capítulo III.4.2.1 se presentan los balances del sistema hidrológico superficial[57] para el periodo 1986-2018 en el modelo

[57] En el Capítulo III.4 se presenta el balance de aguas subterráneas del sistema del salar.

Salar-Monturaqui (Figura III-37 y Tabla III-23). El dominio de este modelo corresponde a todo lo que está dentro del modelo numérico hidrogeológico (ver modelo Salar-Monturaqui en Figura III-1). Los componentes que representan las entradas corresponden a precipitación y extracción de agua fresca por vegetación (que pudiesen acceder desde la zona saturada del acuífero), mientras que las salidas corresponden a infiltración (agua acumulada en el suelo que percola al acuífero) y evapotranspiración desde vegetación y cultivos.

En el segundo caso el resultado corresponde al balance superficial para el modelo lateral para el periodo 1986-2018 (Figura II-2 y Tabla II-17). Este último balance corresponde por lo tanto a la región de la cuenca que queda fuera del dominio del modelo numérico hidrogeológico (ver modelo lateral en
Figura III-1). El componente que representa la entrada corresponde a la precipitación, mientras que los componentes que representan las salidas corresponden a recarga lateral, excesos superficiales y evapotranspiración (este incluye evaporación desde el suelo, acuíferos, afloramientos y desbordamientos desde acuíferos, evapotranspiración desde la vegetación y cultivos y el uso de agua potable en asentamientos humanos).

En el caso del balance del sistema superficial del modelo Salar-Monturaqui existe una conexión con el acuífero aguas debajo de este sistema que puede operar a través de extracción de agua fresca de la vegetación cuyas raíces tienen acceso a estos recursos y la percolación que puede fluir hacia zonas más profundas del suelo donde se ubica el acuífero[58]. En el caso del balance del sistema superficial del modelo lateral también existe una conexión a través de recargas directas (capa 1 del acuífero[59]) que ocurren a nivel superficial de escorrentía que logran llegar a la superficie del salar y recargas laterales que ocurren a nivel subsuperficial (capa 3 del acuífero) de aguas existentes en zonas saturadas de las cuencas laterales e infiltración profunda de parte de la escorrentía superficial que llega al salar (detalles respecto de cómo se realiza esta distribución de flujos se presenta en el Capítulo III.5.2.1.3).

[58] Importante considerar que en algunas zonas del salar la zona vadosa prácticamente no existe encontrándose la zona saturada a muy poca profundidad.
[59] Capa 1 del modelo hidrogeológico numérico. Ver detalles en acápite 5.2.2.1.1.

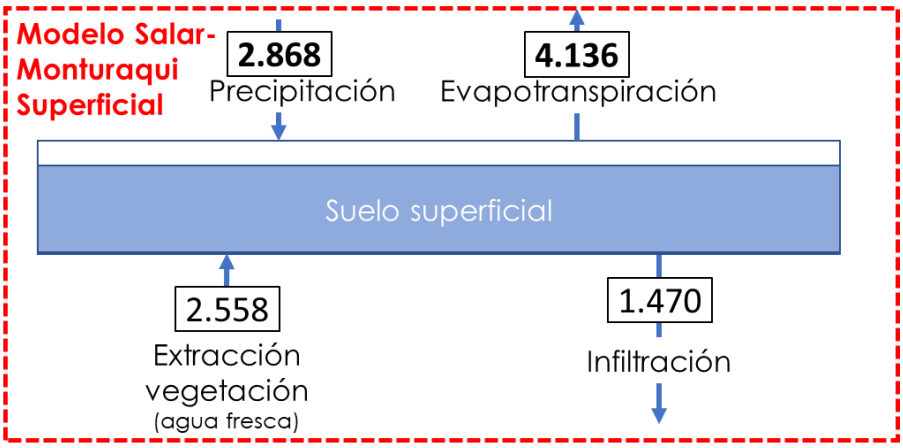


Figura III-37: Componentes del Balance del Sistema Superficial del salar (valores en l/s)
Nota: Las series temporales de los componentes de este balance se encuentran en la hoja 'Modelo SM superficial' del Anexo Digital 1 de la Etapa III.
Fuente: Elaboración propia.

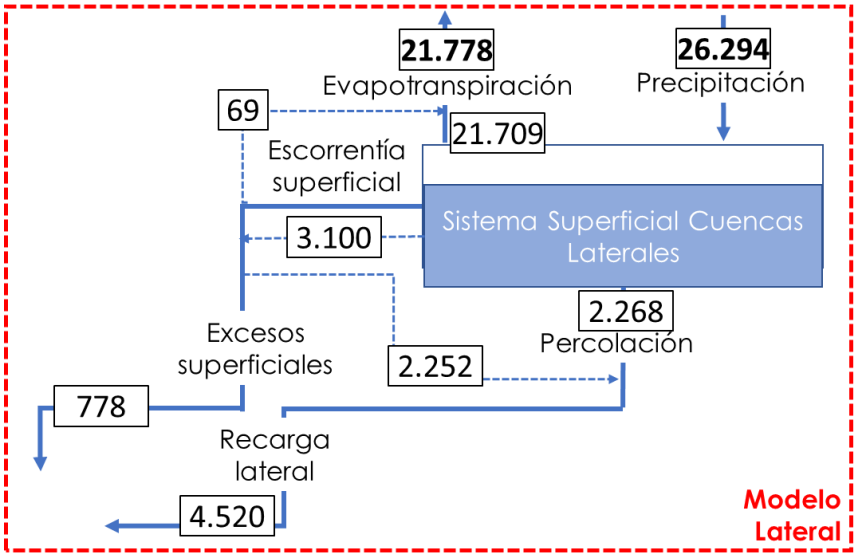


Figura III-38: Componentes del Balance del Sistema Lateral Superficial (valores en l/s).
Nota 1: Los valores intermedios desde la escorrentía superficial: 3.100 l/s corresponden a la escorrentía superficial resultante del modelo lateral, 69 l/s corresponden a la evaporación de los caudales superficiales provenientes del modelo lateral y 2.252 l/s corresponden a la percolación que se incorpora a los excesos subterráneos del modelo lateral.
Nota 2: Las series temporales de los componentes del balance que salen directamente del Sistema Superficial de Cuencas Laterales se encuentran en la hoja 'Modelo Lateral' y la descomposición de la escorrentía superficial y percolación se encuentran en la hoja 'Distribución caudales Lateral' del Anexo Digital 1 de la Etapa III.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla III-23: Balance hídrico del Sistema Superficial del modelo Salar-Monturaqui para el periodo 1986-2018

Entradas (l/s)		Salidas (l/s)	
Precipitación	2.868	**Evapotranspiración**	4.136
Extracción de agua fresca por vegetación[1]	2.558	**Infiltración**[2]	1.470
Total entradas[3]	5.426	**Total salidas**	5.606

Notas: * Se incluye el efecto de aumento en evaporación asociado al riego de cultivos
[1] Corresponde a lo extracciones que puede realizar la vegetación desde la zona saturada en el acuífero. En potencia también podría incluir bombeo para riego de cultivos. Estos valores se comparan con la representación de CORFO-Amphos21 (2021) para las salidas del acuífero por parte de la vegetación en el Capítulo III.5.3.1.
[2] Corresponde al exceso de agua acumulada en catchments y que se percola hacia el acuífero.
[3] No incluye entradas producto de riego proveniente de canales de riego del modelo lateral.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla III-24: Balance hídrico del modelo lateral para el periodo 1986-2018*

Entradas (l/s)		Salidas (l/s)	
Precipitación	26.294	**Recarga Lateral**[1]	4.520
		Excesos Superficiales	778
		Evapotranspiración[3]	21.778
Total entradas	26.294	**Total salidas**	27.076

Notas: * Se incluye el efecto de aumento en evaporación asociado al riego de cultivos
[1] Corresponde a lo que percola desde las cuencas laterales hacia el Salar agregándose una fracción de lo que percola desde la escorrentía superficial que llega a la zona del salar.
[2] Corresponde una fracción de la escorrentía que llega al salar de manera superficial (a nivel de quebradas, ríos y vertientes).
[3] Corresponde a la evapotranspiración desde la superficie (evaporación desde suelo sin vegetación y evapotranspiración desde suelo con vegetación), evaporación desde los acuíferos y afloramientos, uso del recurso hídrico desde los poblados y evaporación a partir del desbordamiento desde los acuíferos. Además, se agrega una fracción que evapora desde lo que llega como escorrentía al modelo Salar-Monturaqui.
Fuente: Elaboración propia

Se aprecia que para el periodo 1986-2018 existiría una reducción en el volumen de agua en las primeras capas de suelo para el modelo Lateral. En el caso del suelo superficial del modelo Salar-Monturaqui también habría una reducción del volumen de agua acumulado. El monto de reducción en el primer caso es de -782 l/s y en el segundo la reducción es del orden -180 l/s.

III.4.3.2.2 Representación de flujos de recarga desde el sistema de cuencas laterales

De manera complementaria a los balances a nivel de la superficie completa de las cuencas laterales es importante también evaluar a escala de subcuencas cuales son

algunos de los flujos relevantes, especialmente aquellos relacionados con los procesos de recarga a nivel lateral y superficial que afectan el balance del sistema subterráneo del salar. Se presentan a continuación los valores de la escorrentía superficial y la percolación que se transforman posteriormente en parte de la recarga directa y lateral del acuífero del salar. La información se presenta en 2 formatos: en la Figura III-39 se presentan la serie de promedios anuales y en la Figura III-40 se presenta la serie de promedios mensuales. Se puede apreciar que existe una variabilidad interanual y una estacionalidad a lo largo del año lo que demuestra el efecto que tienen la precipitación sobre la cuenca en la ocurrencia de estos flujos especialmente en el caso de la escorrentía superficial.

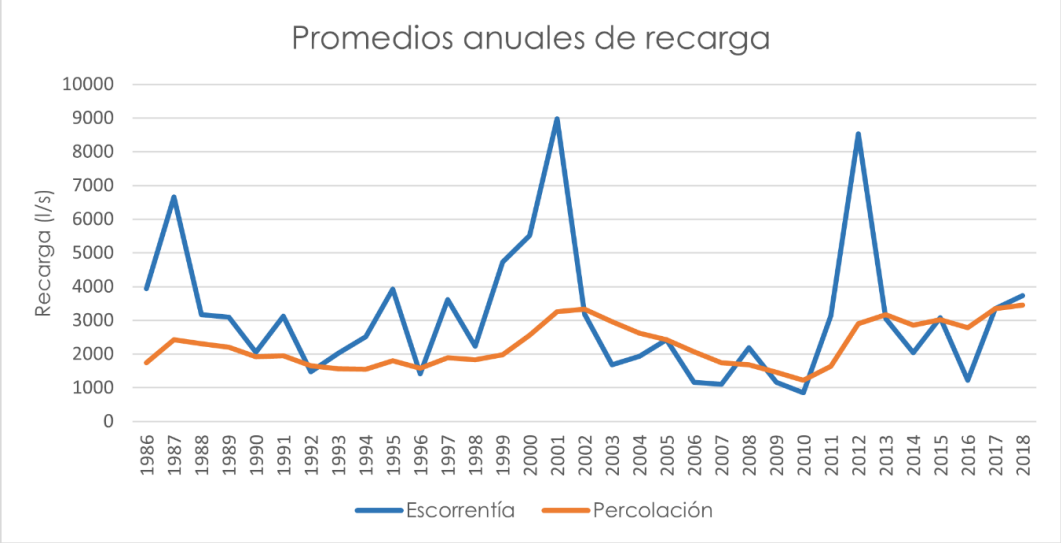


Figura III-39: Serie de promedios anuales de la escorrentía superficial y percolación proveniente de todas las subcuencas laterales.
Fuente: Elaboración propia.

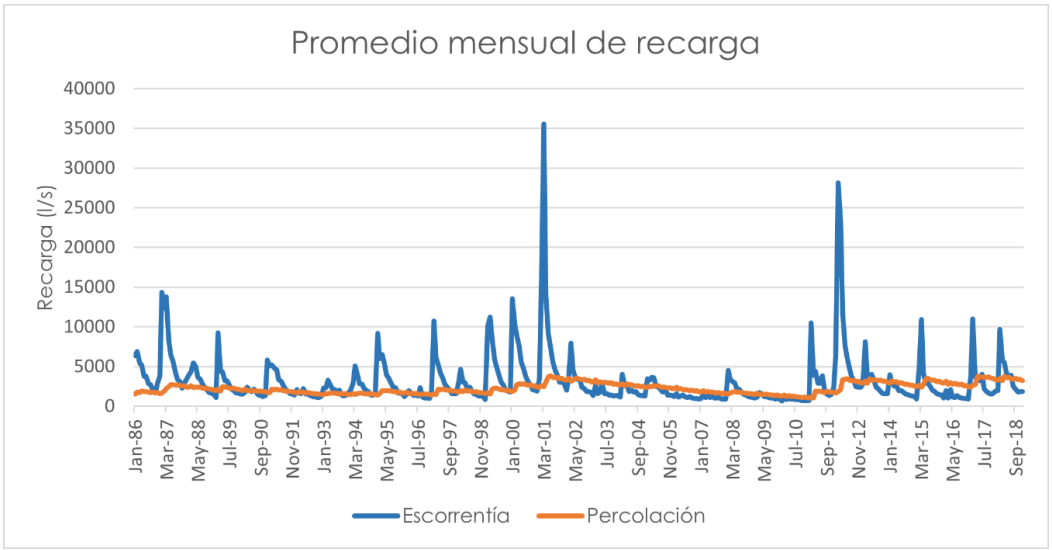


Figura III-40: Serie de promedios mensuales de la escorrentía superficial y percolación proveniente de todas las subcuencas laterales.
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla III-25 se comparan los valores obtenidos a escala se subcuenca de los flujos de escorrentía superficial y percolación. Estos valores se comparan con los valores totales de recarga lateral reportados por CORFO-Amphos21 (2021). Se aprecian diferencias a nivel de subcuencas individuales y una diferencia en el total acumulado.

Tabla III-25: Comparación de caudales de recargas laterales de cada subcuenca (en l/s).

Subcuenca	Modelo Conceptual A21	Modelo Hidrológico WEAP			Diferencia
	Recarga Lateral Total[60]	Escorrentía superficial	Percolación	Flujos totales	
SubCuenca 1	328	461	465	926	599
SubCuenca 2	489	359	224	582	93
SubCuenca 3	1.132	484	396	880	-252
SubCuenca 4	193	143	131	274	81
SubCuenca 5	286	0	3	3	-283
SubCuenca 6	437	401	268	669	232
SubCuenca 7	924	326	582	908	-16
SubCuenca 8	603	199	534	733	130
SubCuenca 9	12	0	9	9	-4
SubCuenca 11	10	0	1	1	-10
SubCuenca 16 (10, 12, 13 y 16)	116	1	33	34	-82
TOTAL	4.532	2.375	2.645	5.020	488

Nota: Las subcuencas se encuentran agregadas de acuerdo a la definición de CORFO-Amphos21 (2021).

Fuente: Elaboración propia y CORFO-Amphos21 (2021).

III.4.3.2.3 Representación de la satisfacción de demandas de recursos hídricos superficiales

Otro tipo de resultado que se pude obtener del modelo hidrológico superficial tiene relación con la satisfacción de las distintas necesidades de recursos hídricos que se satisfacen a través de extracción en fuentes superficiales. La caracterización de estos usos y extracciones de agua tienen relación con una demanda, un consumo final y con un derecho de aprovechamiento de agua que permite ese consumo. En algunos casos estos valores pueden diferir por lo que resulta importante caracterizar la satisfacción de cada uno de estos componentes de manera independiente. Por ejemplo, en el caso del riego, la demanda de agua está determinada por las necesidades de evapotranspiración que tiene un cultivo (función del clima y características propias del cultivo), pero el consumo (en este caso el riego) está determinado por una parte por las prácticas de riego (que responde a aspectos culturales) y tecnológicos que van a determinar de manera adicional a las necesidades del cultivo cuanto y como se aplica el riego. Por otra parte, la posibilidad de

[60] Los datos de Recarga Lateral Total se obtienen a partir del Apéndice A.1 BBDD-Balance, entregados por Corfo-Amphos21 (2021).

satisfacer ese consumo de riego está determinado por limitaciones físicas y legales (derechos) que permite la extracción y posterior transporte del agua extraída hacia el predio donde se aplica el riego. En el caso del consumo de agua potable, se puede definir como demanda una dotación esperada por habitante, pero el consumo está asociado a una demanda efectiva que esta también limitada por las restricciones físicas y legales para poder extraer agua para satisfacer ese consumo. Una caracterización básica (debe ser revisada por los usuarios en la cuenca) de cada uno de estos elementos ha sido descrita en el Capítulo III.4.2.2.

Tomando en cuenta estos conceptos se presentan a continuación algunos ejemplos de los resultados de satisfacción de demanda y consumo para el escenario histórico. Los ejemplos se extraen desde la zona donde riegan los miembros de la Asociación de Regantes del Río San Pedro en la zona baja de la subcuenca del Río San Pedro y algunos de los poblados más relevantes de la misma subcuenca que utilizan fuentes de agua superficial. Los resultados se separan en 3 componentes para el caso del riego y 1 componente para el caso del agua potable. En el caso del riego se presenta la cobertura en la satisfacción de los derechos de agua de esta Asociación de Regantes, la satisfacción en la práctica esperada del patrón de riego para el cultivo de forrajera y en la satisfacción de la demanda de agua (ET) por ese mismo cultivo. En el primer caso la satisfacción corresponde a la relación entre el volumen anual extraída por el canal de la asociación y el volumen anual del derecho de agua que posee la asociación. La Figura III-41 muestra la serie mensual de estos volúmenes de agua. En el segundo caso la satisfacción corresponde a la relación entre el volumen anual de riego aplicado para el cultivo considerado y el volumen anual del riego bajo el supuesto de aplicación de riego considerada en el modelo (lamina de 50 mm cada 25 días). La Figura III-42 muestra los valores anuales para el caso del cultivo de forrajera en esta asociación. Finalmente, en el último caso la satisfacción corresponde a la relación entre el volumen anual de evapotranspiración actual y el volumen anual de evapotranspiración potencial. Figura III-43 muestra los valores mensuales para el caso del cultivo de forrajera.

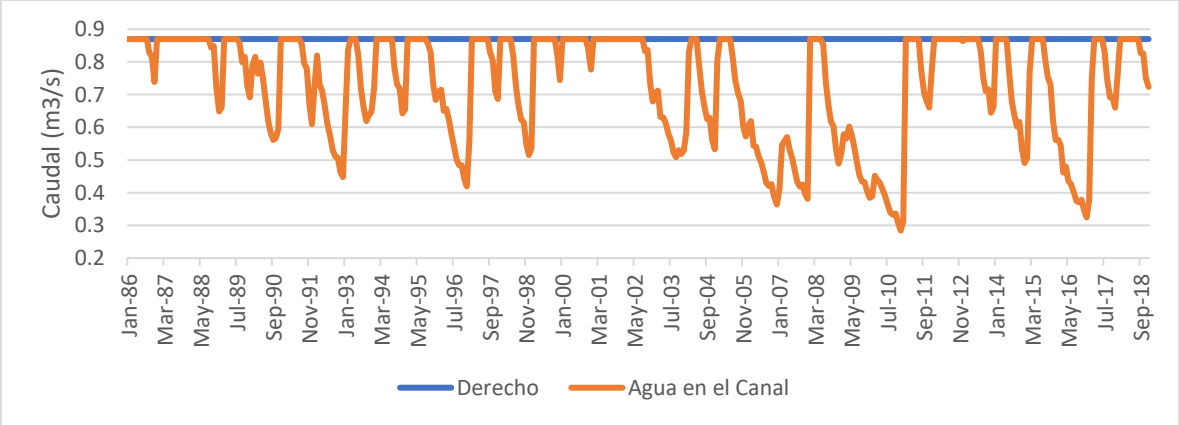


Figura III-41: Serie mensual de agua en un canal versus el derecho de aprovechamiento (m3/s).
Fuente: Elaboración propia.

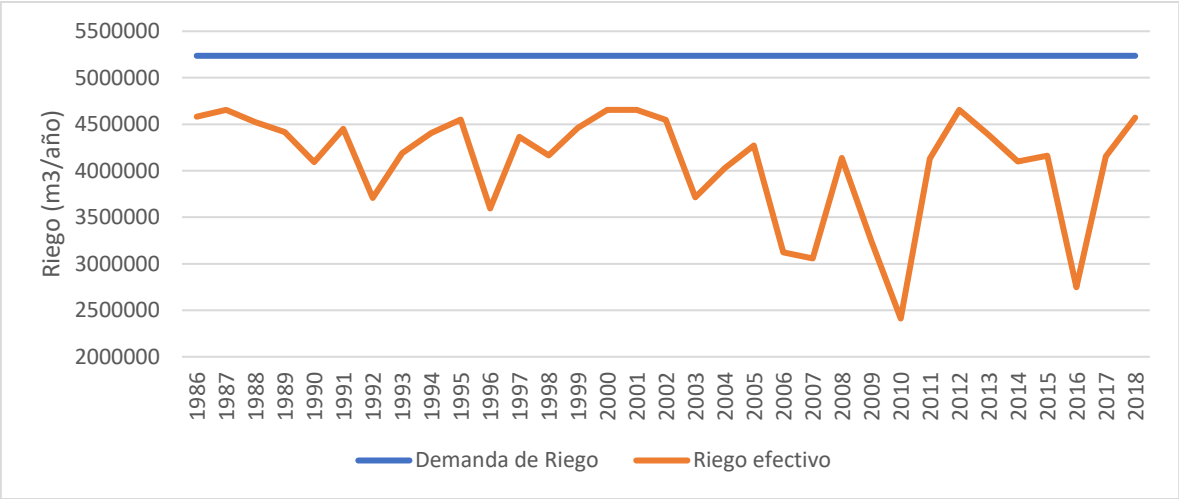


Figura III-42: Serie anual de demanda de riego versus riego efectivo anual (m3/año).
Fuente: Elaboración propia.

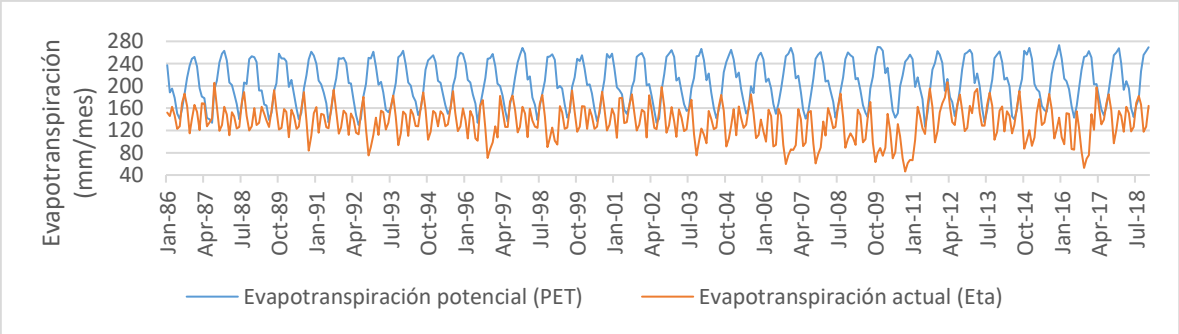


Figura III-43: Serie mensual de evapotranspiración potencial (PET) versus evapotranspiración actual (ETa) ejemplo cultivo de forrajera.
Fuente: Elaboración propia.

La Tabla III-26 sintetiza los resultados presentando los promedios de cobertura para estas 3 maneras distintas de evaluar la demanda por recursos hídricos desde el punto de vista de regantes en esta zona de la cuenca del Salar de Atacama.

Tabla III-26: Ejemplo de cobertura en distintas métricas para evaluar las necesidades de regantes de la Asociación de Regantes del Río San Pedro (valores en %)

Cobertura de Derecho	Cobertura de Riego	Cobertura de Evapotranspiración
83,4	78	65,8

Fuente: Elaboración Propia.

Para representar el uso de agua potable por la población, se consideró el número de habitantes por localidad (INE, 2017). Al considerar a la población residente y flotante, se estimó una dotación promedio de 287 l/persona/día (Etapa II). En la Tabla III-27 se indica la población por localidad y su demanda y cobertura promedio.

Tabla III-27: Población y cobertura de demanda hídrica promedio.

Localidad	Número de habitantes	Demanda hídrica (l/s)	Demanda cubierta (l/s)	Cobertura
Río Grande	27	0,1	0,1	100%
San Pedro de Atacama	2.621	9	9	100%

Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a las necesidades de agua de la vegetación, en la Figura III-44 y Figura III-46 se muestran las series promedio diarias de evapotranspiración potencial (PET) y la evapotranspiración actual (ETa) de 2 catchments con vegetación natural en el sistema de la zona del salar. En el primer caso se presenta el catchment asociado a bosques en la zona del Bosque de Tambillo en el sector nor-este de la cuenca (subcuenca 14). En el segundo caso se presenta el catchment asociado a matorral en la zona del sistema lagunar de Aguas de Quelana en el sector este de la cuenca (subcuenca 151). Estos tipos de coberturas no solo tienen acceso hídrico mediante las precipitaciones, sino que también pueden acceder a la napa subterránea y extraer desde ahí en la medida que lo necesiten (Figura III-8). En el primer ejemplo, se puede observar que la demanda promedio del bosque no está siendo satisfecha durante el año, observándose que esto ocurre especialmente en algunos años en la serie diaria (Figura III-45) donde se aprecian los eventos en que la evapotranspiración actual se encuentra por debajo de la evapotranspiración potencial, pudiendo incluso llegar a niveles nulos. La profundidad de la napa en este caso se encuentra fluctuando en torno a la profundidad de raíces generando en parte las diferencias en estrés hídrico. Por otro lado, en el ejemplo del matorral en Aguas de Quelana con un nivel freático más somero, se observa que la vegetación siempre logra abastecer sus necesidades de ET sin presentar momentos de estrés hídrico.

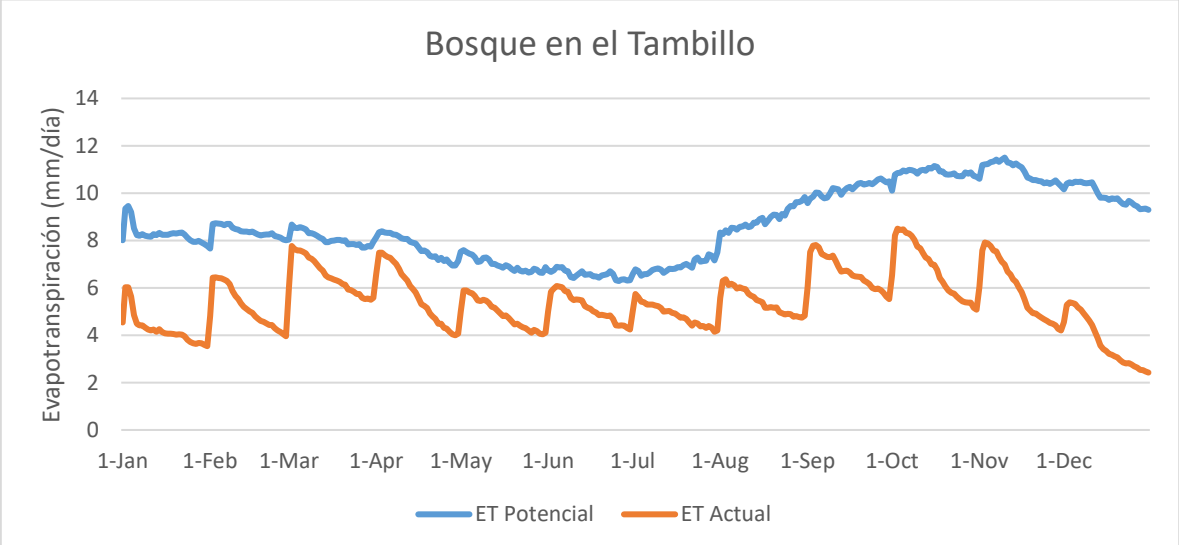


Figura III-44: Serie promedio diaria de evapotranspiración potencial (PET) versus evapotranspiración actual (ETa) ejemplo bosque en el Tambillo.

Fuente: Elaboración propia.

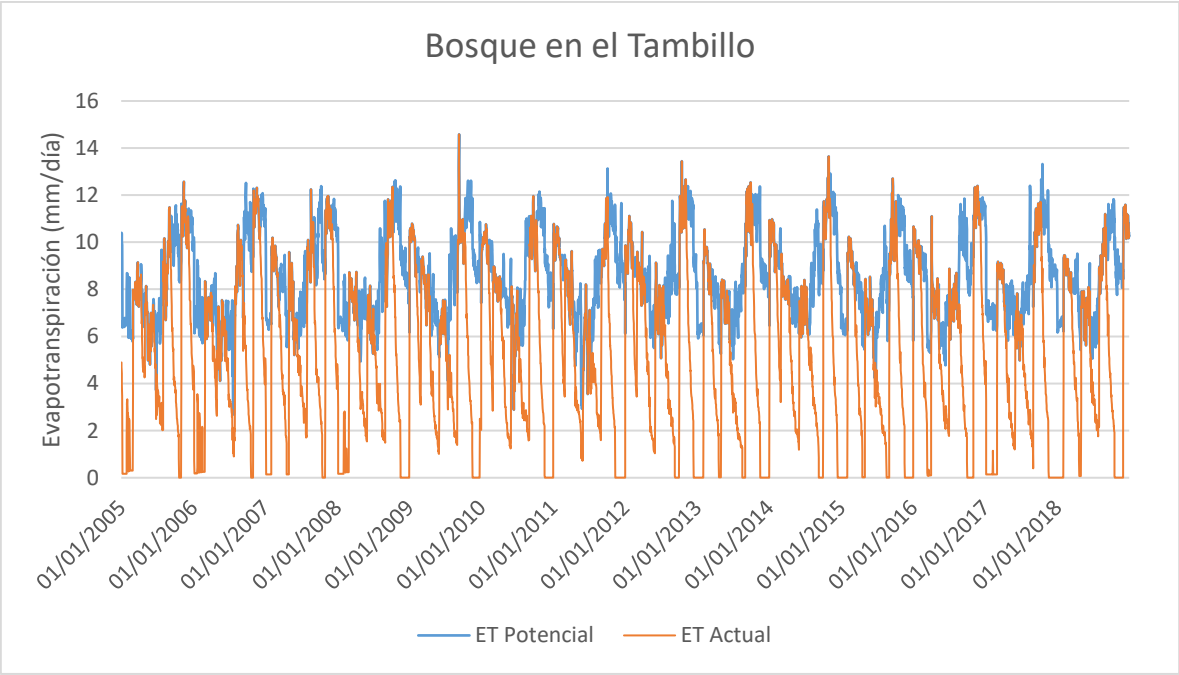


Figura III-45: Serie diaria de evapotranspiración potencial y actual. Ejemplo bosque en el Tambillo periodo 2005-2018.

Fuente: Elaboración propia.

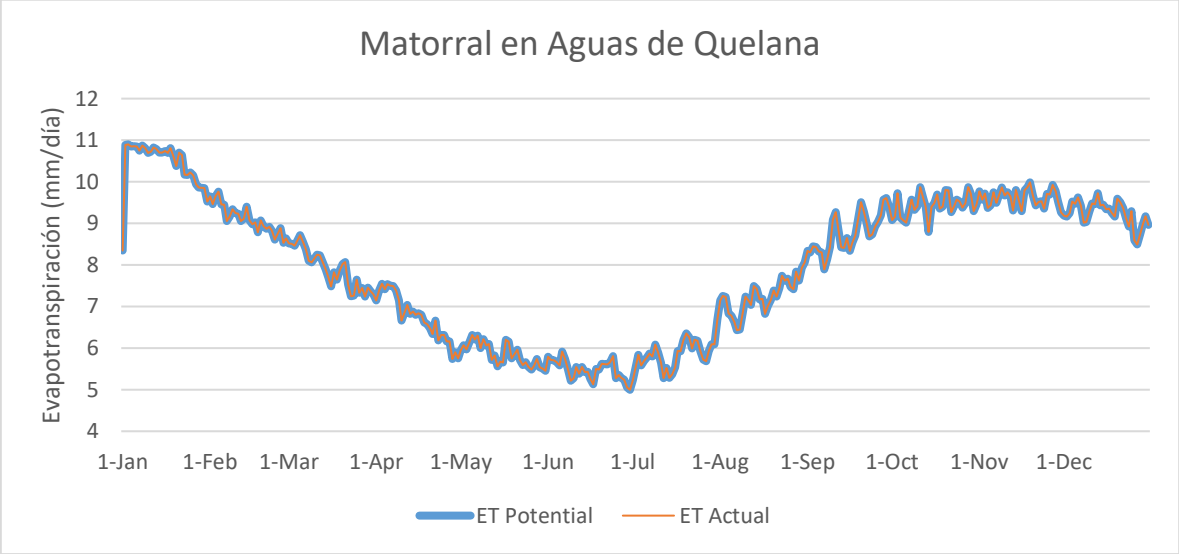


Figura III-46: Serie promedio diaria de evapotranspiración potencial (PET) versus evapotranspiración actual (ETa) ejemplo matorral en el Sistema Lagunar Aguas de Quelana.

Fuente: Elaboración propia.

III.4.4 Conclusiones, limitaciones y recomendaciones

Utilizando la herramienta de simulación WEAP se han desarrollado 2 modelos hidrológicos superficiales que cubren la totalidad de la cuenca del Salar de Atacama. Uno de estos modelos representa lo que se ha denominado el sistema de cuencas laterales o las cuencas de mayor altura que reciben los principales montos de precipitación en esta cuenca endorreica. El segundo modelo cubre el sistema hidrológico superficial sobre lo que se denomina el sistema del salar que es donde se desarrolla un acuífero que recibe aportes desde estos sistemas laterales y de precipitación a través de una recarga directa. Ambos modelos se desarrollan de manera separada por aspectos prácticos asociados a su manejo computacional. Los modelos desarrollados representan distintas unidades de modelación que cubren toda la superficie de la cuenca, cada una poseyendo condiciones climáticas homogéneas. Los modelos pueden representar las extracciones de agua superficial que en esta cuenca están destinados principalmente a consumo de agua potable y a riego de cultivos. Las modelos son capaces de representar condiciones históricas y también proyecciones futuras climáticos (potenciales) y de cambios en las necesidades de agua fresca.

Pese a las capacidades que entrega esta herramienta de simulación es importante destacar que el modelo tiene ciertas limitaciones que pueden ser reducidas en el futuro para mejorar su representación. Algunas de estas limitaciones y recomendaciones para futuras etapas son las siguientes:

- **Escasa información hidrológica para calibrar caudales**: Pese a la extensión de la cuenca existen muy pocos registros de caudales suficientemente largos y con buena disponibilidad de datos para poder calibrar de manera satisfactoria modelos de simulación hidrológica. La estación fluviométrica con mayor cantidad de información es la ubicada en el Río San Pedro en Cuchabrachi, pero tiene problemas de registro de caudales especialmente durante la ocurrencia de crecidas que son comunes en los meses de verano. El resto de las subcuencas tiene poca información fluviométrica y los aforos son escasos lo que dificulta la representación de procesos complejos de infiltración y afloramiento muy comunes en este tipo de cuencas. Estas limitaciones han obligado a buscar mecanismos alternativos de validación incluyendo caudales esperados de recarga hacia al sistema del salar. Se recomienda instalar estaciones fluviométricas estables en la zona de quebradas del sistema de cuencas laterales de la zona este de la cuenca y realizar aforos que permitan identificar con mayor precisión zonas de afloramiento de y de infiltración en cauces.

- **Limitada resolución espacial**: La caracterización de coberturas y uso de suelo se basa principalmente en el uso de productos satelitales que tienen capacidad limitada para identificar superficie pequeñas cubiertas por vegetación que en un ambiente árido cobran gran importancia ambiental y cultural. Por otra parte, la estrategia de modelación asume que la cobertura de suelo se mantiene estática en el tiempo. Para mejorar estos supuestos se sugiere trabajar con actores locales y campañas en terreno para identificar las superficies de vegetación más relevante que debe ser representadas en el modelo.

- **Limitada representación de ciertos ecosistemas sensibles**: pese a que la herramienta de simulación representa las necesidades hídricas de la vegetación presente en la cuenca incluyendo la posibilidad de extraer agua desde napas subterráneas, tiene limitaciones al momento de representar detalles de ecosistemas específicos sensibles como los sistemas lagunares ubicados en la zona marginal este del Salar de Atacama. El desarrollo de herramientas de simulación de tipo ecológico más sofisticas pueden ser desarrolladas en el futuro y acopladas a este modelo de simulación a escala regional.

- **Información respecto de usos de agua superficial**: existe escasa información que permita caracterizar de manera adecuada las necesidades de recursos hídricos y la manera en que estas necesidades se ven satisfechas a través de la extracción de agua desde cauces naturales. Se espera que en un trabajo en contacto con actores locales se puede obtener información clave para poder representar de manera adecuada usos relevantes en la cuenca como por ejemplo el agua potable y el riego de cultivos.

III.5 Modelo hidrogeológico y acople con el modelo hidrológico superficial

III.5.1 Introducción

En el presente capítulo se presenta la metodología y los resultados de acople del modelo numérico hidrogeológico de base (MODFLOW), desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021), y el modelo hidrológico superficial (WEAP), presentado en el capítulo III.4. Como complemento a esta introducción se presenta a continuación una breve descripción del modelo numérico hidrogeológico de base desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021) y una revisión de la experiencia respecto del acople entre los modelos WEAP y MODFLOW. Recordar que el modelo desarrollado por CORFO-PUC en las cuencas laterales se llama modelo Lateral y el modelo desarrollado en la zona del modelo numérico hidrogeológico de CORFO-Amphos21 (2021) se llama modelo Salar-Monturaqui.

III.5.1.1 Breve descripción del modelo numérico hidrogeológico de base

El modelo numérico hidrogeológico de flujo de agua tridimensional desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021) fue construido con la versión MODFLOW-USG[61], abarcando una superficie de 10.174 km^2 (las celdas activas, donde el modelo realiza los cálculos, cubren una superficie de 4.533 km^2) (Figura III-47) cubriendo el Salar de Atacama y algunas zonas de las cuencas laterales que aportan con recargas laterales y superficiales al acuífero del salar. En sistemas donde dominan dos fluidos de distinta densidad, el llevar todos los niveles a un equivalente de una única densidad permite una mejor representación de los flujos en la interfaz entre estos fluidos que al modelar niveles piezométricos (Marazuela et al., 2018), adicionalmente, hay una mayor cantidad de niveles medidos en zonas donde predomina la salmuera, por lo que los parámetros hidráulicos fueron calibrados para que el modelo represente niveles equivalentes de salmuera. Debido a esto, el modelo tridimensional de flujo a escala regional debe ser complementado con un modelo a escala local para representar la dinámica que ocurre en la interfaz entre salmuera y agua fresca, como lo son los perfiles SEAWAT para la modelación de flujo con densidad variable, presentados en el capítulo III.6.

[61] https://www.usgs.gov/software/modflow-usg-unstructured-grid-version-modflow-simulating-groundwater-flow-and-tightly

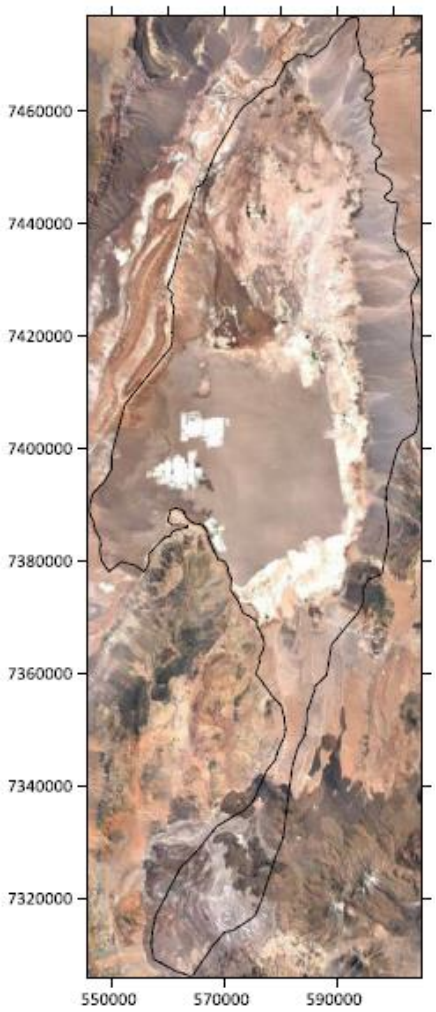


Figura III-47: Delimitación de la zona activa del modelo numérico hidrogeológico.
Nota: El modelo numérico abarca toda la zona mostrada en el cuadro, sin embargo, las celdas activas, donde el modelo numérico realiza los cálculos, abarcan únicamente la zona delimitada por la línea negra.
Fuente: Informe CORFO-Amphos21 (2021).

El modelo considera las siguientes entradas y salidas de agua (condiciones de borde):

- **Caudales prescritos**: Recarga lateral por escorrentía y percolación, salidas por evapotranspiración, reinyecciones y extracciones. A excepción de las extracciones y reinyecciones, los caudales prescritos consideran una estacionalidad mensual con valores promedio anuales constantes en el tiempo. Las extracciones y reinyecciones corresponden a valores declarados y reportados por CORFO-Amphos21 (2021).

- **Caudal areal**: Recarga directa por lluvia y caudales superficiales provenientes de las cuencas laterales. La recarga directa se considera constante, a excepción de la zona del núcleo, donde se incorpora una señal adimensional para representar las variaciones en los niveles medidos causadas por las precipitaciones.

- **Condición de borde mixta mediante el paquete de drenes y de evaporación por segmentos de MODFLOW**: Interfaz agua dulce-salmuera, zona de lagunas y evaporación desde la napa.

III.5.1.2 Acople de modelos WEAP y MODFLOW para la modelación integrada de recursos hídricos

Para el proceso de acople entre los modelos WEAP y MODFLOW se consideró la metodología propuesta por DGA, DICTUC y SEI (2019ª), DGA y PUC (2019b) y Sanzana et al. (2021) . En los trabajos mencionados previamente se aborda una serie de pasos para llevar a cabo la modelación integrada de recursos hídricos considerando experiencia internacional y local. La modelación integrada superficial-subterránea es un trabajo que requiere de equipos multidisciplinarios, hidrólogos e hidrogeólogos, que sean capaces de generar una herramienta integrada que permitan llevar a cabo un balance lo más completo posible del área de estudio. En la modelación integrada el énfasis en partes diferentes del ciclo hidrológico en las disciplinas de hidrología e hidrogeología ha llevado a distintos enfóquese de modelación. Aunque ninguna de las dos disciplinas ignora la continuidad del ciclo hidrológico, a menudo uno de los dos dominios se simula en detalle (hidrológico o hidrogeológico) mientras que el segundo se modela en forma simplificada o impuesta. (Staudinger et al., 2019) (Figura III-48). Barthel y Banzhaf (2016) también han mostrado las principales diferencias conceptuales que deben ser previamente revisadas al momento de trabajar con un enfoque de modelación completamente integrada a escala regional. En este proyecto se incorporó el modelo lateral y superficial, presentado en el capítulo III.4, para representar la hidrología superficial a partir de forzantes climáticas que reemplazará a las condiciones de borde que en el modelo numérico hidrogeológico de base se incorporaron como un valor promedio con cierta estacionalidad para representar los balances de un modelo conceptual. Este enfoque permite conectar 2 modelos de flujo, sin embargo, la modelación de densidad variable no es explícita a menos que se incorpore un paquete especializado, como lo son los paquetes SWI2 o SEAWAT de MODFLOW.

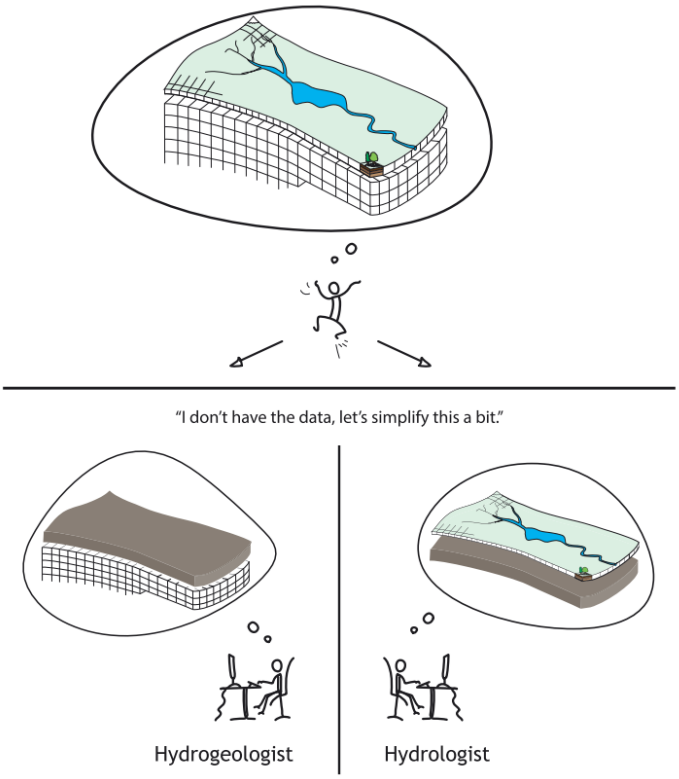


Figura III-48: Diferentes Enfoques de modelación: Los hidrólogos y los hidrogeólogos.
Nota: Los hidrólogos y los hidrogeólogos tratan los extremos del ciclo hidrológico con más detalle en cada una de sus respectivas áreas de trabajo. Los principales procesos considerados en los modelos hidrogeológicos son los flujos de agua subterránea, el almacenamiento subterráneos y movimientos de contaminantes. Los principales procesos considerados en los modelos hidrológicos son la interceptación, la evapotranspiración, la infiltración, los procesos de generación de escorrentía y la percolación profunda. A pesar de que normalmente se presentan los modelos como totalmente integrados, los "modelos totalmente integrados" que aplican los hidrólogos/hidrogeólogos se simplifican debido a los datos disponibles, a la importancia de un proceso, etc.
Fuente: Staudinger et al. (2019).

De todas formas, cabe mencionar que la actual estrategia de modelación integrada aplicada en este estudio es la misma que se ha utilizado en los planes estratégicos de gestión integrada que la DGA ha estado llevando a cabo a nivel nacional (DGA, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d, 2020e, 2020f). Si bien actualmente existen las herramientas para llevar a cabo este tipo de labores, tanto desde el punto de vista de insumos computacionales y de capital humano avanzado calificado, se debe mencionar que puede incluir trabajos extremadamente intensivos en tiempo para lograr una herramienta de modelación de calidad aceptable, por lo que subestimar el tiempo en estas labores trae consigo un costo directo en la calidad final del producto. Las ventajas son bastante relevantes, por ejemplo, por mencionar algunas:

a) Recargas subterráneas completamente dependientes de forzantes climáticas, por lo que se facilita cualquier análisis de proyección futura o evaluación de proyecciones climáticos.

b) Cuantificación de efectos de sobrexplotación de cuencas laterales aportantes a sectores del núcleo, tanto desde el punto de vista de disminución de flujos en sus vertientes como disminución del flujo hacia la recarga que abastece la zona central del salar.

c) Flexibilidad para actualizar e incorporar nueva información de monitoreo de control de extracción efectiva por parte de la DGA o por parte de autoridades o agrupaciones interesadas en los planes de seguimientos ambientales. Esta actualización podría realizarse en extracciones realizadas tanto desde la zona de cuencas laterales o por actividades antrópicas (mineras, industriales) ubicadas en la zona central del núcleo.

Sin embargo, este tipo de acoples también tiene algunas restricciones:

1. WEAP es compatible únicamente con las versiones 2000, 2005 y NWT de MODFLOW.
2. WEAP considera que los valores de algunos paquetes de MODFLOW son constantes en el tiempo, como por ejemplo los paquetes ETS y DRN (Evaporación por segmentos y drenes).
3. En WEAP, las entradas y salidas al modelo MODFLOW por pozos y recarga pueden ser incorporados mediante sitios de demanda ficticios (Demand Site) o unidades de modelación hidrológicas (Catchments). Lo que permite que finalmente se traduzcan como elementos del paquete WEL o se actualicen como RCH en MODFLOW, según corresponda.
4. En WEAP la repartición de caudales de los sitios de demanda sobre las celdas del modelo MODFLOW es proporcional al tamaño de celda.

En el caso de la cuenca del Salar de Atacama, considerado como un medio altamente complejo debido a todas sus interacciones, ambos dominios, superficial y subterráneo, se modelaron de la forma más detallada posible tomando en cuenta la máxima cantidad de antecedentes disponibles a la fecha. Si bien existe un amplio abanico de estudios e información previa (en particular, recopilada, actualizada y sintetizada por los trabajos de Amphos21 para CORFO en 2021), todavía se observan espacios importante de mejoras en el monitoreo, que deberían subsanarse en el futuro implementando una red mayor de control de variables tanto superficiales (precipitación, temperatura y evaporación a distintas alturas o zonas del núcleo) como subterráneas (cuantificación de flujos en zonas con menor información), desde el punto de vista de variables no solo de cantidad del recurso, sino también de su calidad.

III.5.2 Metodología

La metodología que se llevó a cabo en el presente estudio se esquematiza en los siguientes pasos:

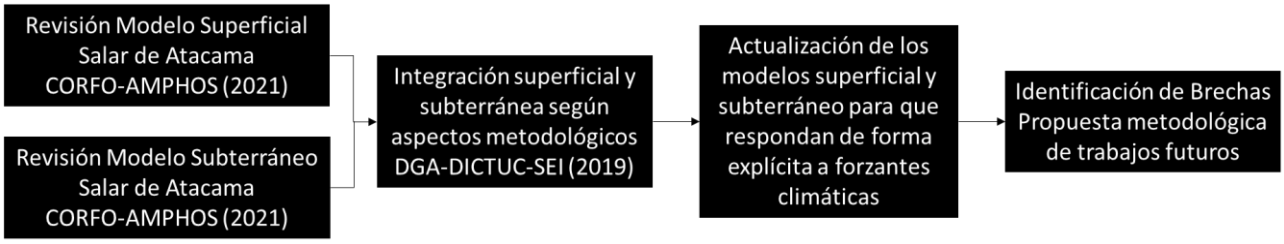


Figura III-49: Pasos Metodológicos para el desarrollo del acople entre WEAP y MODFLOW utilizado en este estudio.

En un primer paso se revisó el modelo superficial y subterráneo del estudio de CORFO-Amphos21 (2021), el que permitió obtener información clave para llegar a una integración de ambos dominios a través de los pasos metodológicos propuestas en DGA-DICTUC-SEI (2019). Posteriormente se llevaron a cabo actualizaciones que permiten representar la climatología, la hidrología y, por consiguiente, las recargas al núcleo de forma explícita a partir de forzantes climáticas.

III.5.2.1 Acople de los modelos hidrogeológico e hidrológico superficial

III.5.2.1.1 Cambio de motor modelo numérico hidrogeológico

Dado que WEAP es compatible únicamente con las versiones 2000, 2005 y NWT de MODFLOW, y el modelo base desarrollado por CORFO-Amphos21(2021), se construyó con la versión MODFLOW USG, se debe realizar un cambio de motor y ajuste de los parámetros del nuevo solver. Mediante la herramienta Groundwater Vistas v8[62] se realizó el cambio de motor de MODFLOW USG a MODFLOW 2005 y mediante la herramienta ModelMuse 4[63] se realizó el cambio de motor de MODFLOW 2005 a MODFLOW NWT (el cambio de MODFLOW USG a MODFLOW NWT no se puede realizar directamente en Groundwater Vistas v8). El posterior trabajo y manejo de los archivos fue realizado en Python mediante la Librería FloPy[64], desarrollada por el USGS. Los resultados y análisis del cambio de motor y manejo del modelo numérico desde WEAP previo al acople se presentan en el Anexo 2 de la Etapa III. La versión de MODFLOW con la cual se realizó el acople es la versión MODFLOW NWT.

III.5.2.1.2 Construcción del modelo hidrogeológico Salar-Monturaqui en WEAP

En WEAP, el acuífero del modelo Salar-Monturaqui está representado por un único nodo de aguas subterráneas de WEAP, el cual se distribuye espacialmente en las celdas activas de la grilla del modelo MODFLOW (Figura III-50).

[62] https://www.groundwatermodels.com/ESI_Software.php
[63] https://www.usgs.gov/software/modelmuse-a-graphical-user-interface-groundwater-models
[64] https://www.usgs.gov/software/flopy-python-package-creating-running-and-post-processing-modflow-based-models

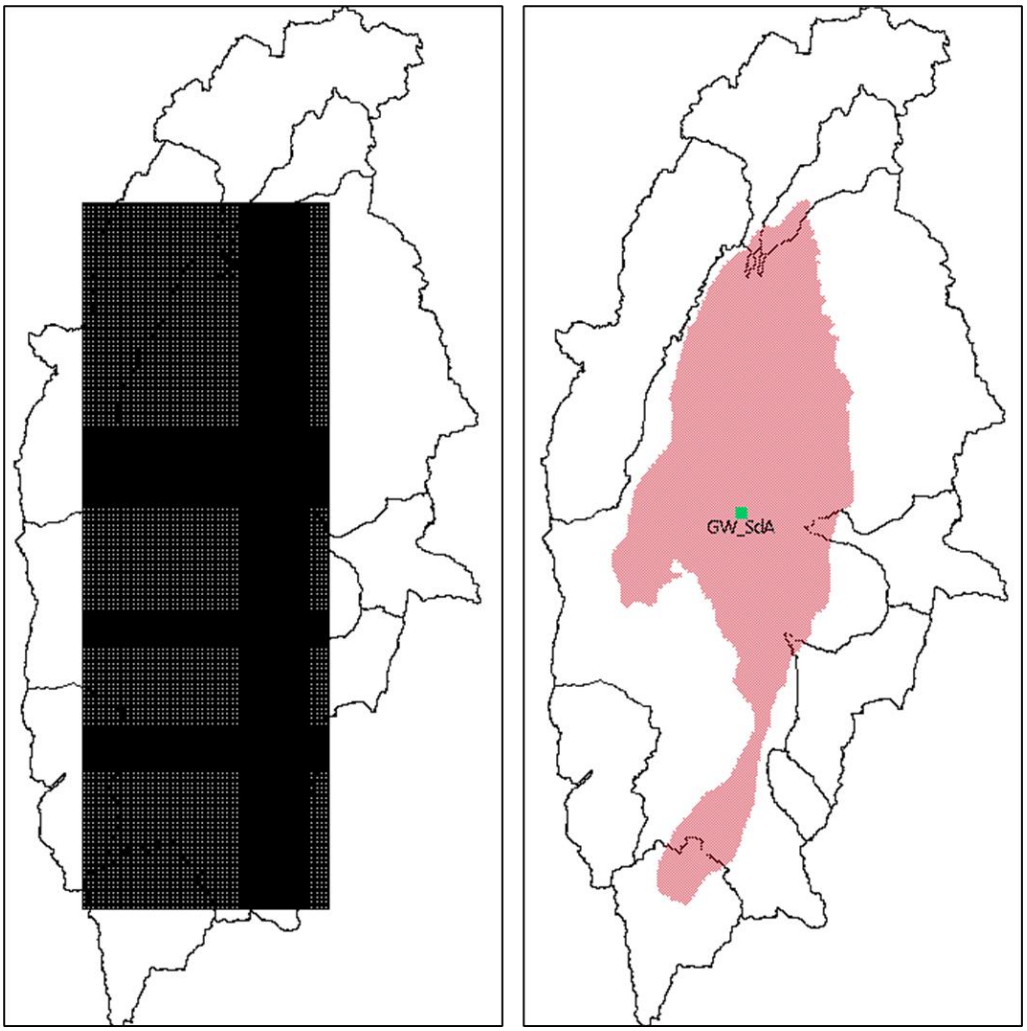


Figura III-50: Representación del acuífero modelado en MODFLOW en la vista esquemática de WEAP.

Nota: La figura de la izquierda muestra la distribución de la grilla del modelo MODFLOW en la vista esquemática de WEAP y en la figura de la derecha se muestran las celdas activas que representan la espacialización del nodo de aguas subterráneas de WEAP.

Fuente: Elaboración propia

Al nodo de aguas subterráneas que se presenta en esta conceptualización esquemática se le inyecta agua mediante enlaces de flujos de retorno o enlaces de infiltración/escorrentía de WEAP y se extrae agua mediante enlaces de transmisión de WEAP. Estos enlaces de transmisión pueden estar conectados con sitios de demanda para poder representar bombeos de agua fresca o salmuera o flujos de evaporación de manera directa desde el acuífero para satisfacer necesidades de transpiración por parte de la vegetación presente en el modelo Salar-Monturaqui. Estas conexiones con el nodo de aguas subterráneas se muestran de forma esquemática en la Figura III-51. La ocurrencia de cada uno de estos flujos tiene una distribución espacial de acuerdo con lo definido en los modelos WEAP y MODFLOW de base (Figura III-52). A continuación, se explica con mayor detalle cómo se resuelven cada uno de estos flujos básicos desde y hacia el sistema de aguas subterráneas del modelo Salar-Monturaqui:

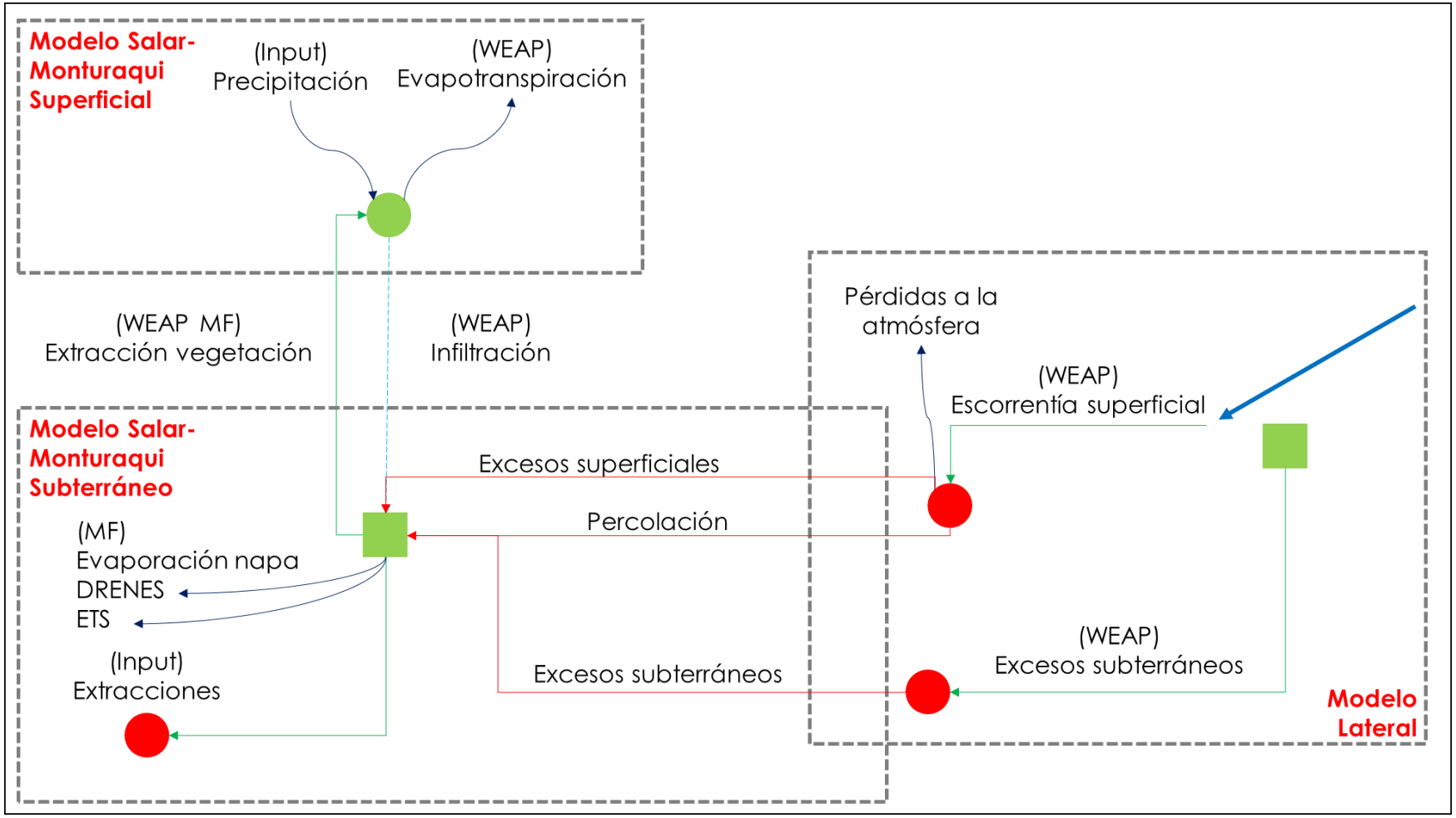


Figura III-51: Esquema de las conexiones entre las zonas superficiales y subterráneas del modelo Salar-Monturaqui (Modelo SM) y el modelo lateral.

Nota: La esquematización se simplificó para mostrar los nodos finales que conectan con sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui. Las flechas verdes son enlaces de transmisión, las líneas discontinuas celestes son enlaces de infiltración y las líneas rojas son flujos de retorno. Los nodos cuadrados verdes son nodos de aguas subterráneas, los círculos verdes son unidades de modelación hidrológica y los círculos rojos son sitios de demanda. Los términos entre paréntesis representan si el flujo es una entrada al modelo integrado (Input), es calculado por WEAP (WEAP), es calculado por MODLFOW (MF) o es calculado simultáneamente por WEAP y MODFLOW (WEAP MF).

Fuente: Elaboración propia

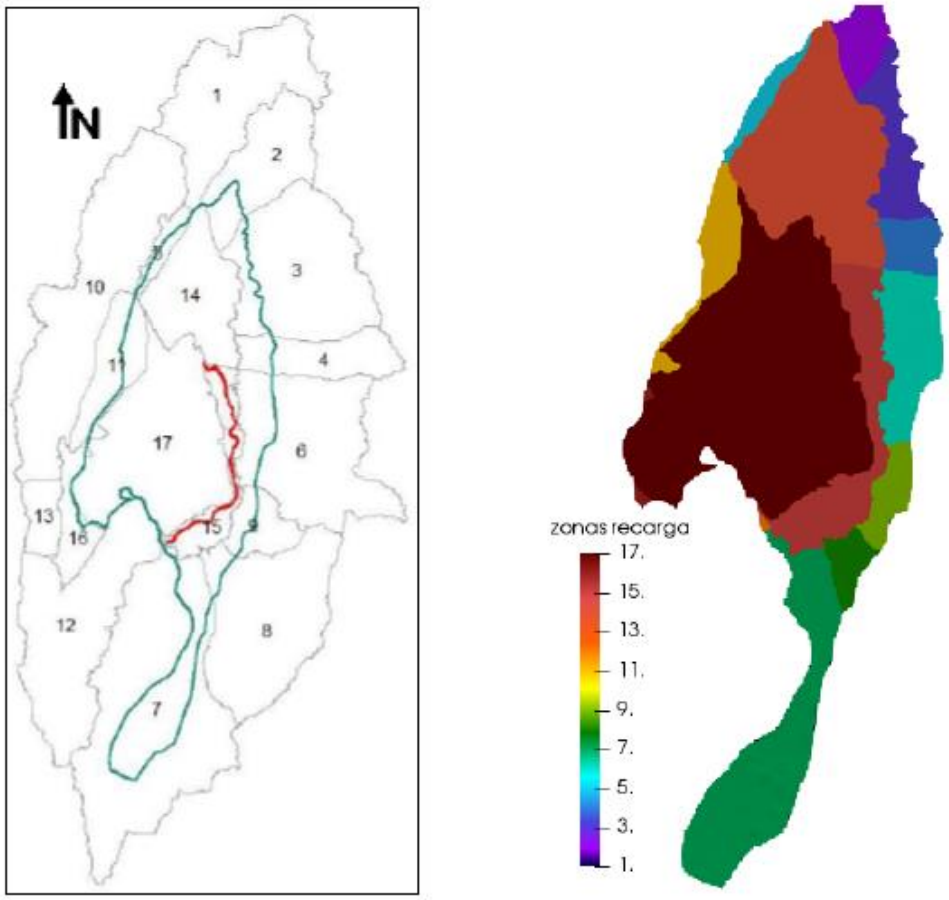


Figura III-52: Zonificación de subcuencas definida en el modelo de base.
Fuente: CORFO-Amphos21 (2021).

III.5.2.1.2.1 Recargas del modelo lateral

La zonificación y estrategia para distribuir los caudales subterráneos y superficiales provenientes del modelo lateral es la misma a la definida por CORFO-Amphos21 (2021), donde los caudales superficiales son considerados una recarga areal en la respectiva zona y los caudales subterráneos se distribuyen en el contorno de las celdas activas. Se consideró que la recarga lateral, resultante de los escurrimientos subterráneos y una fracción de los superficiales del modelo lateral, se inyectan en la capa 3 del modelo numérico. En la subcuenca 7 se consideró que la totalidad de los escurrimientos superficiales infiltran y se incorporan como recarga lateral. Cada una de estas zonas fue representada con un sitio de demanda para los excesos resultantes superficiales y otro para los subterráneos. La estructura de nodos de WEAP para inyectar recargas al acuífero es la siguiente (Figura III-53):

- Cada sitio de demanda está enlazado a un nodo de "otros suministros" (other supply) de WEAP mediante un enlace de transmisión. Este nodo tiene la capacidad de entregar un caudal alto, según sea requerido por el sitio de demanda al cual estará enlazado.

- Cada sitio de demanda tiene definido una demanda mensual que corresponde a los resultados provenientes del modelo lateral y un consumo de un 0%. Esta estrategia de demanda mensual y consumo nulo, junto a un nodo de "otros suministros" con una alta capacidad permite generar una inyección igual a la demanda hacia el acuífero.

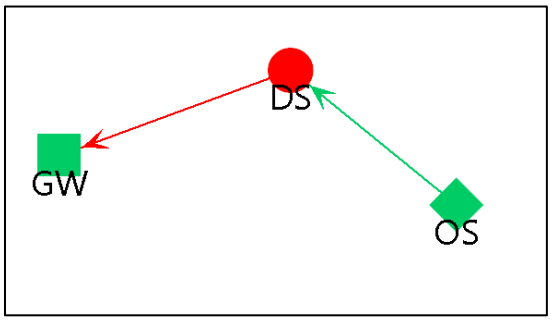


Figura III-53: Esquema para la inyección de caudales hacia el acuífero en WEAP.
Nota: GW corresponde al nodo acuífero de WEAP, DS corresponde al nodo sitio de demanda de WEAP y OS corresponde al nodo de "otros suministros" de WEAP.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura III-54 se presenta la vista esquemática en WEAP con la estructura de nodos y enlaces que representan las entradas provenientes del modelo lateral. Adicionalmente se demarca con un color distinto las celdas del modelo MODFLOW donde se reparten las inyecciones de cada zona.

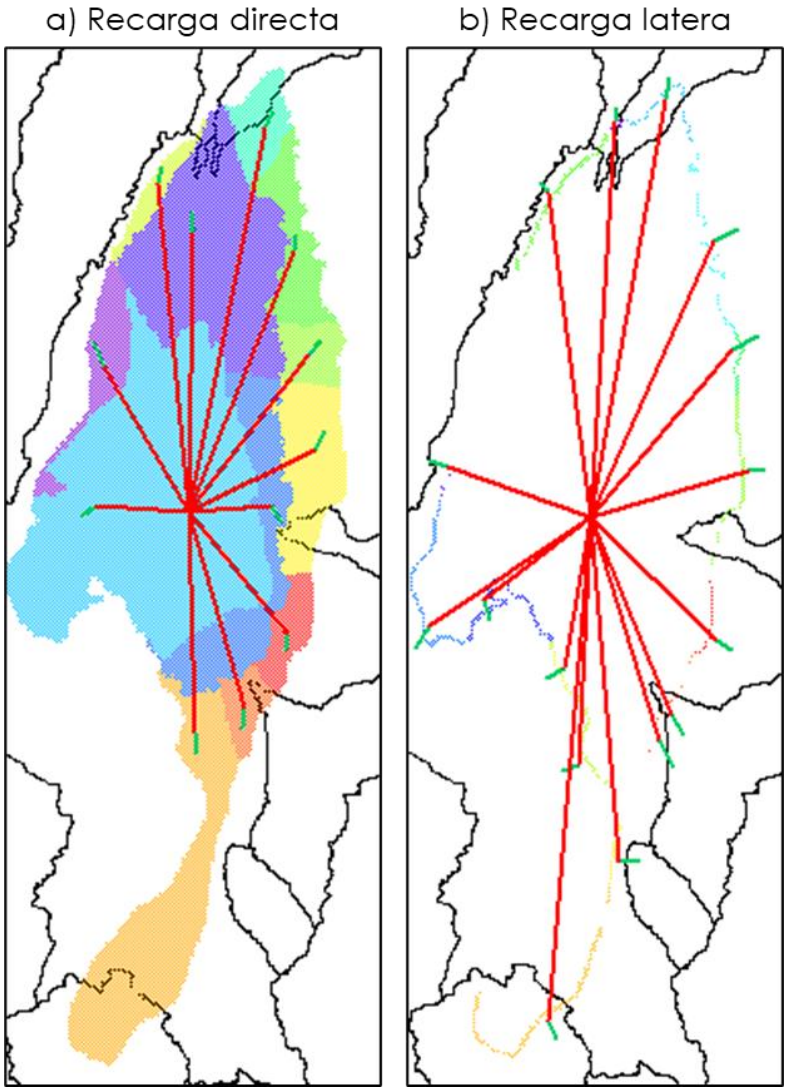


Figura III-54: Vista esquemática del modelo WEAP con la estructura de nodos que representan las entradas provenientes del modelo lateral.
Nota: La figura de la izquierda muestra la estructura para la componente superficial y la figura de la derecha, la componente subterránea.
Fuente: Elaboración propia

III.5.2.1.2.2 Extracciones e inyecciones

Las extracciones e inyecciones se incorporaron de la misma forma que en el modelo base, desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021). Para esto se construyeron tantos sitios de demanda como celdas con extracción/inyecciones definidas en el modelo base. Los caudales para extracciones e inyecciones definidos para las empresas mineras corresponden a las extracciones e inyecciones declaradas y representadas en el modelo desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021). En el caso de las extracciones en CAPRA, en CORFO-Amphos21 (2021) se definido un caudal constante de 50 l/s, el cual se mantuvo en este modelo. En la Figura III-55 se muestra la representación de inyecciones y extracciones implementada en WEAP.

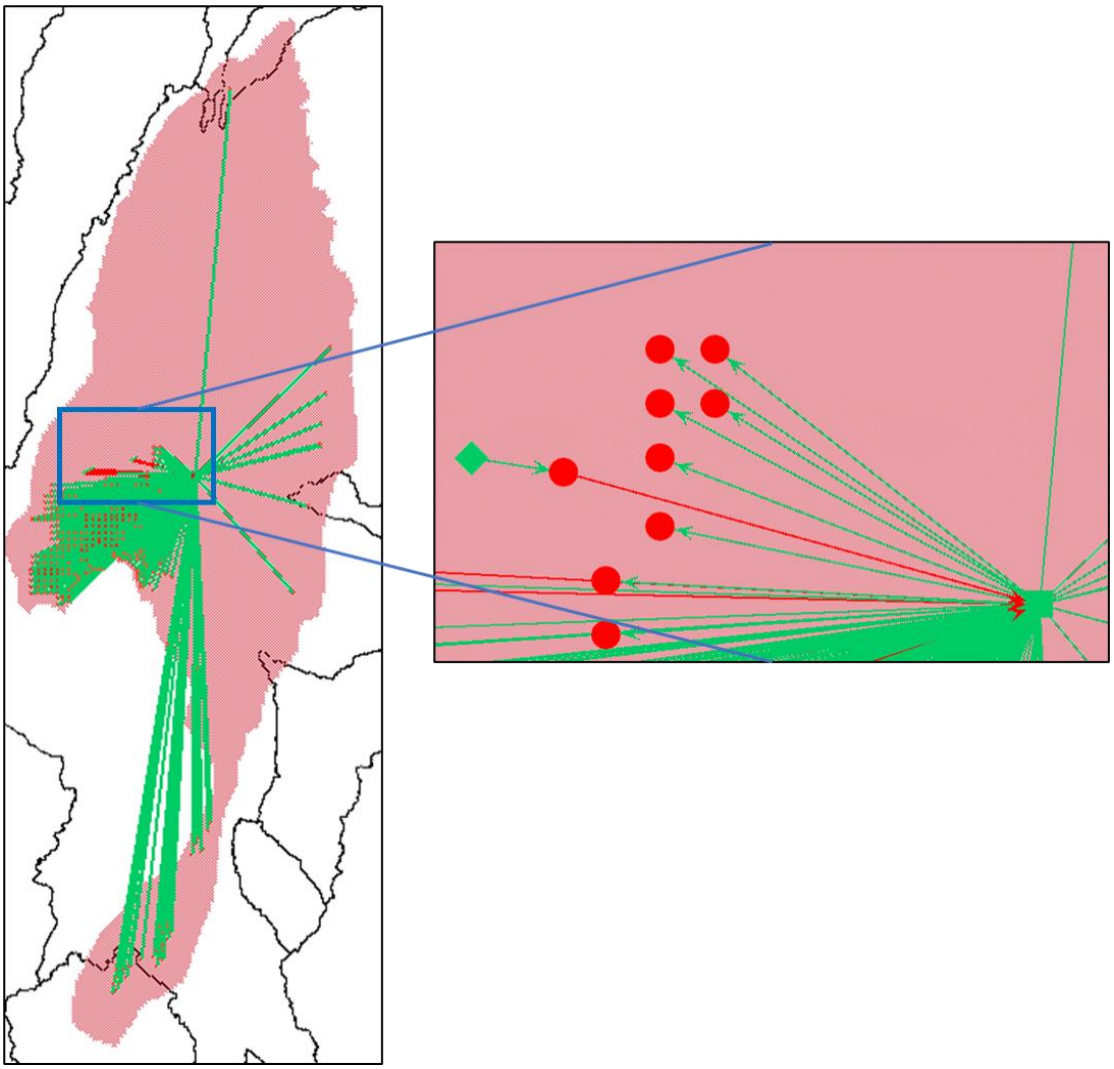


Figura III-55: Vista esquemática de la estructura de nodos de WEAP para representar las extracciones e inyecciones en el acuífero del modelo Salar-Monturaqui.
Nota: Debido a la cantidad de celdas, no se muestra la espacialización de estas, sin embargo, los sitios de demanda se ubican exactamente sobre la celda del modelo MODFLOW con la cual WEAP interactúa.
Fuente: Elaboración propia

III.5.2.1.2.3 Infiltración producto del balance superficial del modelo Salar-Monturaqui

En este modelo se explicitó la recarga resultante de la infiltración del sistema superficial. Como se describió en el Capítulo III.4.2.1, los caudales resultantes del balance hídrico de los nodos de modelación hidrológica de WEAP llegan al acuífero mediante un enlace de infiltración/escorrentía y mediante un flujo de retorno que redirige al acuífero los caudales que WEAP determinó que deberían escurrir superficialmente. Ambas entradas son consideradas como una recarga areal en la superficie del modelo MODFLOW. En la Figura III-56 se muestra la distribución espacial de las zonas de recarga de cada uno de los nodos de modelación hidrológica.

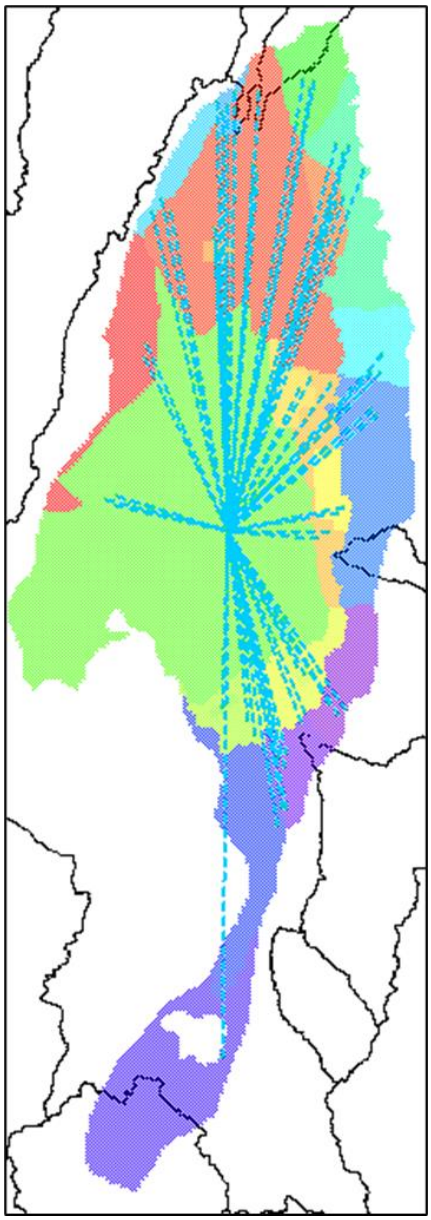


Figura III-56: Vista esquemática de la estructura de nodos de WEAP en la superficie del modelo MODFLOW y las zonas que abarcan cada uno de estos nodos de modelación hidrológica.
Nota: Para no saturar la figura, en esta representación no se incorporan lo sitios de demanda ni sus flujos de retorno, los cuales se distribuyen en las mismas áreas que los nodos de modelación hidrológica.
Fuente: Elaboración propia

En la subcuenca 7 del modelo Salar-Monturaqui se consideró que la zona que se muestra en blanco en el sector sur de la Figura III-56 no está asociada a infiltración por parte del nodo de modelación hidrológico. Esto, debido a que la conductividad hidráulica horizontal y vertical de esta zona corresponde a valores del orden de 0,003 y 0,0003 m/d, lo cual es del orden de magnitud de capas prácticamente impermeables (Coduto, 1999; Whitlow, 1994).

III.5.2.1.2.4 Evapotranspiración por parte de la vegetación

En este modelo se explicitó la extracción de agua desde la napa para representar la evapotranspiración por parte de la vegetación. Como se describió el Capítulo III.4.3.1, a las unidades de modelación hidrológica de WEAP se les extrajo la fracción correspondiente a suelos con matorral, bosques y cultivos, los que se enlazaron con el nodo de aguas subterránea con un enlace de transmisión. En la Figura III-57 se presenta la distribución de los distintos tipos de vegetación, sin diferencias el nodo de modelación hidrológico al cual corresponden, en las celdas de MODFLOW.

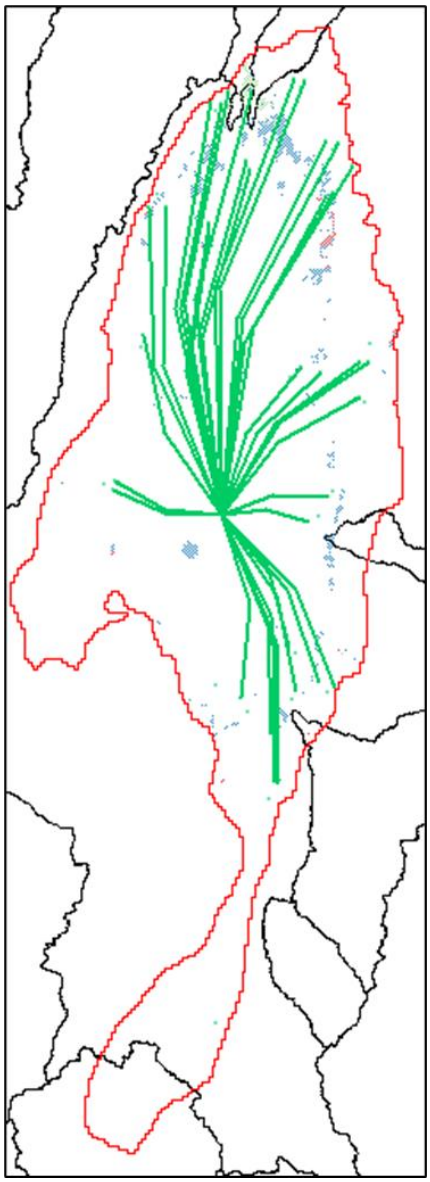


Figura III-57: Distribución de la vegetación sobre las celdas de MODFLOW considerada para extraer agua desde la napa en función de la profundidad de raíces y de la napa.
Nota: La espacialización no muestra a qué nodo de modelación hidrológica corresponde, sino que el tipo de vegetación a lo largo de la grilla MODFLOW.
Fuente: Elaboración propia

Para cada zona definida para los nodos de modelación hidrológica se definió un set de celdas (en base a un cruce entre la grilla y la capa de usos de suelo de Zhao et al. (2016)) que corresponden a un tipo de vegetación en particular, celdas de las cuales la vegetación extraerá agua. WEAP calcula para cada paso de tiempo el nivel de la napa (corregida para representar el nivel piezométrico) en una celda ubicada en el centroide del set de celdas definido y evalúa si el largo de raíz es mayor a la profundidad de la napa desde el nivel del terreno.

III.5.2.1.3 Distribución de los caudales provenientes del modelo lateral en el modelo Salar-Monturaqui

El modelo Salar-Monturaqui recibe una componente superficial y subterránea por parte del modelo lateral. Se considera que, de la escorrentía superficial del modelo lateral, 10 l/s se evaporan a la atmósfera y que los caudales menores a 500 l/s infiltran antes de entrar a la zona del modelo Salar-Monturaqui, incorporándose a los excesos subterráneos. Esto implica que los excesos superficiales entrantes al modelo Salar-Monturaqui corresponde a la escorrentía superficial sobre los 500 l/s. Esto se puede expresar como:

$$SUB_{SM} = SUB_{lat} + \begin{cases} 0, & SUP_{lat} \leq 10\ L/s \\ SUP_{lat} - 10, & 10\ L/s < SUP_{lat} < 500\ L/s \\ 490, & SUP_{lat} \geq 500\ L/s \end{cases}$$

$$SUP_{SM} = \begin{cases} 0, & SUP_{lat} \leq 500 \\ SUP_{lat} - 500, & SUP_{lat} < 500\ L/s \end{cases}$$

donde SUB y SUP corresponden a los caudales subterráneos y superficiales provenientes del modelo lateral, lat, y que llegan al modelo Salar-Monturaqui, SM. El total subterráneo entrante al modelo Salar-Monturaqui corresponde a la recarga lateral y los excesos netos superficiales más la infiltración resultante del modelo hidrológico superficial del modelo Salar-Monturaqui corresponden a la recarga directa.

III.5.2.1.4 Ajuste de parámetros hidráulicos

Debido a la diferencia de caudales en algunas zonas del sector sur y este, se ajustó la conductividad hidráulica en estas zonas para representar los niveles medidos y presentados por CORFO-Amphos21 (2021). Este ajuste consistió en disminuir entre un 10 y 15% la conductividad hidráulica en la zona sur y aumentarla en un 25% en el sector este, cerca del pozo de Camar y en un 200% en el norte. Esta variación mantiene los valores acordes al modelo conceptual definido por CORFO-Amphos21 (2021). La variación en conductividad se realizó en todas las capas por igual y su espacialización se muestra en la Figura III-58.

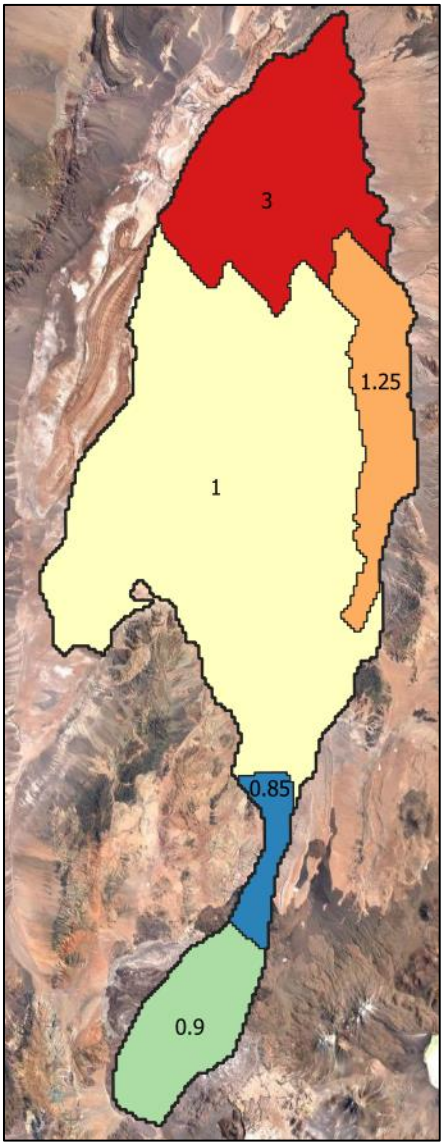


Figura III-58: Zonas donde se modificó la conductividad hidráulica y el valor con el cual se ponderó el valor inicial definido por CORFO-Amphos21 (2021).
Nota: Se modificaron todas las capas del modelo por igual.
Fuente: Elaboración propia

III.5.3 Resultados

A continuación, se presenta la vista esquemática de WEAP del modelo Salar-Monturaqui (Figura III-59), desarrollado en este capítulo. Luego, se presentan los balances resultantes en el sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui (los balances del sistema superficial se presentan en el III.4) y los resultados en términos de estadígrafos y comparación de niveles observados y simulados.

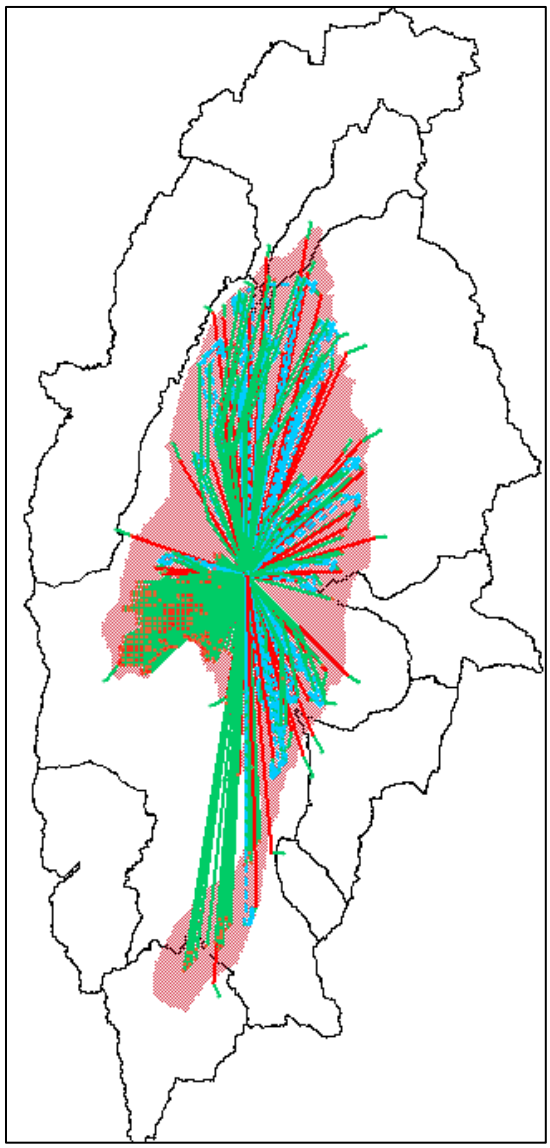


Figura III-59: Vista esquemática de los nodos WEAP y celdas activas MODFLOW del modelo Salar-Monturaqui.
Fuente: Elaboración propia.

III.5.3.1 Balances

La componente numérica hidrogeológica del modelo integrado cierra con una diferencia entre entradas salidas y variación en el almacenamiento del acuífero menor al 0,0013% para todos los pasos de tiempo en el período 1986 a 2018, lo que da cuenta de una adecuada convergencia del modelo. En la Figura III-60 se muestra la evolución temporal de las principales entradas y salidas al acuífero del modelo numérico, junto a la variación en almacenamiento resultante del modelo integrado.

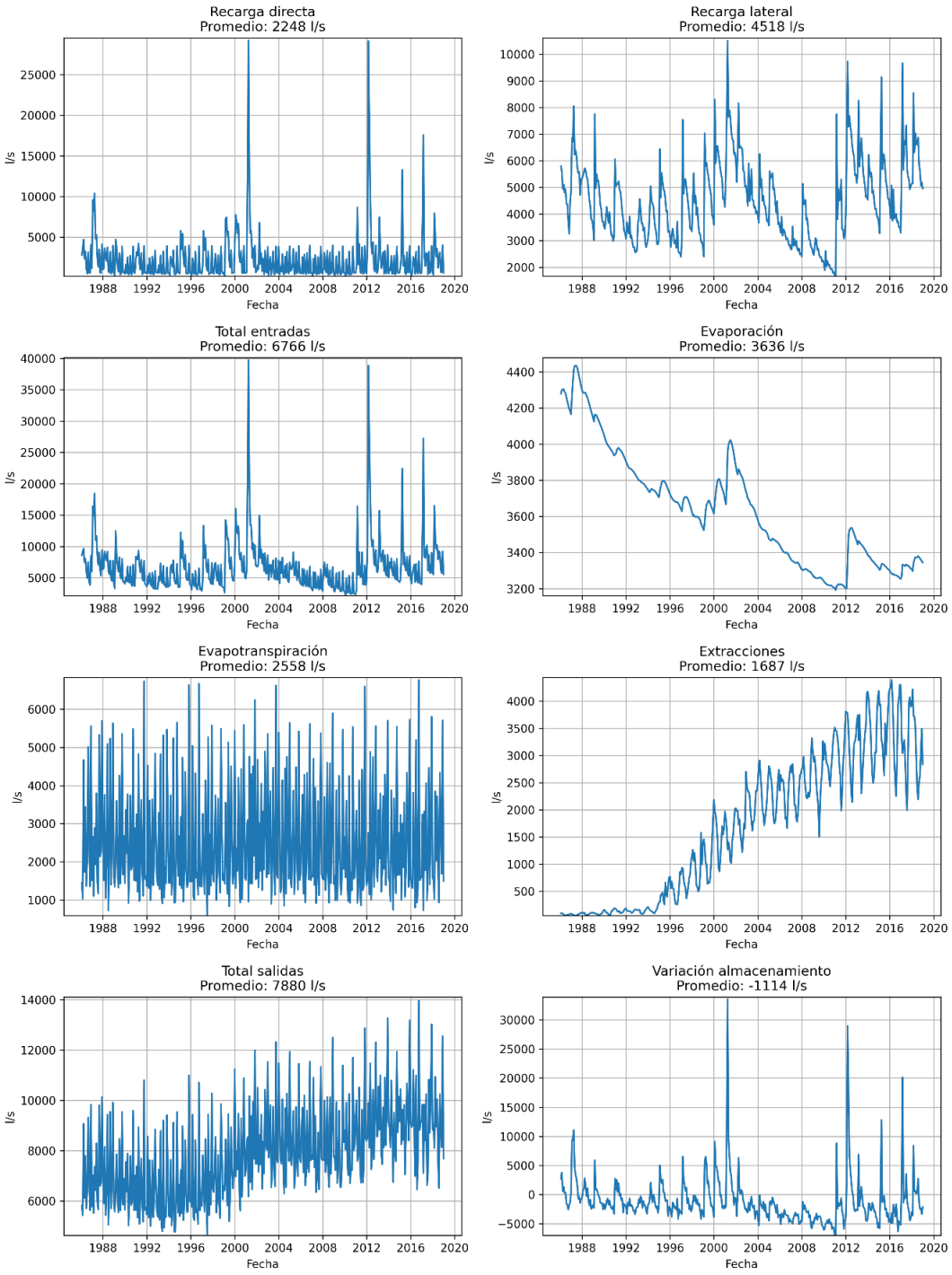


Figura III-60: Componentes del balance del sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui, en el período 1986 a 2018, desarrollado en este proyecto.
Nota: La recarga lateral corresponde a caudales subterráneos provenientes del modelo lateral. La recarga directa comprende los caudales superficiales provenientes del modelo lateral más la infiltración de las unidades de modelación hidrológica del modelo Salar-Monturaqui. La evapotranspiración corresponde a la capacidad de la vegetación de extraer agua desde la napa.
Fuente: Elaboración propia

El modelo integrado presenta la variabilidad natural de las entradas y salidas al acuífero, asociadas a las forzantes climáticas. Estos resultados permiten entender la respuesta del acuífero a forzantes climáticas, las que afectan la recarga proveniente del modelo lateral, la recarga proveniente de la modelación hidrológica en el modelo Salar-Monturaqui, la evapotranspiración por parte de la vegetación y la evaporación desde la napa. En la Tabla III-28 se muestran los caudales medios de las entradas y salidas al sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui en los períodos 1986 – 1999 y 2000 – 2018, junto a los valores estimados en el modelo conceptual desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021). Los períodos 1986 – 1999 y 2000 – 2018 comprenden los períodos previo y posterior al inicio de las extracciones por parte de las empresas mineras. Se consideró el período 1986 a 1999 del modelo integrado para comparar con el período en régimen natural del modelo conceptual.

Tabla III-28: Resumen del balance hídrico del sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui en los períodos 1986 – 1999 y 2000 a 2018, obtenido a partir del modelo integrado y del modelo conceptual.

Término del Balance	Modelo integrado		Modelo conceptual*	
	1986 – 1999	2000 – 2018	Régimen natural	2000 – 2018
Entradas (L/s)				
Recarga directa	1.991	2.437	1.900 a 2.600	1.900 a 2.600
Recarga lateral	4.241	4.723	3.300 a 4.450	3.300 a 4.450
Total Entradas	**6.233**	**7.159**	**5.200 a 7.050**	**5.200 a 7.050**
Salidas (L/s)				
Evaporación	3.902	3.440	3.400 a 4.900	3.200 a 4.600
Evapotranspiración	2.543	2.569	1.700 a 2.050	1.700 a 2.050
Extracciones	352	2.670	100	2.550 a 2.800
Total Salidas	**6.797**	**8.679**	**5.200 a 7.050**	**7.450 a 9.450**
Var. Almacenamiento	**-564**	**-1.520**	**0**	**-2.250 - -2.450**

*Se muestran los valores del modelo conceptual presentado por CORFO-Amphos21 (2021) para el período 2000 – 2018 (p 423 de dicho informe).

Los caudales medios de entrada en ambos períodos están dentro de los rangos definidos por el modelo conceptual (CORFO-Amphos21, 2021) y en el período 2000 a 2018 presentan un aumento de 900 L/s respecto al período 1986 a 1999 en el total de entradas al acuífero producto de las forzantes climáticas. Respecto a las salidas, estas están dentro de los rangos definidos por el modelo conceptual. En las salidas del acuífero, con respecto al período 1986 a 1999, hay un aumento de 2.300 L/s asociado a extracciones, una disminución de 500 L/s en la evaporación desde la napa y una mantención en la evapotranspiración por parte de la vegetación. La variación en la evaporación y evapotranspiración resultante del modelo integrado es consistente tanto con el modelo numérico como conceptual desarrollados por CORFO-Amphos21 (2021). Esta diferencia en salidas genera un aumento en 1.900 L/s en el total de salidas del acuífero. En cuanto a la variación en almacenamiento, hay una disminución de de -500 L/s a -1.500 L/s, indicando un aumento en el vaciamiento, consistente con los resultados obtenidos por CORFO-Amphos21 (2021). En la Figura III-61 se muestran esquemáticamente los balances medios del sistema subterráneo del modelo

Salar-Monturaqui del período histórico y los períodos 1986 – 1999 y 2000 – 2018. En la Figura III-62 se muestra esquemáticamente los balances e interacciones entre el sistema superficial y subterráneo del modelo Salar-Monturaqui y el modelo lateral en el período 1986 a 2018.

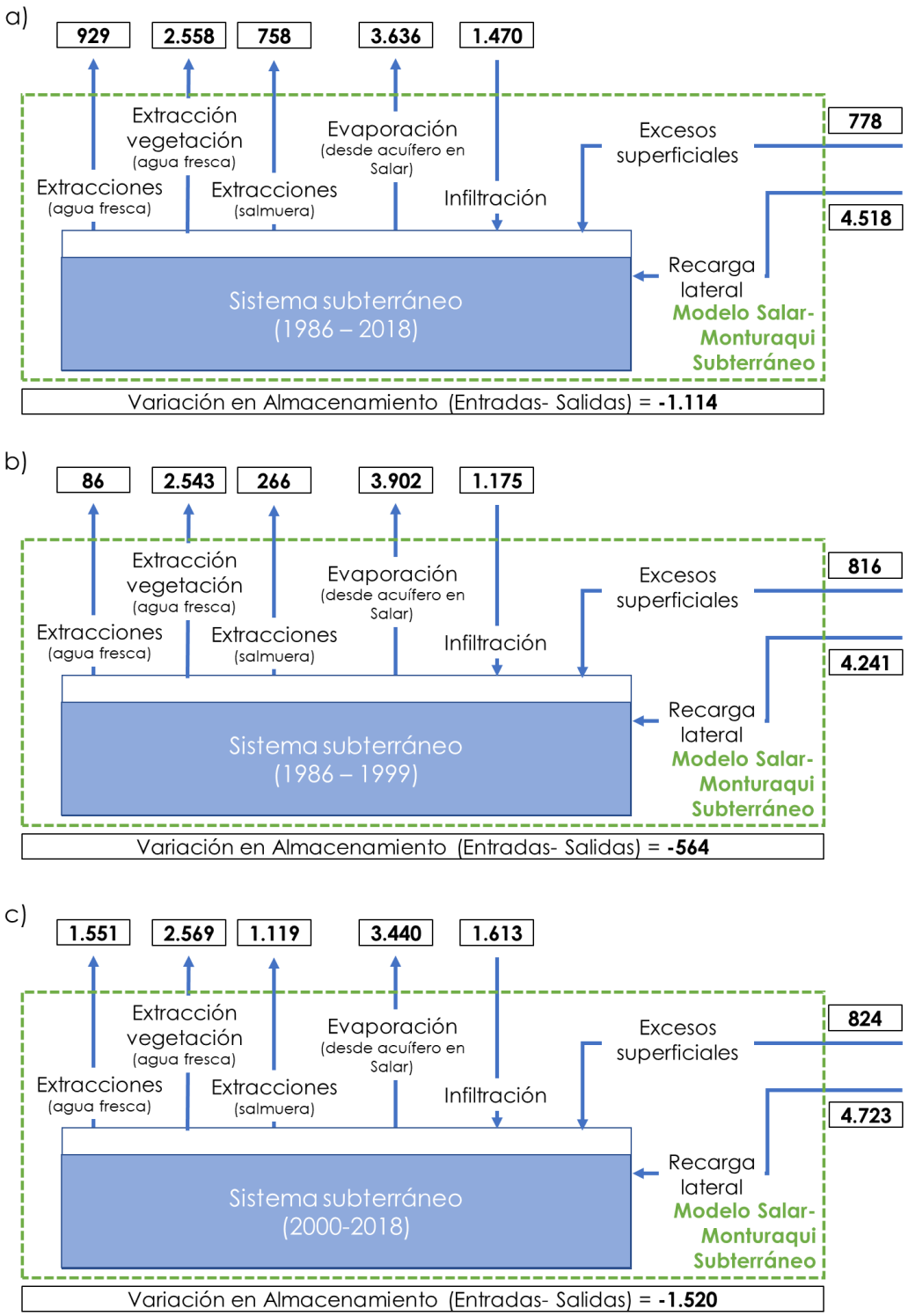


Figura III-61: Resumen del balance hídrico del sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui en los períodos a) 1986 – 2018, b) 1986 – 1999 y c) 2000 – 2018 obtenido a partir del modelo Salar-Monturaqui.

Nota 1: Los valores en L/s; Nota 2: Las series temporales de los componentes del balance se encuentran en la hoja 'Modelo SM subterráneo' del Anexo Digital 1 de la Etapa III.

Fuente: Elaboración propia

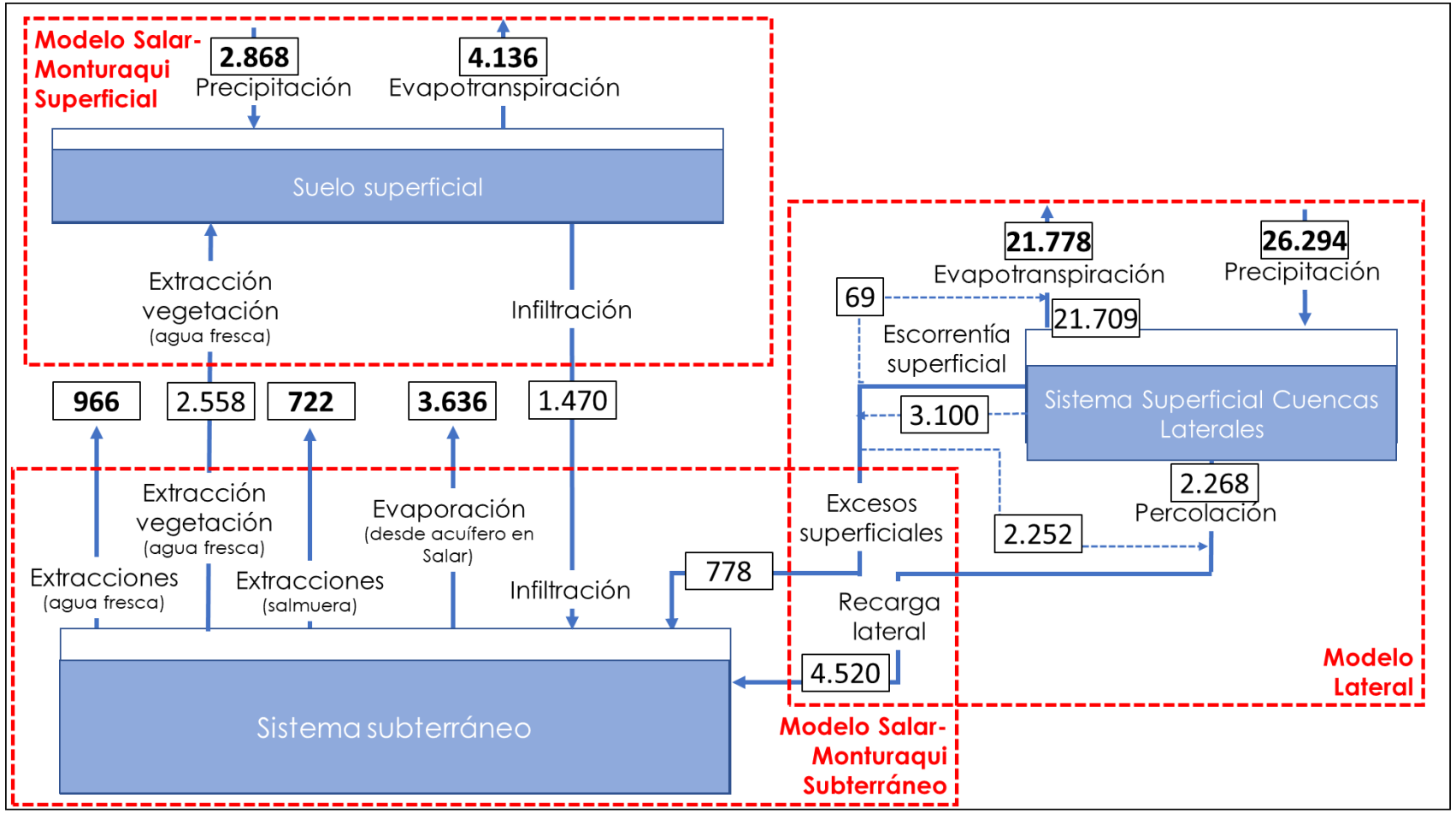


Figura III-62: Resumen del balance hídrico del Salar de Atacama en el período 1986 a 2018 en base a los resultados del modelo integrado.
Nota: Las series temporales de los componentes del balance se encuentran en la hoja 'Flujos mensuales' y 'Flujos anuales' del Anexo Digital 1 de la Etapa III.
Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente al balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama, se realizaron balances del sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui en base a los límites de los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) definidos por la DGA. El dominio del modelo Salar-Monturaqui no abarca la totalidad de la extensión de los SHACS definidos por la DGA (Figura III-63), sino que solamente los SHACs A, B, C y N están integrados en su totalidad, por lo que se consideraron zonas que resultan de la proyección de los SHACS sobre la grilla del modelo Salar-Monturaqui. Esta proyección o intersección de las delimitaciones resulta en 4 zonas de balance:

- Zona N-SM: Correspondiente a la proyección del SHAC N sobre la grilla del modelo Salar-Monturaqui.
- Zona A-SM: Correspondiente a la proyección del SHAC A sobre la grilla del modelo Salar-Monturaqui.
- Zona B-SM: Correspondiente a la proyección del SHAC B sobre la grilla del modelo Salar-Monturaqui.
- Zona C-SM: Correspondiente a la proyección del SHAC C sobre la grilla del modelo Salar-Monturaqui.
- Zona F-SM: Correspondiente a la proyección de los SHACs A1, A2, B1, C1 y C2 sobre la grilla del modelo Salar-Monturaqui.

Esta zonificación no tiene como objetivo ser una nueva delimitación para balances, sino que busca poder aproximar balances por fluido, donde la Zona N-SM representaría zona de salmuera, las Zonas A-SM, B-SM y C-SM, zona de mezcla o donde se localiza la interfaz salina y la Zona F-SM, una zona de agua fresca. En la Figura III-63 se muestra la distribución de las zonas sobre la grilla del modelo numérico. En la Tabla III-29 se presenta el balance hídrico promedio obtenido a partir del modelo numérico para las distintas zonas. Adicionalmente, en la Tabla III-30 se muestra de forma desagregada el balance de la Zona F-SM, donde las Zonas N1-SM, A1-SM, A2-SM, B1-SM, C1-SM y C2-SM corresponden a la proyección de los SHACs N1, A1, A2, B1, C1 y C2 sobre la grilla del modelo Salar-Monturaqui, respectivamente.

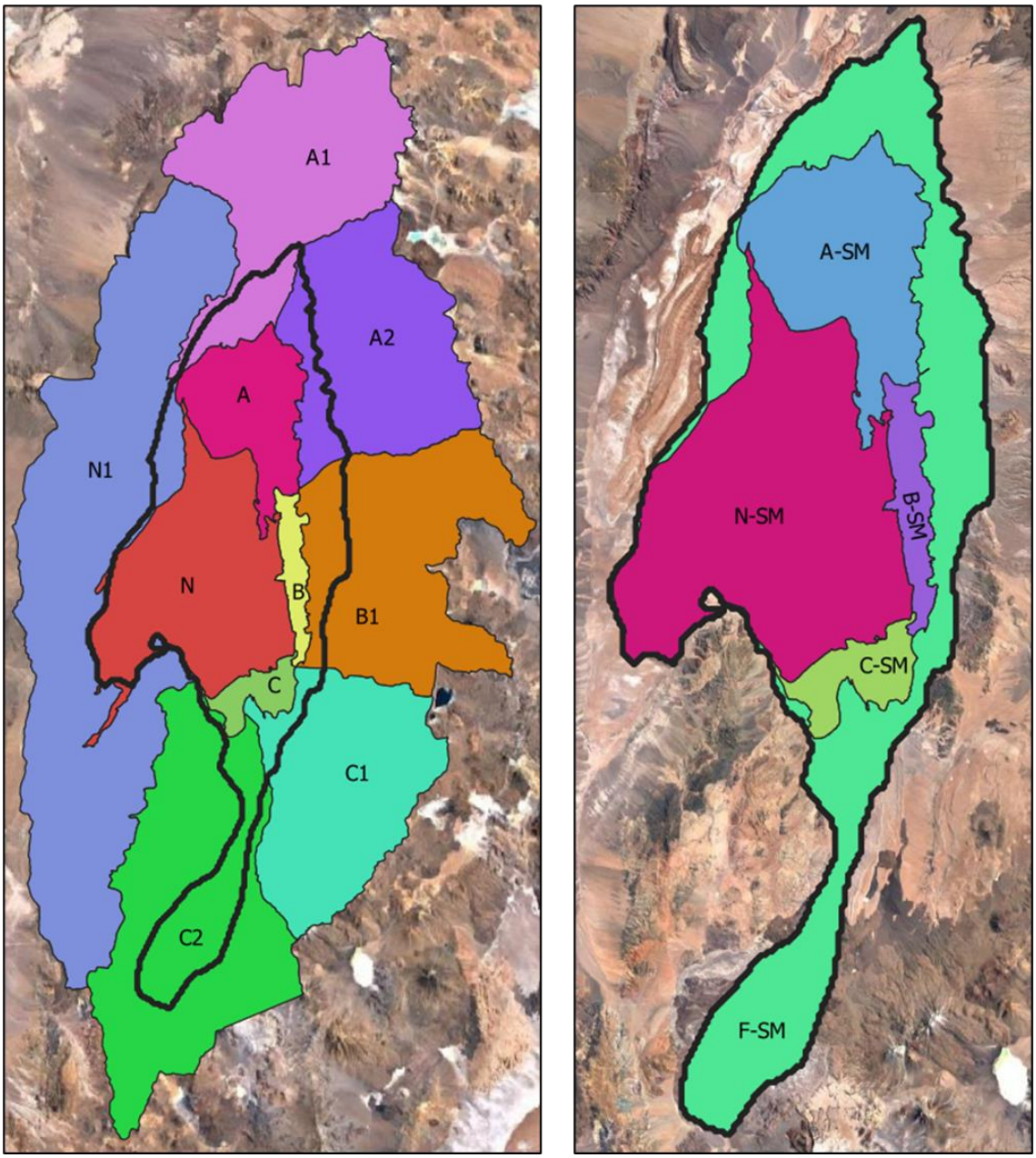


Figura III-63: SHACs definidos por DGA y extensión de las celdas activas del modelo Salar-Monturaqui (izquierda) y zonas consideradas para el análisis de balances del sistema subterráneo del modelo Salar-Monturaqui (derecha).

Fuente: Elaboración propia a partir de mapoteca DGA (2021)

Tabla III-29: Resumen del balance hídrico del sistema subterráneo para las Zonas N-SM, A-SM, B-SM, C-SM y F-SM obtenidos del modelo Salar-Monturaqui en los períodos 1986 – 1999 y 2000 a 2018.

Término del Balance	1986 - 1999					2000 - 2018				
	N-SM	A-SM	B-SM	C-SM	F-SM	N-SM	A-SM	B-SM	C-SM	F-SM
Entradas (L/s)										
Recarga directa	377	835	12	3	765	388	929	17	5	1.098
Recarga lateral	74	0	0	0	4.219	82	0	0	0	4.674
Recarga de otras Zonas	2.037	3.327	1.108	1.578	1.689	2.110	3.428	1.024	1.540	1.770
Total Entradas	**2.487**	**4.163**	**1.119**	**1.581**	**6.673**	**2.828**	**4.357**	**1.041**	**1.545**	**7.543**
Salidas (L/s)										
Evaporación	2.039	1.012	237	610	3	1.685	1.009	206	538	2
Evapotranspiración	12	852	493	163	1.024	12	894	441	162	1.060
Extracciones	263	0	0	1	140	1.120	0	0	5	1.580
Recarga a otras Zonas	459	2.246	398	836	5.800	468	2.325	396	835	5.848
Total Salidas	**2.773**	**4.111**	**1.128**	**1.609**	**6.967**	**3.534**	**4.228**	**1.042**	**1.540**	**8.489**
Var. Almacenamiento	**-286**	**52**	**-8**	**-28**	**-294**	**-706**	**129**	**-1**	**5**	**-946**

Fuente: Elaboración propia

Tabla III-30: Resumen del balance hídrico del sistema subterráneo para las zonas que comprenden la Zona F (Zonas N1-SM, A1-SM, A2-SM, B1-SM, C1-SM y C2-SM) obtenidos del modelo Salar-Monturaqui en los períodos 1986 – 1999 y 2000 a 2018.

Termino del Balance	1986 – 1999						2000 - 2018					
	N1-SM	A1-SM	A2-SM	B1-SM	C1-SM	C2-SM	N1-SM	A1-SM	A2-SM	B1-SM	C1-SM	C2-SM
Entradas (L/s)												
Recarga directa	6	201	418	113	19	7	7	236	486	161	43	165
Recarga lateral	17	955	1.002	765	640	841	39	962	1.100	814	742	1.017
Recarga de otras Zonas	318	480	1.254	314	687	520	343	521	1.323	311	679	534
Total Entradas	**341**	**1.636**	**2.673**	**1.191**	**1.346**	**1.369**	**390**	**1.719**	**2.909**	**1.286**	**1.464**	**1.717**
Salidas (L/s)												
Evaporación	3	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
Evapotranspiración	0	0	524	101	287	111	0	0	567	84	297	111
Extracciones	5	50	0	13	0	72	5	50	0	154	1	1.370
Recarga a otras Zonas	343	1.582	2.221	1.165	1.102	1.270	396	1.647	2.305	1.096	1.092	1.254
Total Salidas	**351**	**1.632**	**2.746**	**1.279**	**1.389**	**1.453**	**402**	**1.697**	**2.872**	**1.334**	**1.390**	**2.736**
Var. Almacenamiento	**-10**	**4**	**-72**	**-88**	**-43**	**-85**	**-12**	**22**	**37**	**-48**	**74**	**-1.019**

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran que en las entradas del balance en la Zona N-SM (Salmuera), A-SM, B-SM, C-SM (zona de mezcla) y F-SM (agua fresca), hay un aumento consistente entre períodos en la recarga directa y recarga lateral. Las entradas desde otras zonas, en general, no varían significativamente entre períodos. Respecto a las salidas, todas las zonas presentan una disminución en la evaporación desde la napa con respecto al primer período, siendo la Zona N-SM la con una mayor disminución. Las zonas donde se concentra el mayor aumento en extracciones, del orden de 1.000 L/s, son las Zonas N-SM (extracciones de salmuera) y F-SM (extracciones de agua fresca). Las salidas hacia otras zonas, en general, no presentan una variación considerable entre períodos. La diferencia entre aumento en las extracciones y recargas generan un aumento en el vaciamiento del acuífero al comparar el período 1986 a 1999 con el período 2000 a 2018, sin embargo, este aumento no es igual para todas las zonas, donde las más afectadas son las Zonas N-SM y F-SM, y en caso contrario, las Zonas A-SM, B-SM y C-SM presentan una disminución en el vaciamiento.

En el caso de la Zona F-SM, la cual se compone de las Zonas N1-SM, A1-SM, A2-SM, B1-SM, C1-SM y C2-SM, se aprecia una tendencia similar a la descrita el párrafo anterior en cuanto a entradas y a los flujos entre zonas. La evaporación de la napa no tiene un valor comparable al resto de los términos del balance y la evapotranspiración por parte de la vegetación no se ve significativamente afectada. En cuanto a las salidas por extracciones, estas se concentran en las Zonas B1-SM y C2-SM, siendo esta última la que presenta un mayor aumento entre períodos, de 1.300 L/s aproximadamente. Esto resulta en que la mayoría de las zonas presentan una disminución en el vaciamiento de su acuífero, a excepción de la Zona C2, la cual pasa de un vaciamiento de 85 L/s a 1.019 L/s, indicando que los cambios asociados la Zona F-SM recaen principalmente en el comportamiento de la Zona C2-SM.

III.5.3.2 Estadígrafos y Niveles

Posterior al ajuste de los parámetros hidráulicos se contrastaron los niveles simulados por el modelo integrado con los niveles medidos y reportados en el informe desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021)[65]. La Tabla III-31 muestra un resumen de los estadísticos de validación del modelo y la Figura III-64 muestra la distribución espacial y frecuencia de los residuales, junto a los niveles observados y simulados contrastados en la línea 1:1.

[65] Se considera en la validación de los resultados las recomendaciones de la guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA.(https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/Guia_uso_modelo_aguas_subterraneas_seia.pdf)

Tabla III-31: Detalle de estadísticos de validación del modelo Salar-Monturaqui.

Parámetro	Validación
Número de pozos	783
Número de residuales	88.263
Promedio de errores residuales (metros)	-1,90
Error medio absoluto (MAE) (metros)	5,98
Raíz del error cuadrático medio (RMSE) (metros)	14,39
MAE normalizado (%)	0,81
RMSE normalizado (%)	1,94
Coeficiente de determinación	0,998

Fuente: Elaboración propia.

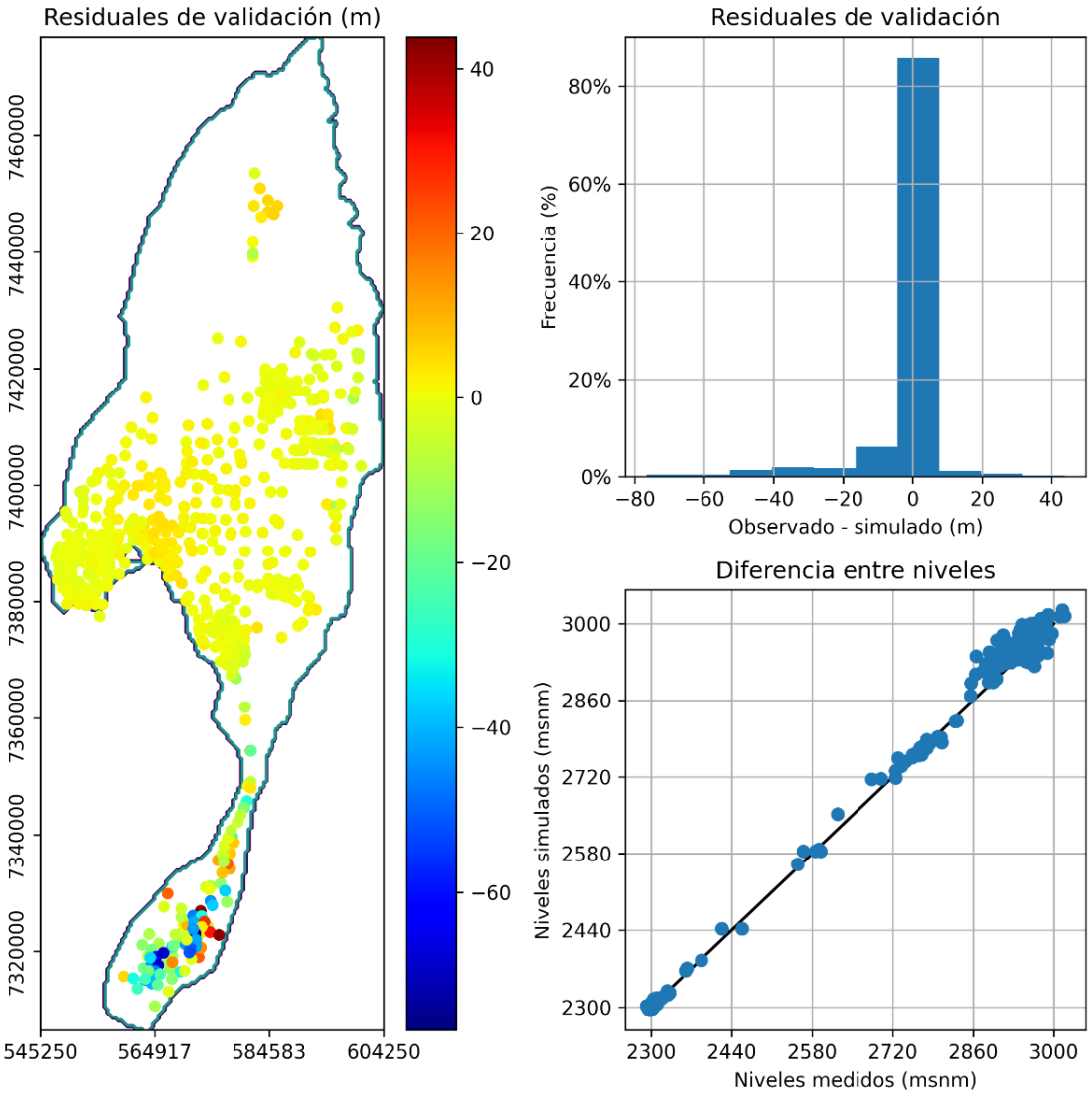


Figura III-64: Residuales de validación del modelo Salar-Monturaqui y diferencia entre niveles medidos y simulados.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la validación muestran que el modelo integrado tiene una buena relación con los niveles medidos, especialmente en la zona del núcleo. En la zona sur es donde está la mayor cantidad de pozos con valores más altos de residuales (tanto negativos como positivos). Sin embargo, los estadísticos de calibración de este modelo son similares a los reportados por CORFO-Amphos21 (2021), lo que muestra que no hay una pérdida de representatividad de los resultados. Para revisar la tendencia de los niveles simulados, en la Figura III-65 se muestra la comparación entre niveles medidos y calculados por el modelo integrado, desarrollado en este proyecto, en el punto de bombeo en San Pedro Cuchabrachi, pozo L3-16 (ubicado en la zona Marginal), pozo MSW-306 (ubicado en la zona del núcleo), pozo P-3 (ubicado en sector de Negrillar-Callejón) y pozo MX-5 (ubicado en el sector Monturaqui). Adicionalmente, en la Figura III-66 se muestra la comparación en los pozos TE-8, DGA-2, NEP-9, MER-34ª y MPW-19, ubicados en la zona sur del modelo numérico, donde se observaron los residuales de mayor magnitud. En el Anexo 3 de la Etapa III se presenta un mayor detalle del ajuste de los niveles simulados versus niveles observados.

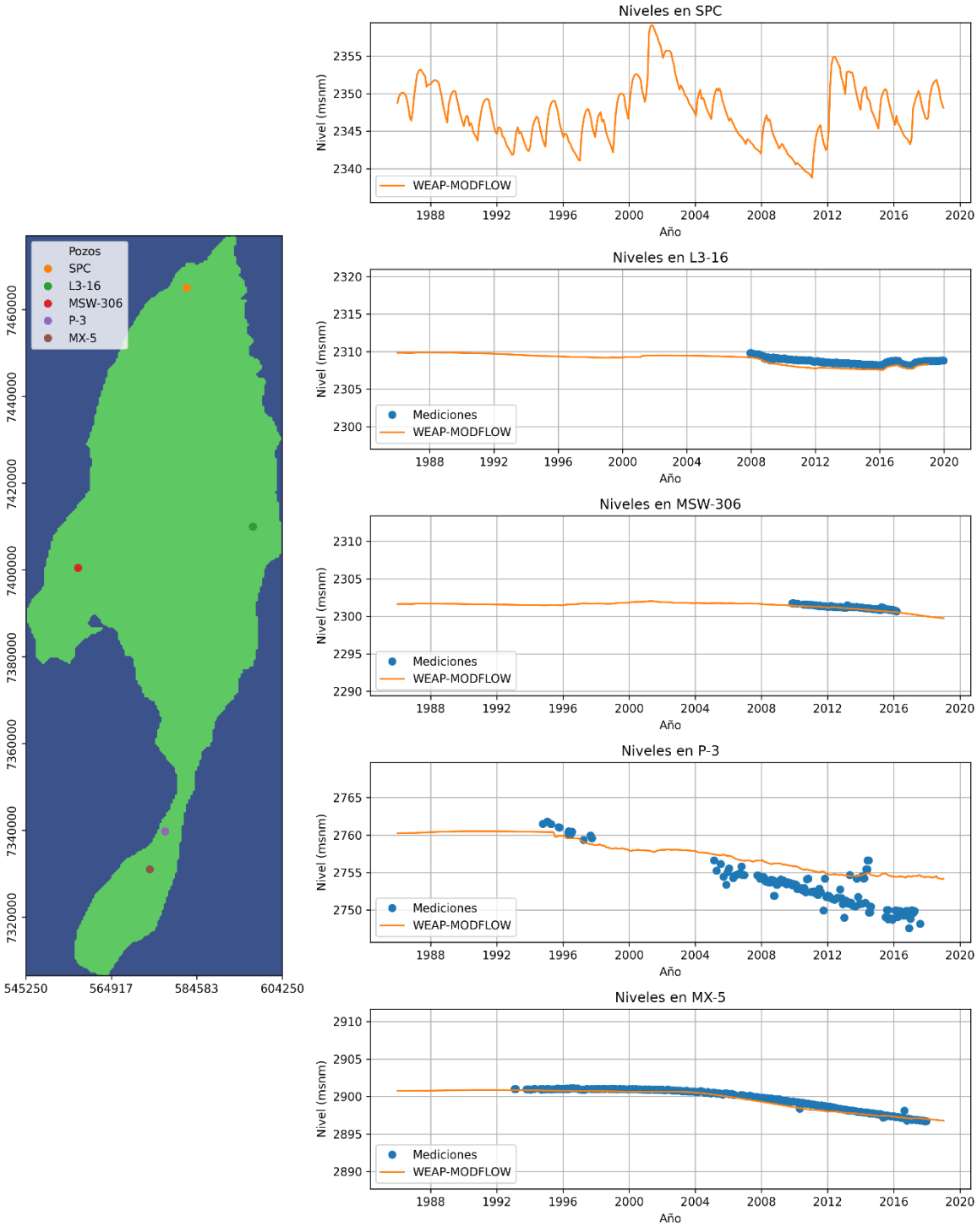


Figura III-65: Comparación entre niveles medidos y calculados por el modelo Salar-Monturaqui desarrollado en este proyecto.

Nota: Se muestran resultados para punto de bombeo en San Pedro Cuchabrachi, pozo L3-16 (ubicado en la zona Marginal), pozo MSW-306 (ubicado en la zona del núcleo), pozo P-3 (ubicado en sector de Negrillar-Callejón) y pozo MX-5 (ubicado en el sector Monturaqui).

Fuente: Elaboración propia.

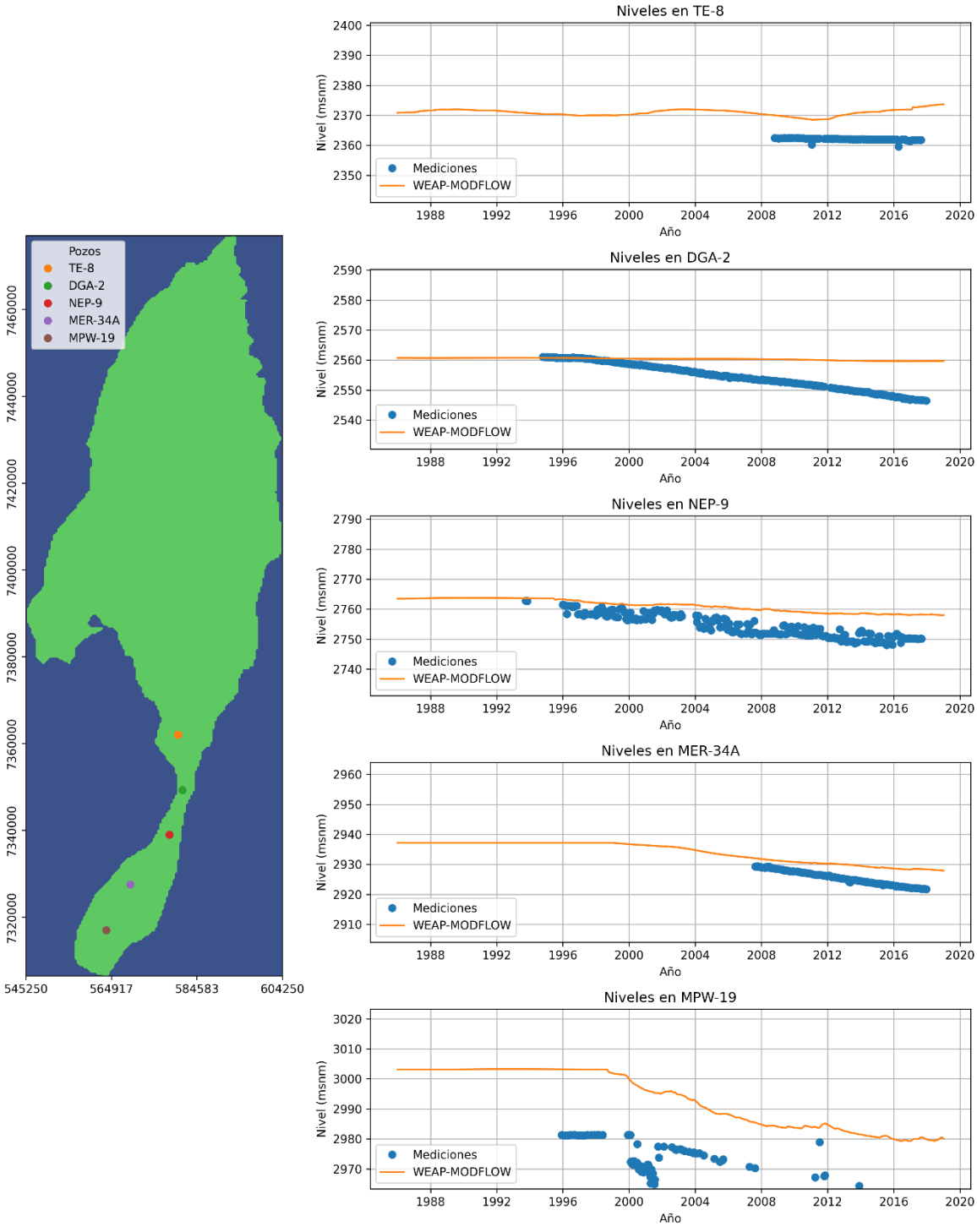


Figura III-66: Comparación entre niveles medidos y calculados por el Salar-Monturaqui integrado desarrollado en este proyecto.

Nota: Se muestran resultados para los pozos TE-8, DGA-2, NEP-9, MER-34ª y MPW-19, ubicados en la zona sur del modelo numérico.

Fuente: Elaboración propia.

La comparación de niveles medidos y simulados muestra que el modelo integrado tiene la capacidad de representar la tendencia de los niveles en el acuífero. En la Figura III-67 se presentan mapas piezométricos, para la capa 3, calculados para los tiempos 01-01-1990, 01-01-2010 y 31-12-2019, representando períodos previos, posterior y a largo plazo desde el comienzo de las extracciones.

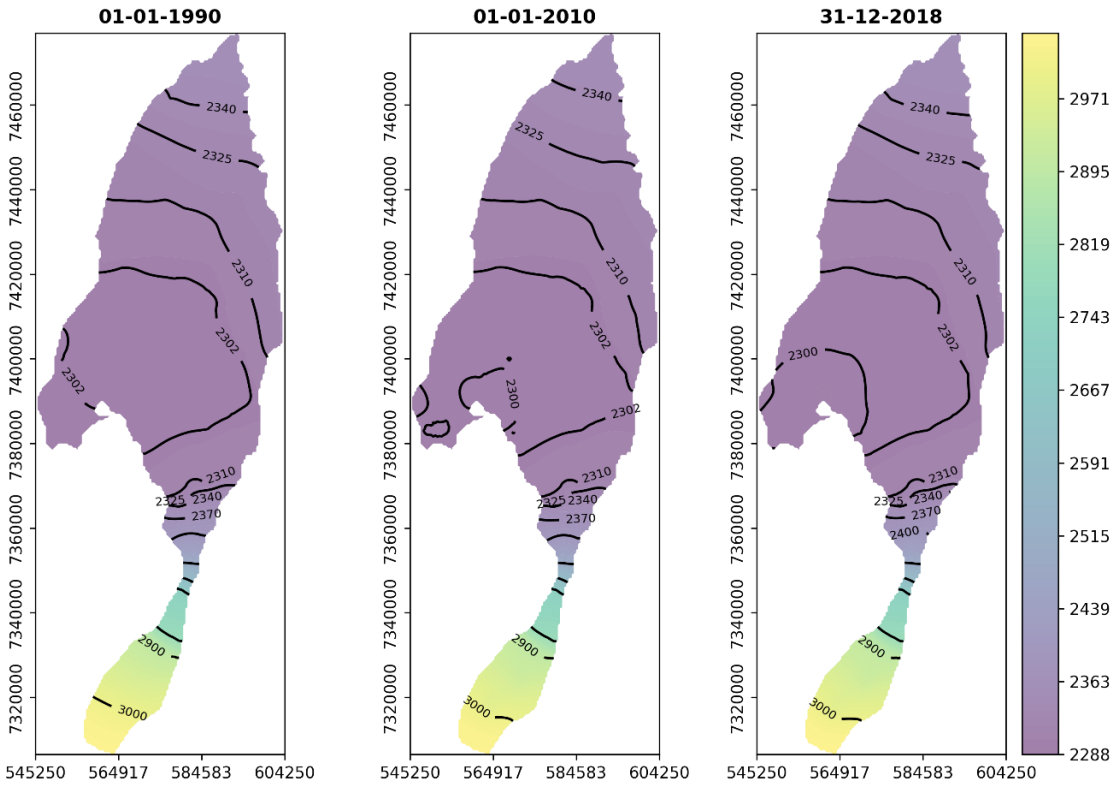


Figura III-67: Mapas piezométricos, para la capa 3, calculados para los tiempos 01-01-1990, 01-01-2010 y 31-12-2019 con el modelo Salar-Monturaqui desarrollado en este proyecto.
Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en los resultados del modelo base, en el período previo a las extracciones los niveles muestran un gradiente hacia la zona del núcleo. Sin embargo, posterior al período de extracciones los gradientes se dirigen hacia la zona de extracciones producto del descenso de los niveles.

III.5.4 Conclusiones, limitaciones y recomendaciones

A continuación, se enumeran breves conclusiones respecto al modelo integrado:

- La construcción del modelo integrado del Salar de Atacama llevada a cabo permite contar con una herramienta que integra dominios hidrológicos e hidrogeológicos dependientes entre sí. Lo que se puede considerar como una herramienta robusta para entender la respuesta de la cuenca ante forzantes climáticas y antrópicas. El modelo lateral se construyó con una caracterización detallada de las cuencas aportantes, lo que permite contar con recargas dependientes de forzantes climáticas que permiten obtener un balance hídrico

superficial, tanto en forma global, como detallada.

- El modelo de hidrología superficial y subterránea (WEAP-MODFLOW) fue construido con herramientas que logran explicar los distintos datos medidos en la cuenca, pero no dejan de ser una simplificación de un modelo conceptual. Entre las simplificaciones más importantes se encuentran: 1) la limitada resolución espacial para la caracterización de coberturas y uso de suelos, 2) la limitada representación de ecosistemas sensibles, 3) la resolución espacial de la grilla del modelo tridimensional de flujo y 4) la definición de niveles equivalentes de salmuera (densidad constante) para la modelación de flujo subterráneo, cuando en realidad el sistema posee densidad variable. Estas simplificaciones deben tenerse en cuenta el utilizar la herramienta y esta debe ser considerada para simular procesos a una escala regional, en términos de tendencias generales para los caudales y niveles piezométricos simulados. De este modo, los niveles resultantes corresponden a aproximaciones por lo que no deben ser utilizados para responder preguntas a escala local ni con precisión centimétrica, en específico esta herramienta no aborda el detalle de la implementación operacional de umbrales de activación (a nivel centimétrico) de Planes de Contingencia (PC) o de Planes de Alerta Temprana (PAT).

- Esta herramienta, como cualquier otra es perfectible en la medida que se lleven a cabo campañas de monitoreo y levantamiento de información en forma continua y no interrumpida, en especial con variables de evaporación y caudales superficiales en cuencas de la zona este-sur. Asimismo se podrá calibrar en terreno estimaciones de valores tales como la cobertura vegetacional, entre otros. Respecto de las mediciones de evaporación, se sugiere que en las campañas de terreno se utilicen instrumentos de última tecnología, tales como Eddy Covariance[66], que han demostrado levantar y medir información clave para el comportamiento de cuencas endorreicas, en las que su principal salida es hacia la atmosfera a través de la evaporación.

- En la actual implementación del modelo, los caudales extraídos en la zona norte no fueron impuestos a partir de observaciones históricas, sino más bien a partir de un derecho otorgado. Esto se hizo debido a que en el pasado no existen registros públicos históricos para imponer como consumos netos en la herramienta elaborada. En futuras actualizaciones del modelo se podrá considerar la información que se ha reportado en el marco de control de extracciones efectivas, además de complementarlas con el seguimiento actual de PAT y PSA (ej. para CAPRA).

- Las series de niveles en todos los pozos modelados llevan a cabo una representación de tendencias de niveles freáticos acorde a las observaciones que proporcionó, actualizó y sintetizó el estudio de CORFO-Amphos21 (2021). Adicionalmente, los

[66]https://www.licor.com/env/products/eddy_covariance/?gclid=CjwKCAjw9r-DBhBxEiwA9qYUpcxNdOHLMn-CBC6_3-hj7oqJuwck7_250090ziEgvFmEH4MstfQsGBoCkr8QAvD_BwE

balances están dentro de los valores resultantes del modelo conceptual desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021). Esto muestra una fortaleza de la herramienta desarrollada.

- Los nuevos flujos del modelo numérico hidrogeológico del Salar de Atacama (modelo Salar-Monturaqui) tienen un comportamiento asociado a la hidro climatología, sin incurrir en simplificaciones fuertes de imposición de caudales de recarga. Esta actualización de la conceptualización de las condiciones de borde del modelo permite representar con mayor detalle la variabilidad climática.

- En trabajos futuros debería llevarse a cabo un análisis de incerteza y un ajuste PEST[67] para tener mayor robustez de la estimación de los parámetros del modelo hidrogeológico y superficial. Se debería trabajar con un rango de valores asociados a un intervalo de confianza, más que a valores fijos como los que se han presentado en el actual estudio. Este trabajo debe considerar que actualmente la herramienta integrada toma una gran cantidad de tiempo en correr, y por lo mismo, una gran cantidad de tiempo en el postproceso. Según varios autores (EPA, 2020; Middlemis et al., 2002; SEA, 2012; Shoemaker et al., 2005), el tiempo requerido para la implementación de un modelo complejo es mayor a 6 meses, plazo que sólo se debe dedicar a la implementación, sin considerar la elaboración de proyecciones climáticas futuras y otras actividades. Por lo que se debe tener en cuenta que, en caso de requerir este tipo de análisis se debe invertir el tiempo apropiado, especialmente para cuencas de alta complejidad como lo es la cuenca endorreica del Salar de Atacama.

- Se puede concluir que una de las zonas con mayor falta de información hidrogeológica corresponde a la zona norte. En ese sector se podría mejorar el conocimiento a partir de valores que actualmente los usuarios titulares de derecho de aguas subterráneas están reportando a la DGA en el marco del control de extracciones efectivas. La información nueva que estaría aportando este control corresponde a caudales de extracción y a niveles freáticos en la zona, con el tiempo esta información será muy valiosa para poder llevar a cabo actividades de validación o recalibración de recargas.

[67] Model-Independent Parameter Estimation (https://pesthomepage.org/)

III.6 Modelación de flujo con densidad variable

III.6.1 Introducción

En sistemas en los cuales coexisten fluidos de distinta densidad, como lo es el acuífero de la cuenca del Salar de Atacama, el agua subterránea se mueve tanto por gradientes de nivel como por gradientes de densidad (el agua más densa se hunde por flotación). Por lo tanto, en estos sistemas el flujo está fuertemente influenciado por la diferencia de densidad entre los fluidos y al mismo tiempo la distribución de estos fluidos se ve influenciada por los flujos. Para modelar flujo con densidad variable se requieren códigos que resuelvan de forma iterativa y acoplada las ecuaciones de flujo y transporte de solutos (ecuación de advección y dispersión), como lo es el modelo SEAWAT. Sin embargo, los modelos que resuelven este tipo de problemas requieren un tamaño de malla muy fina y son muy costosos computacionalmente. Por esto es por lo que las simulaciones de flujo con densidad variable a escala de cuenca resultan complejas y se suelen aplicar varias simplificaciones. Adicional al modelo SEAWAT, el paquete SWI2 de MODFLOW es una alternativa que permite simular problemas de flujo con densidad variable a gran escala mediante simplificaciones en la representación del desplazamiento de la interfaz entre fluidos de distinta densidad sin resolver de forma explícita las ecuaciones de transporte de solutos.

En el presente capítulo se presenta 1) la metodología y resultados de la modelación de flujo con densidad variable mediante perfiles SEAWAT bidimensionales, construidos por CORFO-Amphos21 (2021), cuyas condiciones de borde se actualizaron a partir de los resultados del modelo integrado, presentado en el Capítulo III.5, y 2) la metodología y resultados de una primera experiencia de modelación tridimensional de flujo con densidad variable a escala de la cuenca del Salar de Atacama mediante el paquete SWI2 (Seawater Intrusion package) de MODFLOW. Esta experiencia considera activar el paquete SWI2 en el modelo numérico hidrogeológico de base desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021). El objetivo de estas 2 actividades es identificar la mejor estrategia para incorporar la modelación de densidad variable al modelo de flujo integrado desarrollado en el Capítulo III.5.

III.6.1.1 Descripción de la modelación de flujo con densidad variable del modelo base

Para la modelación de flujo con densidad variable en el Salar de Atacama, CORFO-Amphos21 (2021) construyó 3 perfiles bi-dimensionales (Figura III-68) con el modelo SEAWAT, que resuelve la ecuación de flujo de agua subterránea y transporte de solutos de manera acoplada. Estos perfiles se ubican en el sistema lagunar Quelana, Peine y La Punta La Brava y fueron orientados lo más cercano a la dirección del flujo para minimizar errores asociados a flujos tridimensionales. Estos perfiles permiten el entendimiento del desplazamiento de la interfaz salina a nivel local bajo distintas alternativas de extracciones o clima, sin embargo, no permite una descripción a escala de la cuenca del Salar de Atacama.

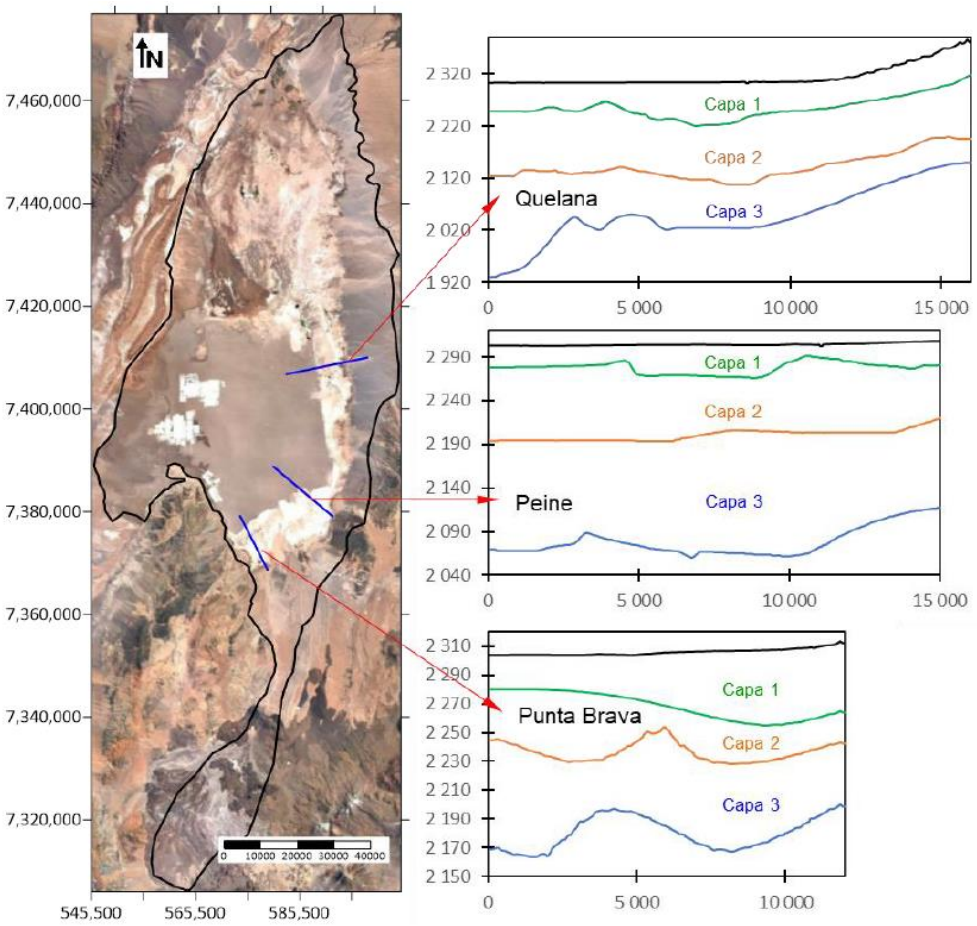


Figura III-68: Ubicación y geometría de los perfiles definidos para los modelos de flujo con densidad variable.
Nota: Se incluye las distintas unidades acuíferas definidas a partir del modelo conceptual.
Fuente: CORFO-Amphos21 (2021)

Para establecer las condiciones iniciales de los perfiles se considera un período cuasi-estacionario de 204 años a partir de una condición inicial representada por una interfaz abrupta entre la salmuera (definida con una concentración de 330 kg/m^3) y agua fresca (definida con una concentración de 6,5 kg/m^3) y una distribución de niveles uniforme de 2.301 m.s.n.m. (Figura III-69). La discretización espacial considera un ancho de celda de 50 m y un refinamiento a 25 m en la zona de la interfaz salina, donde se encuentran los mayores gradientes de concentración. En la vertical se consideró una discretización de entre 1 y 10 m para minimizar fenómenos de dispersión numérica.

Los perfiles consideran las siguientes condiciones de borde:

- **Caudal areal**: Recarga directa por precipitación. Debido a la distancia de los perfiles con el borde oeste, la recarga directa en la zona del núcleo considera únicamente los aportes por precipitación, sin considerar los aportes de las subcuencas que desembocan en el núcleo.

- **Condición de borde mixta mediante el paquete de evaporación de MODFLOW**: Evaporación desde la napa.

- **Condición de nivel prescrito**: Para los límites oeste y este de los perfiles. Los niveles prescritos se basan en pozos de referencia cercanos a los extremos de los perfiles. En el período cuasi estacionario se definen los niveles medidos en régimen natural en dichos pozos y en el período transitorio se le incorporan a este nivel los descensos simulados por el modelo de flujo tridimensional, posterior a la corrección de niveles.

- **Condición de borde mixta en el borde este**: Posibles flujos profundos. Se consideran los mismos niveles prescritos definidos en la condición de nivel prescrito.

- **Condición de borde de transporte**: Se definió una condición de borde no dispersiva en los contornos del modelo, por lo que la concentración en los bordes oeste y este dependen de la dirección del flujo. Si existe un flujo de entrada, la concentración del flujo es de 330 kg/m3 en el borde oeste y de 6,5 kg/m3 en el borde este. Si existe un flujo de salida, la concentración es determinada por el modelo en función de la concentración en el contorno.

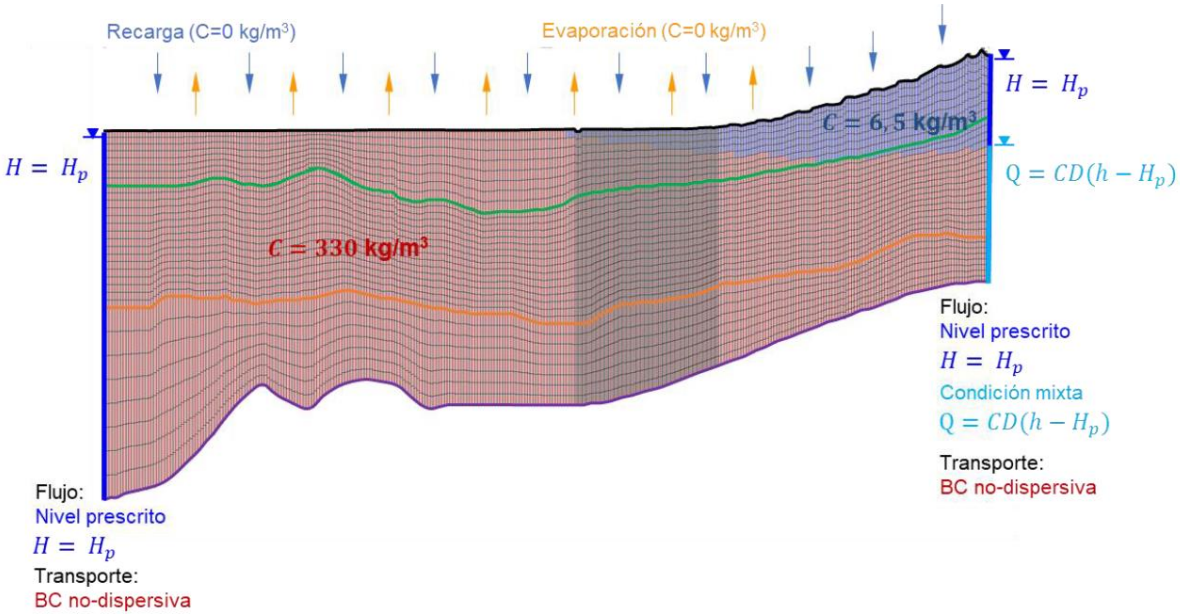


Figura III-69: Conceptualización de la discretización espacial, de las entradas y salidas, condiciones de contorno y condiciones iniciales para los 3 perfiles para la modelación de flujo con densidad variable.

Nota: Las líneas verde y naranja representan la división por capas del modelo tridimensional de flujo MODFLOW.

Fuente: CORFO-Amphos21 (2021)

III.6.1.2 Paquete Seawater Intrusion (SWI2) de MODFLOW

Los perfiles bi-dimensionales desarrollados por CORFO-Amphos21 (2021) permiten el entendimiento del desplazamiento de la interfaz salina a nivel local bajo distintos

alternativas de extracción o clima, sin embargo, no permite una descripción a escala de la cuenca del Salar de Atacama. Esta es la principal motivación para la modelación tri-dimensional de flujo con densidad variable, a escala de la cuenca del Salar de Atacama, mediante el paquete SWI2. El paquete SWI2 de MODFLOW es una alternativa que permite simular problemas de flujo con densidad variable a gran escala adoptando varias simplificaciones enfocadas en resolver la posición y movimiento de la interfaz entre 2 fluidos de distinta densidad a partir de la ecuación de flujo con un término que representa la flotación y diferencia de niveles producto de la diferencia de densidad entre los fluidos (Bakker et al, 2013):

- La integración vertical para el flujo con densidad variable está basada en la aproximación de Dupuit, la que asume que la resistencia al flujo en la dirección vertical dentro de una capa del modelo MODFLOW. De este modo, para calcular la posición de la interfaz salina no es necesario resolver la ecuación de transporte de advección y dispersión, y simplemente se resuelve la ecuación de flujo con un término fuente.
- La ecuación de balance de masas queda reemplazada por una ecuación de balance de volumen para evaluar el campo de flujo (aproximación de Boussinesq-Oberbeck), y las diferencias de densidad se tienen en cuenta sólo en la ecuación de Darcy.
- Los fenómenos de dispersión y difusión se consideran despreciables. Por tanto, resulta evidente que, aunque el enfoque adoptado por el paquete SWI2 es una buena aproximación y un primer paso para modelar sistemas a gran escala, no resulta exacto cuando los fenómenos de difusión y dispersión son importantes, es decir, cuando el ancho de la zona de mezcla es importante.
- La inversión de densidad, es decir, cuando el agua más densa está por encima de agua menos densa, se calcula entre acuíferos, pero no se calcula dentro de un mismo acuífero.

Este enfoque no está pensado en sistemas complejos como lo son salares, sino que más bien para intrusión salina en zonas costeras, sin embargo, hay similitudes en el comportamiento de estos sistemas donde los flujos de distinta densidad están separados por una interfaz o zona de mezcla entre ambas densidades. Esta similitud motivó a la utilización de esta herramienta para una primera descripción de la distribución de la salmuera en la cuenca del Salar de Atacama.

III.6.2 Metodología

A continuación, se presentan la metodología para la modelación de flujo con densidad variable con los perfiles SEAWAT construidos por CORFO-Amphos21 (2021), la que considera la actualización de las condiciones de borde a partir de los resultados del modelo integrado, y la experiencia de modelación tridimensional a escala de cuenca con MODFLOW-SWI2 en base al modelo hidrogeológico de base desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021).

III.6.2.1 Modelación mediante perfiles bidimensionales con SEAWAT

Para la modelación de flujo con densidad variable mediante los perfiles SEAWAT se considera la misma estrategia y parámetros definidos inicialmente por CORFO-Amphos21 (2021), a excepción de las condiciones de borde de recarga y nivel prescrito que se actualizan a partir del modelo integrado, desarrollado en el capítulo III.4. A continuación, se presentan brevemente los aspectos que no se modificaron con respecto a las definiciones de CORFO-Amphos21 (2021):

- **Localización y discretización espacial de los perfiles:** Se mantiene la extensión y ubicación de los perfiles. La discretización horizontal considera celdas de 50 m y refinando a 25 m en la zona de la interfaz y la discretización vertical considera entre 32 y 34 capas.

- **Régimen de simulación:** Se mantiene la estrategia de un primer régimen cuasi-estacionario de 204 años de duración para definir la distribución inicial de concentraciones. Luego, se considera un régimen transitorio entre 1986 a 2018 con una discretización temporal mensual para flujo y un paso de tiempo máximo de transporte de 1 día.

- **Estrategia de condiciones iniciales:**
    - Para el régimen cuasi-estacionario se considera una interfaz abrupta entre el agua dulce y salmuera. Además, se consideró una distribución uniforme del nivel igual a 2.301 msnm.
    - Para el régimen transitorio se tomaron los niveles y concentraciones resultantes del régimen cuasi estacionario como condición inicial.

- **Tipos de condición de contorno de flujo y transporte:**
    - Flujo nulo en contornos no activos (basamento rocoso en la parte inferior del modelo).
    - Condición de caudal areal para entradas por recarga directa por precipitación.
    - Salida superficial por evaporación.
    - Condición de nivel prescrito para los límites oeste y este de los perfiles. En régimen cuasi-estacionario se consideran niveles medidos en régimen natural. En régimen transitorio se consideran estos mismos niveles más la variación temporal de los niveles simulados en los puntos de medición a partir del modelo tridimensional de flujo.
    - Condición nivel-dependiente en el límite este de los perfiles para representar un posible flujo profundo de salida o entrada.
    - Condición de transporte no dispersiva en los límites oeste y este de los perfiles.

- **Parámetros hidráulicos y de transporte**: Se mantiene la misma zonificación y valores para la conductividad hidráulica, coeficientes de almacenamiento, porosidad, coeficiente de difusión molecular y dispersividad.

Mantener esta estrategia implica la actualización de los siguientes valores en las condiciones de contorno de flujo a partir de los resultados del modelo integrado de flujo:

- Actualización de la recarga areal para entradas por recarga directa.
- Actualización de la variación temporal de los niveles prescritos en los extremos oeste y este de los perfiles.

A continuación, se presentan los valores actualizados para la recarga areal y nivel prescrito de los perfiles SEAWAT. La comparación de los parámetros de entrada y resultados la modelación de densidad variable mediante los perfiles SEAWAT a partir de los resultados del modelo Salar-Monturaqui, con respecto a los resultados obtenidos por CORFO-Amphos21 (2021), se muestra en el Anexo 4 de la Etapa III.

III.6.2.1.1 Recarga directa

La recarga directa corresponde a los excesos superficiales provenientes del modelo lateral y la infiltración resultante de los nodos catchment del modelo Salar-Monturaqui, excepto en la zona del núcleo donde, debido a la distancia respecto al borde oeste del modelo numérico, se considera únicamente la infiltración resultante de los nodos catchment de WEAP. Para el régimen cuasi-estacionario se consideró el valor de recarga promedio entre 1986 y 1994, considerado como el período previo al inicio de extracciones. En la Tabla III-32 se muestran los valores actualizados de recarga directa para el régimen cuasi-estacionario y en la Figura III-70 se muestran las series temporales para el régimen transitorio para cada zona de los 3 perfiles, notar que el modelo Salar-Monturaqui tiene nodo catchments distintos para los distintos sistemas lagunares, resultando en valores diferentes de recarga por infiltración en la zona marginal.

Tabla III-32: Actualización de los valores de recarga directa para los perfiles SEAWAT en régimen cuasi-estacionario a partir de los resultados del modelo integrado.

Perfil	Recarga directa (m/d)		
	Núcleo	Zona marginal	Borde este
Quelana	$7{,}06 \times 10^{-7}$	$4{,}48 \times 10^{-7}$	$3{,}54 \times 10^{-6}$
Peine	$7{,}06 \times 10^{-7}$	$3{,}78 \times 10^{-7}$	No aplica
La Punta La Brava	$7{,}06 \times 10^{-7}$	$3{,}45 \times 10^{-7}$	No aplica

Fuente: Elaboración propia.

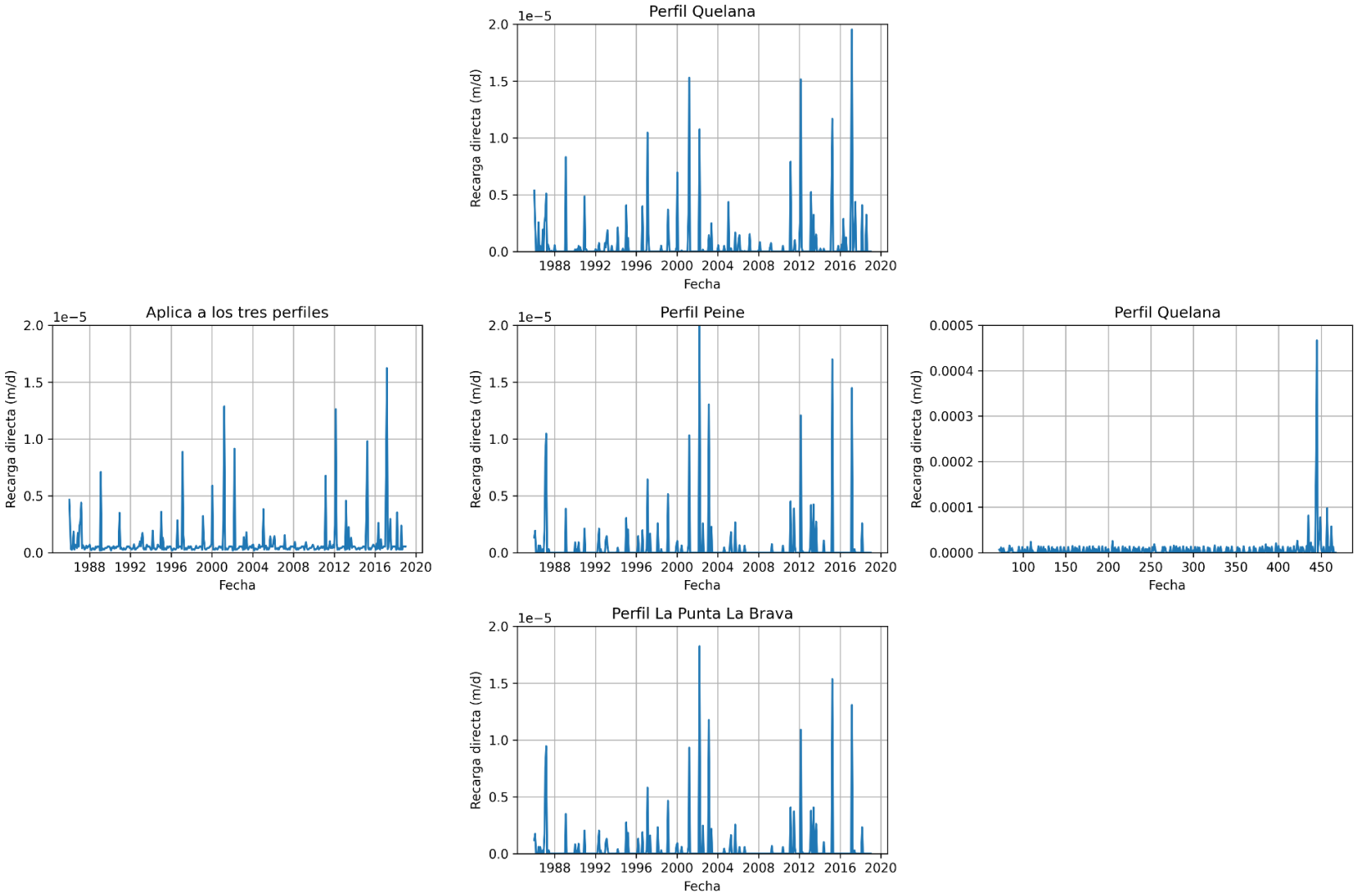


Figura III-70: Series temporales de recarga directa para los perfiles SEAWAT.
Nota: En la columna de la izquierda se muestra la recarga de las zonas del borde oeste de los tres perfiles, en la columna del centro se muestra la recarga directa para los perfiles Quelana, Peine y La Punta La Brava, ordenados de arriba hacia abajo, respectivamente, y en la columna de la izquierda se muestra la recarga correspondiente al borde este del perfil Quelana.
Fuente: Elaboración propia.

III.6.2.1.2 Niveles prescritos

Los niveles prescritos necesarios de definir corresponden a los niveles en los extremos oeste y este de cada uno de los perfiles. A partir de CORFO-Amphos21 (2021), se definieron los siguientes pozos:

- Perfil Quelana: Pozo MSW-270 en extremo oeste y pozo L3-2 en extremo este.
- Perfil Peine: Pozo PN-02 en extremo oeste y pozo PP-01 en extremo este.
- Perfil La Punta La Brava: Pozo PN-10 en extremo oeste y pozo PC-1200 en extremo este.

Es importante notar que los niveles prescritos corresponden a niveles piezométricos, por lo que, en el extremo oeste de los perfiles, al estar ubicado dentro del núcleo, se consideran niveles equivalentes de salmuera y en el extremo oeste, al estar o en la zona marginal o en el borde este, se consideran niveles equivalentes de agua fresca. En régimen cuasi-estacionario, se consideran los niveles medidos y documentados por CORFO-Amphos21 (2021) en un período considerado natural o previo al inicio de extracciones, por lo que estos niveles no se actualizan. En el régimen transitorio, a los niveles medidos en régimen natural se les incorpora la variabilidad temporal calculada a partir del modelo de flujo tridimensional. En la Figura III-71, Figura III-72 y Figura III-73 se muestran los niveles prescritos resultantes a partir del modelo integrado, para los perfiles Quelana, Peine y La Punta La Brava, respectivamente.

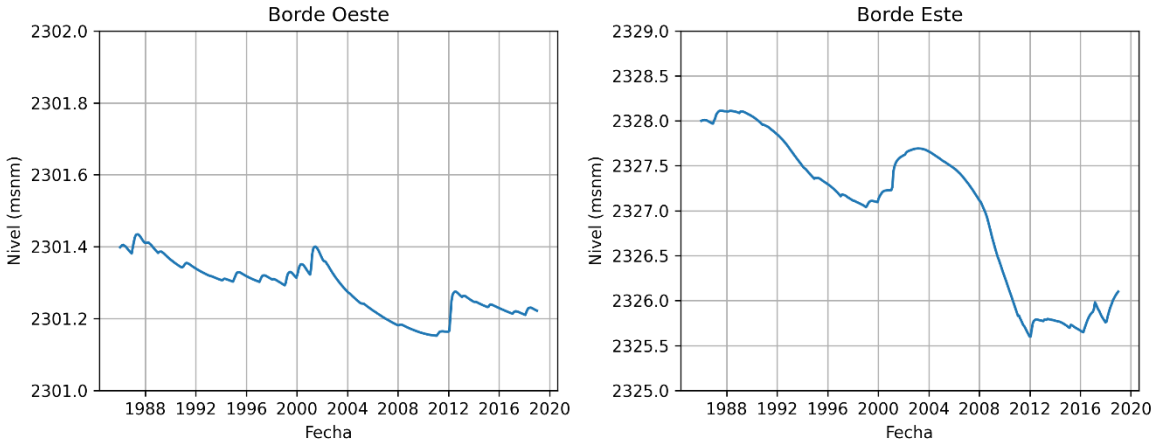


Figura III-71: Actualización de las series temporales de nivel prescrito para el perfil Quelana.
Nota: La figura de la izquierda muestra la evolución temporal de los niveles prescritos en el extremo oeste y la figura de la derecha en el extremo este.
Fuente: Elaboración propia.

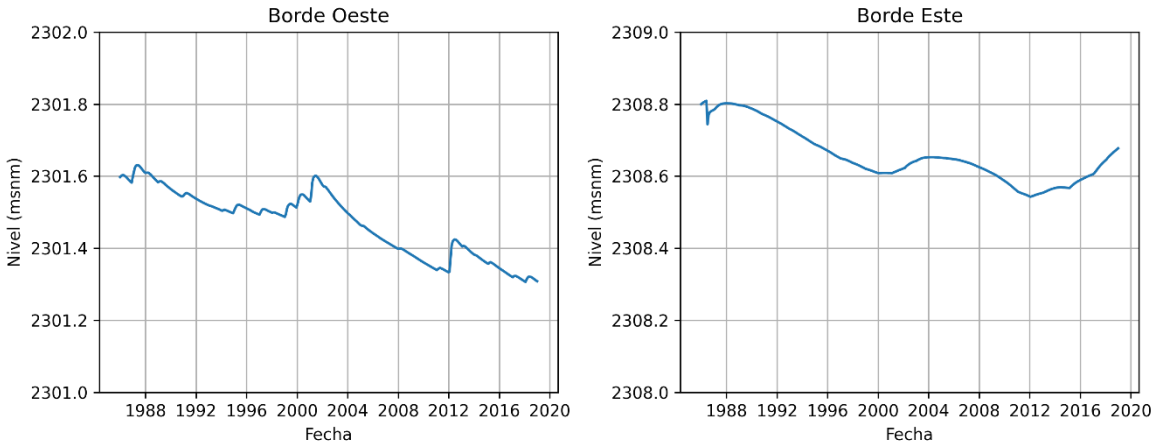


Figura III-72: Actualización de las series temporales de nivel prescrito para el perfil Peine.
Nota: La figura de la izquierda muestra la evolución temporal de los niveles prescritos en el extremo oeste y la figura de la derecha en el extremo este.
Fuente: Elaboración propia.

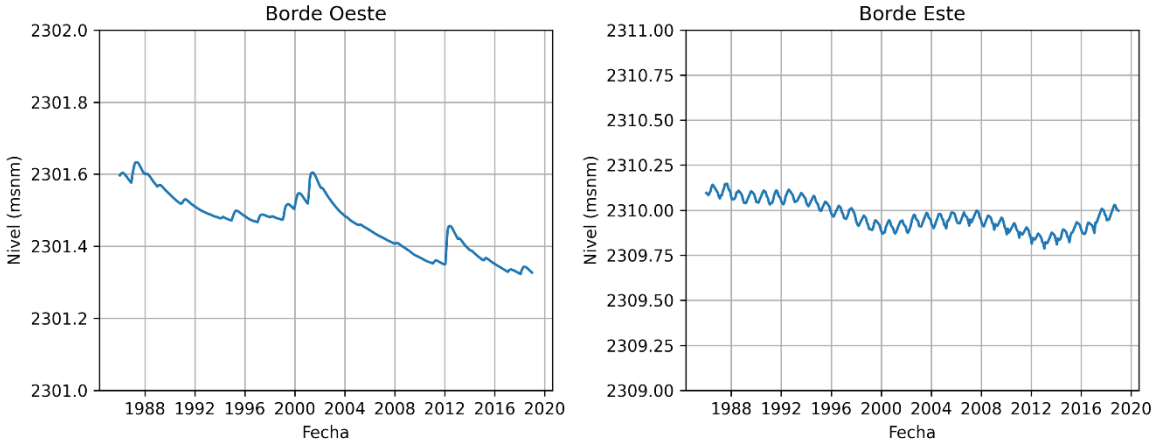


Figura III-73: Actualización de las series temporales de nivel prescrito para el perfil La Punta La Brava.
Nota: La figura de la izquierda muestra la evolución temporal de los niveles prescritos en el extremo oeste y la figura de la derecha en el extremo este.
Fuente: Elaboración propia.

III.6.2.2 Modelación a escala de cuenca con MODFLOW-SWI2

Para la exploración de modelación acoplada de flujo con densidad variable mediante el paquete SWI2 de MODFLOW se consideró el modelo de base, desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021), en régimen estacionario. A continuación, se detallan los aspectos principales de la caracterización y parámetros de SWI2 considerados en las simulaciones. Las simulaciones se realizaron tanto con la versión MODFLOW 2005 como con la versión MODFLOW NWT, sin embargo, la sensibilización se realizó solamente con MODFLOW 2005.

III.6.2.2.1 Régimen de simulación y discretización temporal

Para encontrar la primera distribución espacial de la interfaz salina en la cuenca del Salar de Atacama, se consideró un régimen de simulación cuasi-estacionario. El período considera una extensión de aproximadamente 205 años (750.000 días), discretizados en 25.000 pasos de tiempo de 3 días. La elección de la extensión del período de simulación se basó en la estrategia de CORFO-Amphos21 (2021) y la discretización temporal se basó en el caso con mejor cierre de balances para los fluidos de distinta densidad.

III.6.2.2.2 Descripción de parámetros de SWI2

El paquete SWI2 de MODFLOW considera la existencia de superficies que separan zonas de distinta densidad a lo largo de todo el dominio de simulación. Al considerar una única superficie, esta representa una interfaz abrupta entre una zona de agua fresca sobre una zona de salmuera, sin incorporar una zona de mezcla. Al considerar dos superficies, que representen un 25% y 75% de concentración de salmuera, se explicita la existencia de una zona de mezcla entre las zonas de agua fresca y salmuera. En este estudio se simularon ambas posibilidades (interfaz abrupta y existencia de zona de mezcla), considerando densidades de 1.000, 1.100 y 1.230 kg/m^3 para agua fresca, zona de mezcla y salmuera, respectivamente (CORFO-Amphos21, 2021). De esta forma, las densidades adimensionales para el paquete SWI2 corresponden a 0,0, 0,1 y 0,23 para las zonas de agua fresca, mezcla y salmuera, respectivamente. La densidad adimensional se calcula como:

$$\nu_i = \frac{\rho_i - \rho_f}{\rho_f}$$

donde ν_i y ρ_i son la densidad adimensional y densidad de las zonas i y ρ_f es la densidad de agua fresca. Adicionalmente, para efectos de cálculo, SWI2 permite considerar que la densidad de la zona de mezcla sea constante o que varíe linealmente entre zonas. En este estudio se consideró únicamente la opción de densidad constante.

Para representar el desplazamiento horizontal de los extremos de las superficies es necesario definir dos sets de parámetros en SWI2: 1) tip y toe y 2) alfa y beta. Los parámetros tip y toe corresponden a la inclinación de la superficie que, al ser sobrepasada, permite el desplazamiento horizontal o avance desde una celda donde existe la superficie hacia otra donde no existe (de forma similar, estos parámetros restringen el retroceso de las superficies). Debido a que en la zona norte no hay un detalle de la geometría de la cuña salina como lo hay en la zona este, un valor apropiado de los parámetros tip y toe sería un valor bajo que no restringa el desplazamiento. En este estudio se definió un valor de 0,01 para ambos parámetros, sin embargo, también se sensibilizaron valores de 0,10 y 1,00 para entender las implicancias de estos parámetros en la representación de la espacialización de la salinidad en la cuenca del Salar de Atacama. Los parámetros alfa y beta corresponden a una restricción de la magnitud del desplazamiento de la cuña salina para cada iteración. Estos parámetros pueden tomar valores entre 0,00 y 1,00, sin embargo, el valor definido por defecto y recomendado es de 0,10. En este estudio se utilizó el valor recomendado para ambos parámetros y adicionalmente se sensibilizaron con valores de

0,01 y 0,50.

III.6.2.2.3 Condiciones de contorno e iniciales

En el paquete SWI2 es necesario definir dos condiciones iniciales: 1) Distribución espacial de niveles y 2) distribución espacial de cada una de las superficies. Para los niveles iniciales se consideró una distribución uniforme de 2.300 m.s.n.m. Para las superficies se consideró como referencia la distribución espacial de las isosuperficies de conductividad eléctrica de 100 y 200 mS cm^{-1} a partir de Marazuela et al. (2018), las que permiten representar la ubicación de una concentración de 25 y 75% de salmuera (CORFO-Amphos21, 2021). La distribución de estas isosuperficies se muestran en la Figura III-74. En el caso con una única superficie que separa zonas de distinta densidad se consideró el valor promedio de la altura de las isosuperficies de conductividad eléctrica y para el caso de 2 superficies, se consideró que la superficie que divide la zona de agua fresca con la zona de mezcla corresponde a la isosuperficie de 100 mS cm^{-1} y para la superficie que divide la zona de mezcla con la zona de salmuera, la isosuperficie de 200 mS cm^{-1}.

Las condiciones de borde de flujo se mantienen iguales a las del modelo de base, sin embargo, SWI2 permite especificar, para cada capa y celda, la densidad de los flujos de entrada y salida, mediante el parámetro ISOURCE. Para todas las celdas activas se definió que la densidad de los flujos de entrada y salida correspondan a la densidad de la zona que esté en la parte superior de dicha celda, excepto en algunos sectores de la zona del núcleo. En la zona del núcleo se consideró que hay sectores donde la existencia de una costra salina en la superficie resulta en que la recarga directa en la capa 1 tenga una concentración igual a la de salmuera, y que el agua que evapora es agua fresca. Esto es posible al definir un valor de ISOURCE igual a -2, implicando que las salidas corresponden a fluidos de densidad igual a la zona que existe en la superficie de la celda y que las entradas corresponden a fluidos de densidad igual a la zona que existe en el fondo de la celda. Estas zonas se consideraron donde el promedio de la altura de las isosuperficies de conductividad eléctrica de 100 y 200 mS cm^{-1}, de la espacialización de Marazuela et al. (2018), sea mayor a la cota del terreno. En la Figura III-75 se muestra la distribución espacial de las zonas con esta condición de borde.

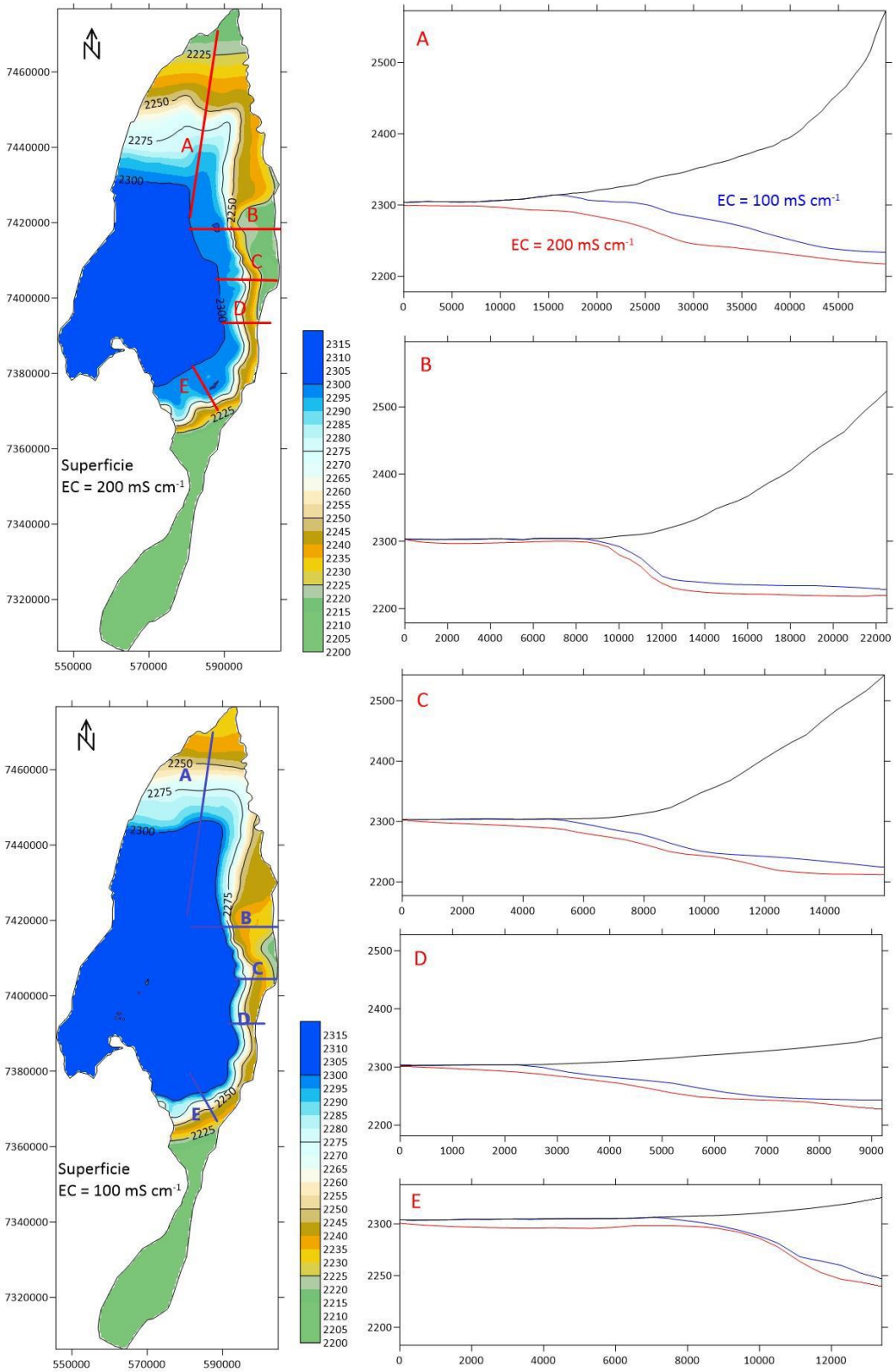


Figura III-74: Distribución de la altura sobre el nivel del mar de las isosuperficies de conductividad eléctrica de 100 y 200 mS cm^{-1}.

Fuente: Informe CORFO-Amphos21 (2021), modificado de Marazuela et al. (2018).

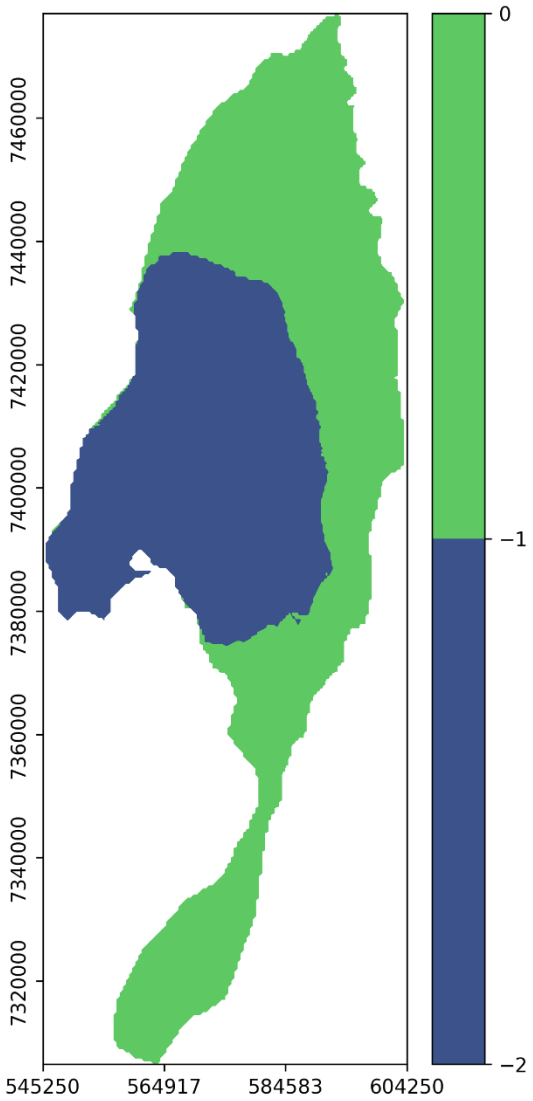


Figura III-75: Valor del parámetro ISOURCE en la capa 1 (En las otras capas es igual a 0).
Fuente: Elaboración propia a partir de Marazuela et al. (2018).

En el modelo base, para representar la interfaz en la cual el agua dulce flota por encima de la salmuera, las lagunas y la evaporación en la zona marginal, se consideró la implementación del paquete de drenes (DRN). Sin embargo, al activar el paquete SWI2, la interfaz se representa de forma explícita, por lo que esta condición de borde no se consideró para las simulaciones de densidad variable con SWI2.

III.6.2.2.4 Parámetros hidráulicos y de transporte

Los parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento) son los mismos que los definidos en el modelo de flujo desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021), sin embargo, para incorporar el paquete SWI2 en MODFLOW es necesario definir valores de porosidad (dado que SWI no resuelve el problema de transporte en su totalidad,

no es necesario definir valores de difusión ni dispersividad, como lo es en el caso del modelo SEAWAT). En base al informe CORFO-Amphos21 (2021), se definió un valor de 0,08 en la capa 1 y de 0,03 en el resto de las capas, siendo consistente con el modelo conceptual de CORFO-Amphos21 (2021). Estos valores fueron sensibilizados y se simularon casos aumentando y disminuyendo la porosidad en 25% para entender las implicancias en los resultados del modelo.

III.6.2.2.5 Sensibilización de parámetros

La sensibilización de los parámetros considera un esquema de "uno a la vez", donde se toma el caso base y se evalúa modificando un solo parámetro a la vez, sin incorporar combinaciones. Esta sensibilización se realizó tanto con la versión MODFLOW 2005 y MODFLOW NWT. Los parámetros del caso base se presentan en la Tabla III-33.

Tabla III-33: Parámetros del caso base de simulación de densidad variable con SWI2.

Parámetro	Valor
Número de superficies	1
Tip y toe	0,01
Alfa y beta	0,10
Porosidad	0,08 en capa 1
	0,03 en capas 2, 3 y 4

Fuente: Elaboración propia.

III.6.3 Resultados

A continuación, se presentan los resultados de la modelación de flujo con densidad variable con perfiles SEAWAT bidimensionales a partir de los resultados del modelo integrado y de la primera exploración de una modelación tridimensional a escala de cuenca con MODFLOW-SWI2.

III.6.3.1 Resultados de la modelación con SEAWAT

En esta sección se muestran los resultados obtenidos a partir de la actualización de los perfiles SEAWAT para la simulación de flujo con densidad variable a partir de los resultados del modelo integrado. La comparación con respecto a los resultados obtenidos por CORFO-Amphos21 (2021) se presentan en el Anexo 4 de la Etapa III. Esta comparación muestra que no hay una diferencia significativa en la distribución de niveles ni concentración de solutos al actualizar las condiciones de borde a partir de los resultados del modelo integrado. Adicionalmente, los perfiles mostraron una convergencia con un error consistente menor a 0.1%.

A continuación, se presenta la comparación de niveles y perfiles verticales de conductividad eléctrica medidas y obtenidos por los perfiles SEAWAT en régimen transitorio, posteriormente se muestran los resultados de distribución de concentración de solutos.

III.6.3.1.1 Comparación de niveles medidos y simulados

En la Figura III-76 se muestra la ubicación de los perfiles SEAWAT y de los puntos de observación de niveles. En la Figura III-77, Figura III-78 y Figura III-79 se muestra la comparación de la evolución temporal de los niveles observados y simulados en el período 1986 a 2018 a partir de los perfiles SEAWAT actualizados con los resultados del modelo integrado.

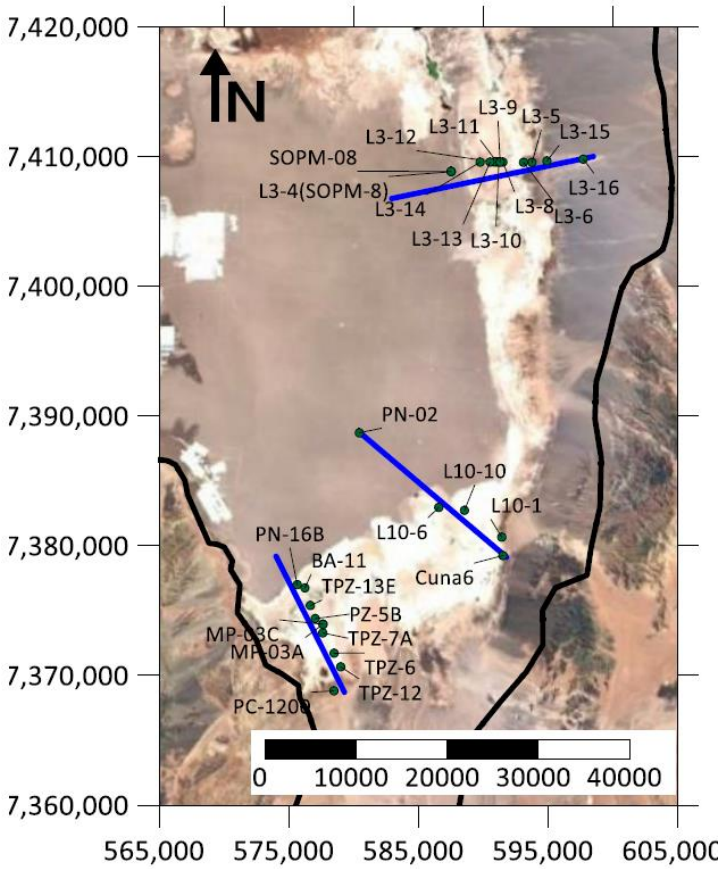


Figura III-76: Puntos de observación de niveles definidos para los perfiles SEAWAT.
Nota: De norte a sur los perfiles se ordenan de la siguiente manera: Quelana, Peine, La Punta La Brava.
Fuente: Adaptado de CORFO-Amphos21 (2021).

En sistemas con densidad variable, como salares, pueden existir grandes diferencias en los niveles al medirlos a distinta profundidad, producto de las densidades de los fluidos. En estos sistemas la densidad aumenta con la profundidad, debido a que el agua fresca flota sobre el agua más salina, y el nivel piezométrico medido desciende. Para una correcta comparación de niveles, y para evitar errores producto de la variación de niveles en profundidad, es necesario que el instrumento de medición tenga una ranura en una única ubicación y que esta ubicación sea conocida.

En el Sala de Atacama, una parte importante de los puntos de observación no tienen

información de la profundidad de la ranura y varios están completamente ranurados en la vertical (CORFO-Amphos21, 2021). En los casos que no hay claridad respecto a la rejilla o ranura es difícil determinar con qué celda de los perfiles SEAWAT realizar la comparación y en los casos en que los pozos están completamente ranurados en la vertical, se genera una estratificación de densidades dentro del propio pozo (Tellam et al, 1986). Estos pozos no entregan datos apropiados para poder caracterizar sistemas con densidad variable ni para realizar una comparación con valores modelados. Para minimizar este problema, se definieron puntos de observación relativamente someros, sin embargo, en estudios futuros es necesario contar con pozos más profundos correctamente caracterizados para poder validar niveles simulados en profundidad.

Siguiendo la estrategia de CORFO-Amhpos21 (2021), dado que los pozos de observación no se encuentran directamente en los perfile simulado, los pozos de observación se proyectan de forma perpendicular sobre el perfil y se corrigieron los niveles observados de acuerdo con la cota de terreno en el perfil para mostrar un gradiente coherente con un flujo paralelo al perfil.

En el perfil Peine se definieron menos puntos de observación, los que mostraban un gradiente coherente con un flujo paralelo al perfil. debido a que existe una componente tridimensional que imposibilita tomar más puntos.

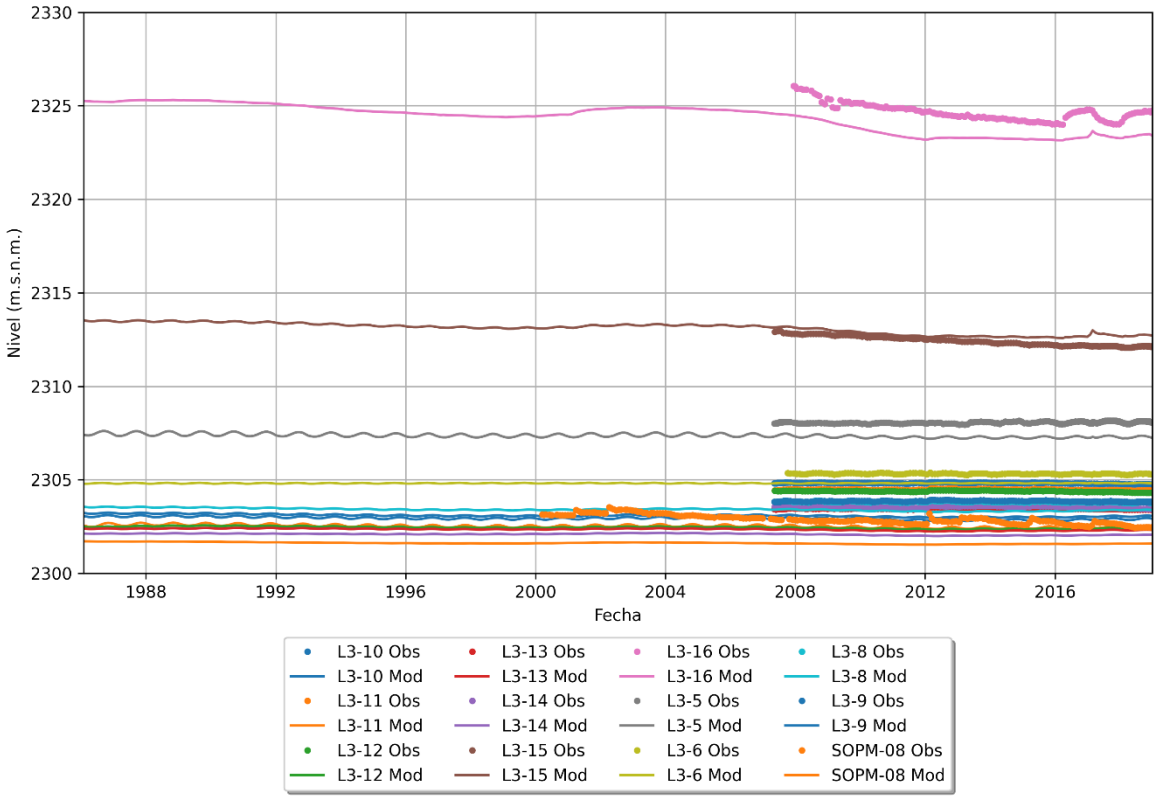


Figura III-77: Comparación de niveles observados y modelados a partir del perfil Quelana.
Fuente: Elaboración propia.

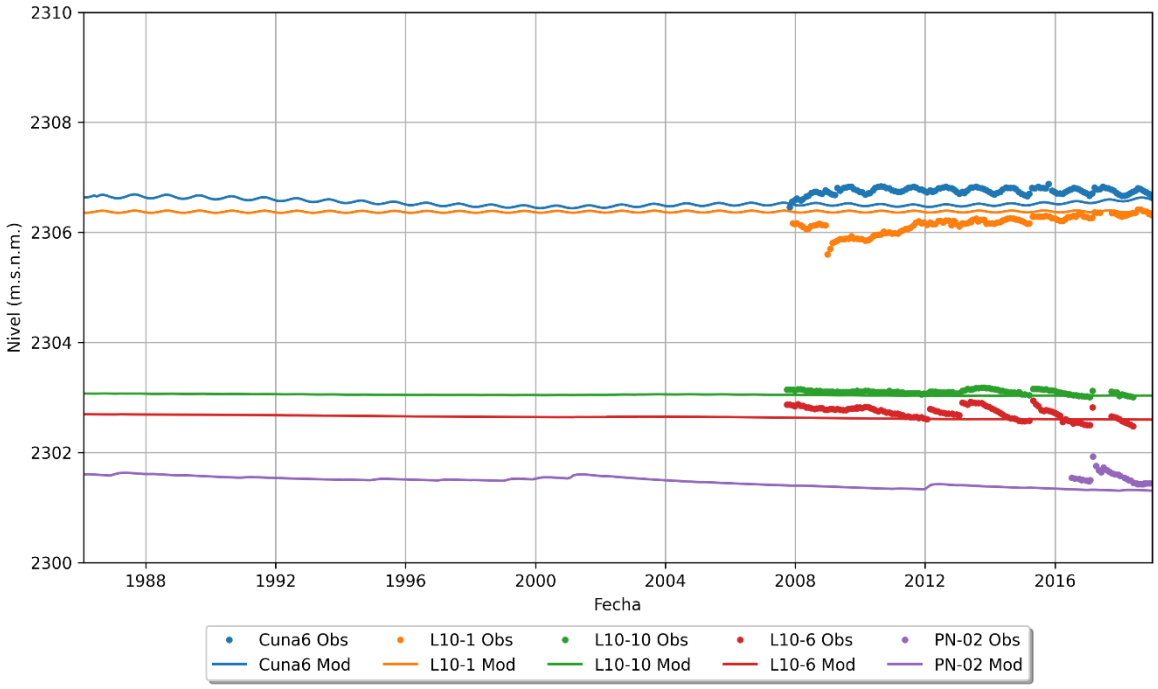


Figura III-78: Comparación de niveles observados y modelados a partir del perfil Peine.
Fuente: Elaboración propia.

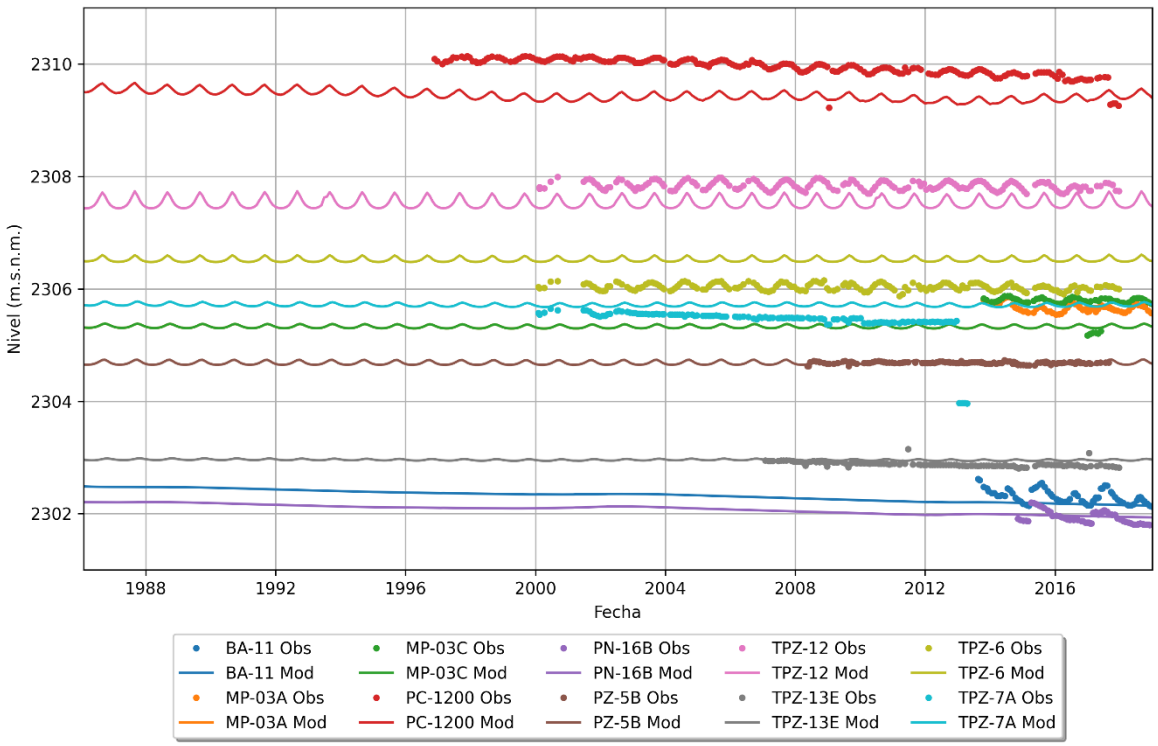


Figura III-79: Comparación de niveles observados y modelados a partir del perfil La Punta La Brava.
Fuente: Elaboración propia.

La comparación entre niveles modelados observados muestra que las tendencias simuladas por los perfiles se ajustan y son coherentes a los valores observados. En el caso del perfil Quelana, se reproducen las tendencias de los descensos en el límite este influenciadas por las extracciones de agua industrial de SQM (pozos L3-16 y L3-15). El perfil La Punta La Brava logra representar las tendencias sinusoidales en los puntos localizados en el límite este del perfil, asociados a la variación estacional de la evaporación. En el resto de los perfiles se aprecia una tendencia plana en la zona marginal. Estos resultados muestran que las tendencias modeladas por los perfiles SEAWAT son coherentes con las tendencias observadas.

III.6.3.1.2 Comparación de perfiles verticales de conductividad eléctrica medidos y simulados

Para el análisis de los resultados del modelo de transporte, se realizó una comparación cualitativa entre los resultados de los perfiles SEAWT con perfiles verticales de conductividad eléctrica medida en pozos de observación. Para esto, se transformaron las concentraciones obtenidas de los modelos a densidad mediante la siguiente relación propuesta por CORFO-Amphos21 (2021) a partir de relaciones entre sólidos disueltos totales (C) y densidad (ρ), ambos en unidades de g/cm^3:

$$\rho = 1{,}002 + 0{,}718\, C$$

Luego, para transformar de densidad a conductividad eléctrica (CE), en $\mu S/cm$, se consideró la relación propuesta por CORFO-Amphos21 (2021):

$$\rho = 3^{-6} CE^2 + 7^{-5} CE + 1{,}002$$

En la Figura III-80, Figura III-81 y Figura III-82 se muestran los puntos de observación y la comparación entre perfiles de conductividad eléctrica observados y simulados. Para los perfiles observados se consideraron los perfiles más actuales que tuvieran datos continuos que permitan comparar valores tanto en zona de agua fresca, zona de mezcla y salmuera.

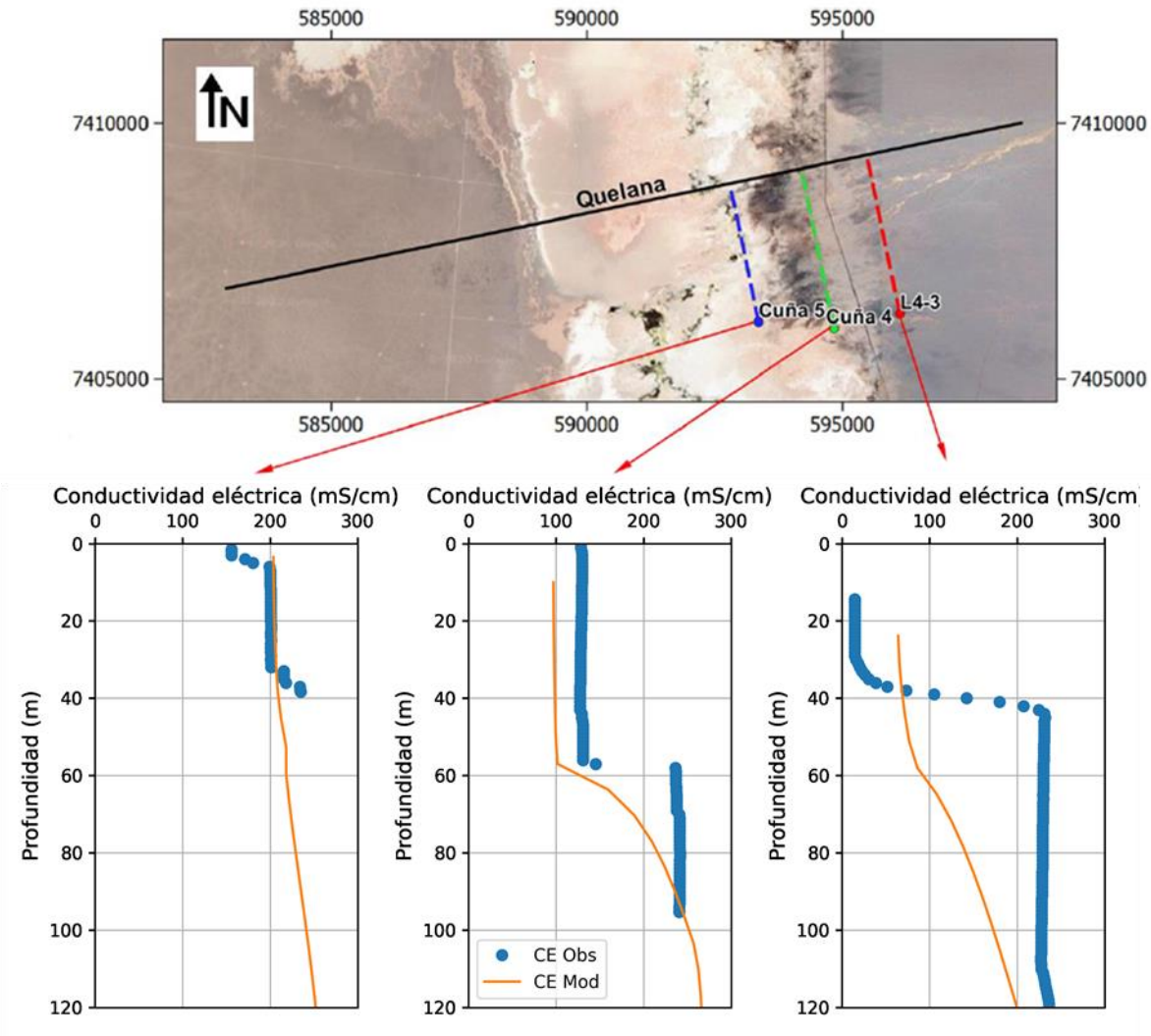


Figura III-80: Comparación de distribución vertical de conductividad eléctrica medida (Rockwood Lithium) y simulada para el perfil Quelana.

Nota: Para el punto Cuña 5 se tomó la medición del 16/06/2018, para el punto Cuña 4 se tomó la medición del 239/12/2017 y para el punto L4-3 se tomó la medición del 28/12/2017.

Fuente: Adaptado a partir de CORFO-Amphos21 (2021).

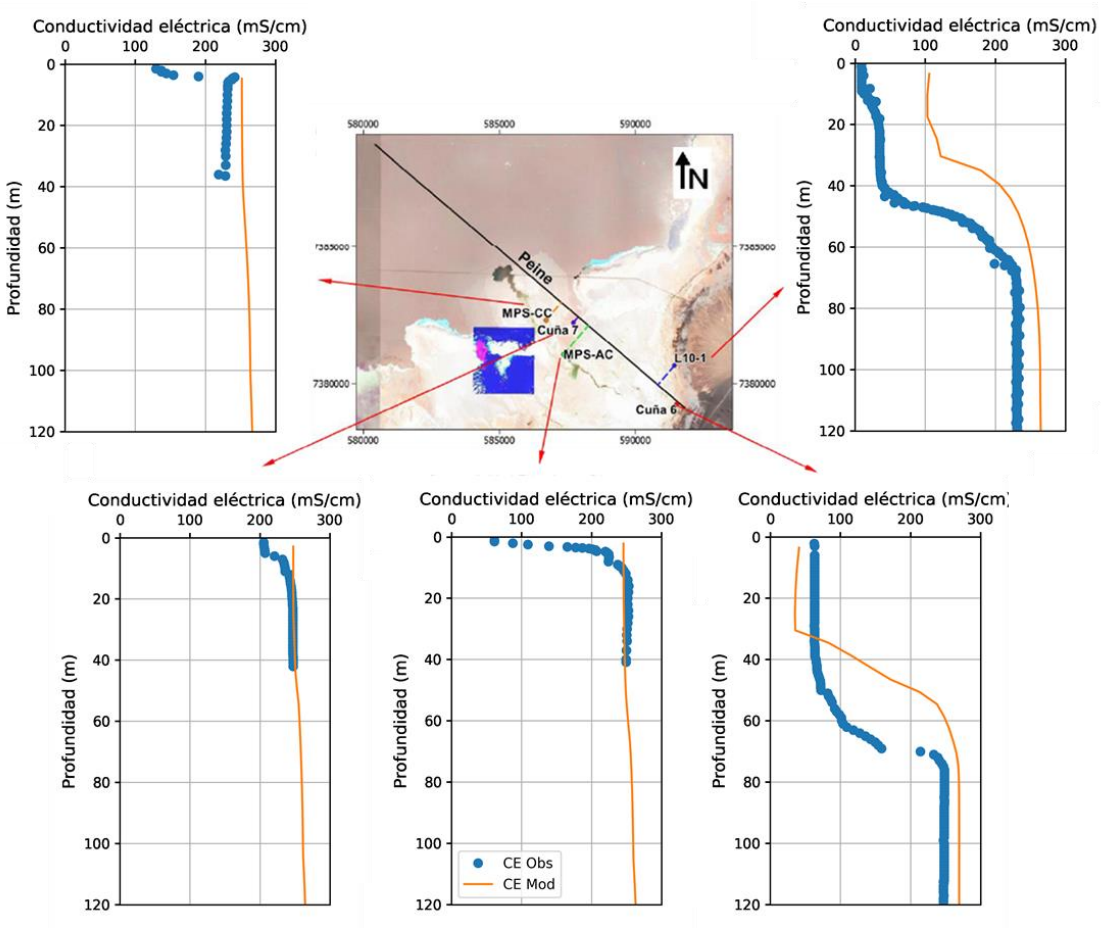


Figura III-81: Comparación de distribución vertical de conductividad eléctrica medida (Rockwood Lithium) y simulada para el perfil Peine.

Nota: Para el punto MPS-CC se tomó la medición del 22/08/2018, para el punto Cuña 7 se tomó la medición de 27/12/2015, para el punto MPS-AC se tomó la medición del 22/08/2018, para el punto L10-1 se tomó la medición del 26/12/2015 y para el punto Cuña 6 se tomó la medición del 30/12/2017.

Fuente: Adaptado a partir de CORFO-Amphos21 (2021).

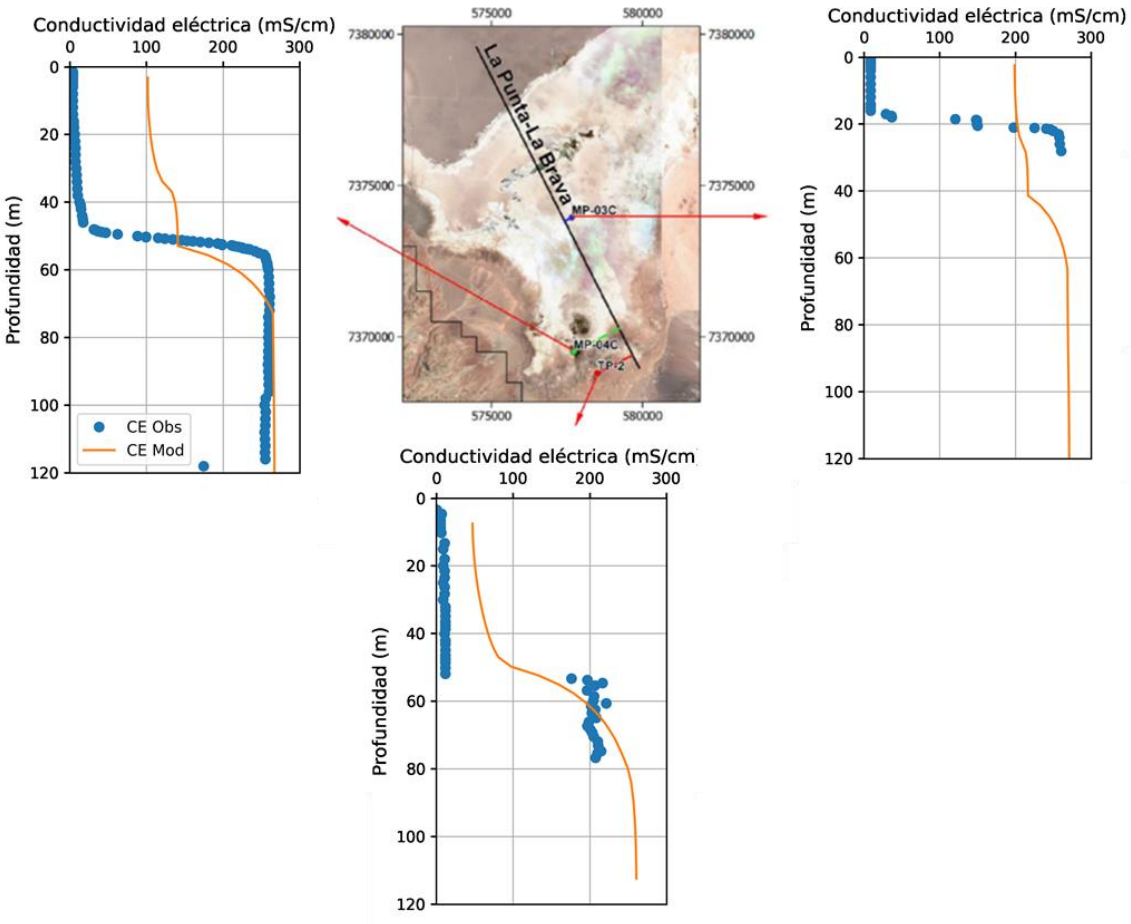


Figura III-82: Comparación de distribución vertical de conductividad eléctrica medida (Rockwood Lithium) y simulada para el perfil La Punta La Brava.
Nota: Para el punto MP-03C se tomó la medición del 04/09/2018, para el punto MP-04C se tomó la medición del 24/08/2018 y para el punto TP-2 se tomó la medición del 18/08/2017.
Fuente: Adaptado a partir de CORFO-Amphos21 (2021).

En general, los perfiles verticales de conductividad eléctricas obtenidos a partir de las simulaciones de los perfiles SEAWAT son consistentes con los datos medidos. Los resultados representan la existencia de una zona de agua fresca, una zona de salmuera y una zona de mezcla que las separa, así como aproximar la extensión de la zona de mezcla definida entre 100 y 200 mS/cm, a excepción del punto MP-03C del perfil La Punta La Brava. En el pozo MP-03C el modelo SEAWAT no logra replicar la existencia de una zona de agua fresca en los primeros 20 metros de profundidad. Esta diferencia se puede deber a flujos tridimensionales desde el abanico aluvial ubicado al oeste del perfil que los perfiles no logran replicar. Adicionalmente, en algunos pozos de los perfiles Quelana y La Punta La Brava se aprecian mediciones que representan una interfaz abrupta entre agua fresca y salmuera, o que no existe una zona de mezcla, lo cual no es realista si consideramos la gran diferencia de densidad entre los fluidos. Esto sugiere que dentro de estos puntos de observación haya una estratificación de densidad. Estos resultados muestran que la representación de la distribución espacial en los perfiles SEAWAT es coherente con las mediciones.

III.6.3.1.3 Distribución de concentraciones

En la Figura III-83, Figura III-84 y Figura III-85 se muestra la distribución espacial de la concentración de solutos en 3 períodos distintos para los perfiles Quelana, Peine y La Punta La Brava, respectivamente. Los períodos consideran instantes previos al inicio de extracciones, en un corto plazo posterior al inicio de extracciones y en un largo plazo posterior al inicio de extracciones. Estos perfiles muestran las iso-superficies de concentraciones de un 25%, 50% y 75%.

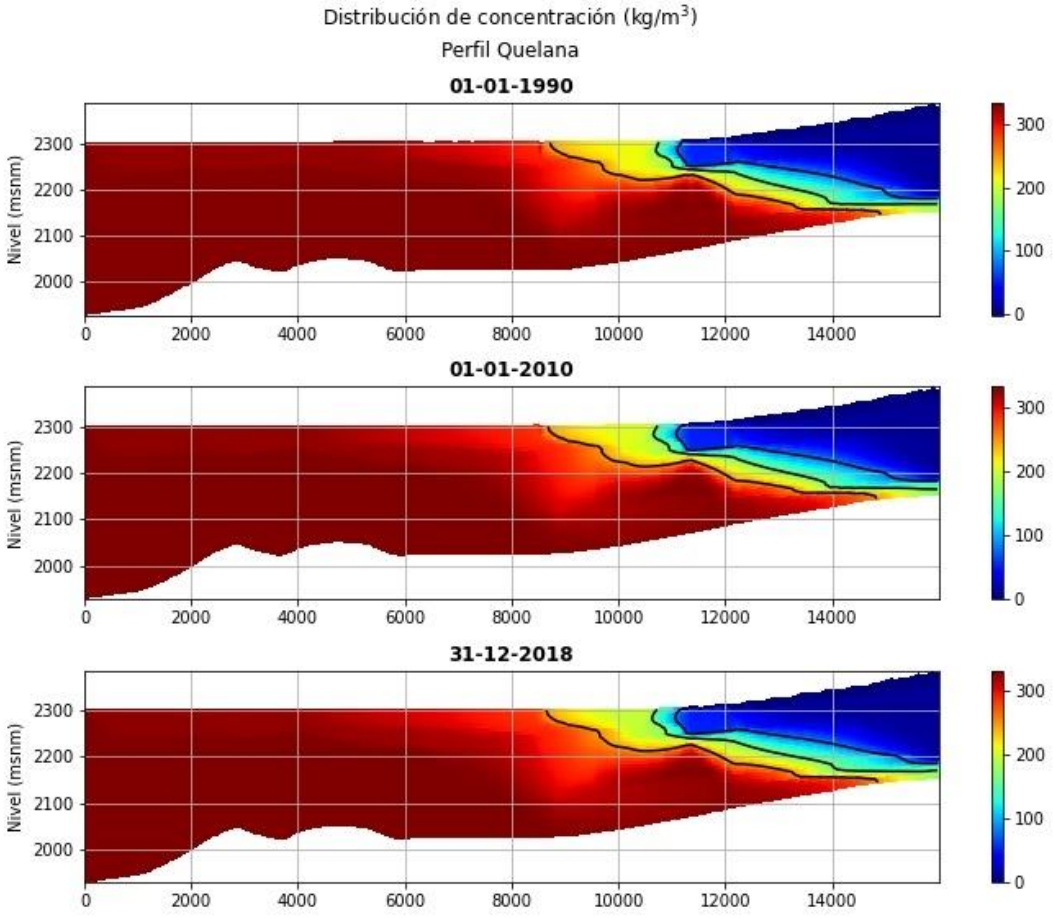


Figura III-83: Distribución de la concentración de solutos a partir de la actualización del perfil Quelana con resultados del modelo integrado.
Nota: Se incorporan 3 líneas de contorno negras que representan un 25%, 50% y 75% de la concentración de salmuera.
Fuente: Elaboración propia.

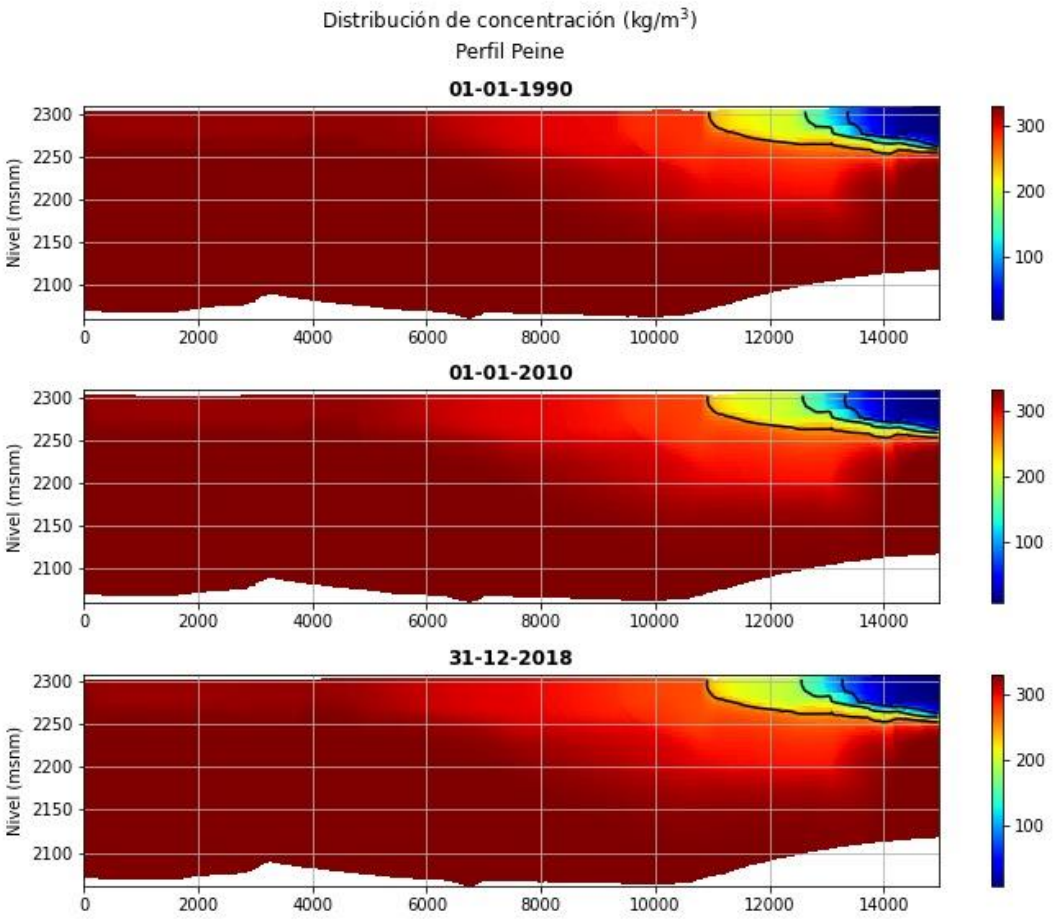


Figura III-84: Distribución de la concentración de solutos a partir de la actualización del perfil Peine con resultados del modelo integrado.

Nota: Se incorporan 3 líneas de contorno negras que representan un 25%, 50% y 75% de la concentración de salmuera.

Fuente: Elaboración propia.

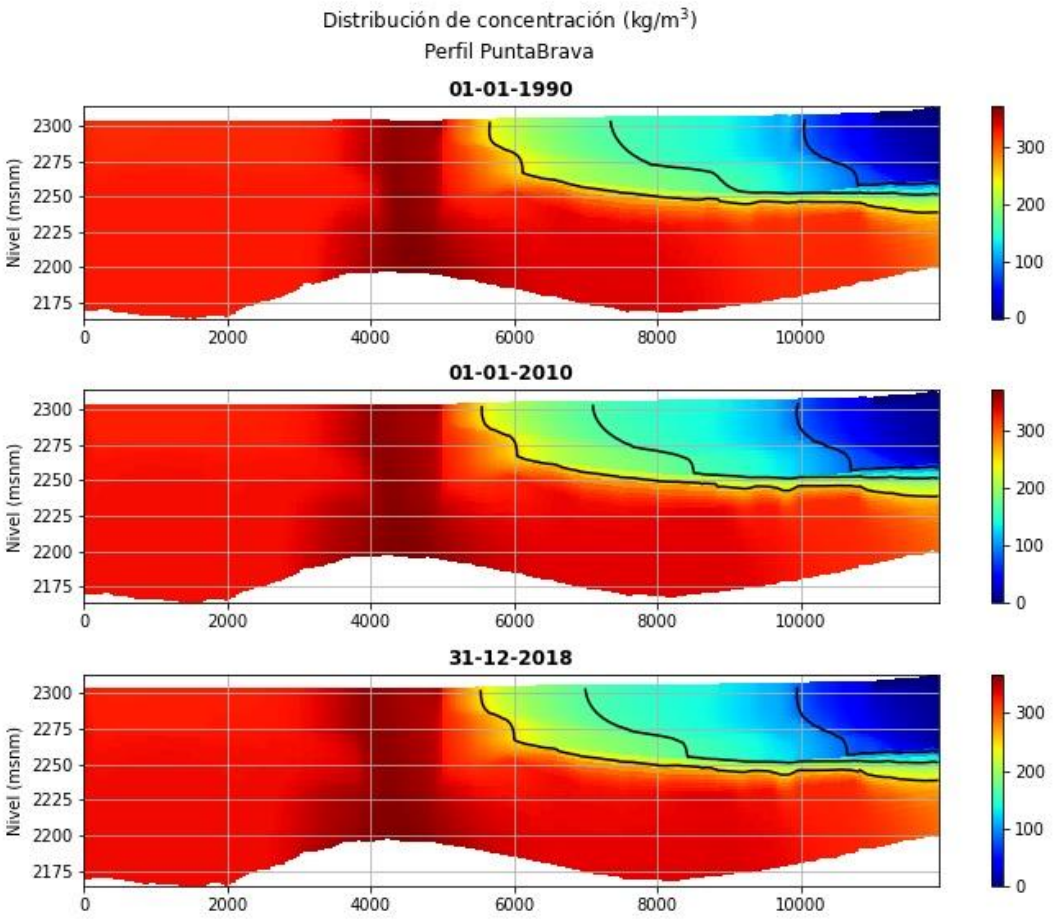


Figura III-85: Distribución de la concentración de solutos a partir de la actualización del perfil La Punta La Brava con resultados del modelo integrado.
Nota: Se incorporan 3 líneas de contorno negras que representan un 25%, 50% y 75% de la concentración de salmuera.
Fuente: Elaboración propia.

La distribución de concentraciones muestra la capacidad de los perfiles SEAWAT de identificar la existencia de una zona de mezcla que actúa como interfaz entre el agua fresca y la salmuera. Los resultados de los perfiles en período transitorio muestran que no hay una variación significativa en la forma de la zona de mezcla producto de las extracciones (basado en las iso-superficies de 25%, 50% y 75% de concentración de salmuera). Estos resultados sugieren que la diferencia de niveles previo y posterior al inicio de extracciones, junto a la duración de estos descensos, no tienen un efecto significativo en la distribución de concentraciones a una escala del orden de magnitud del tamaño de celda. Sin embargo, debido a la alta concentración de la salmuera, es esperable que el desplazamiento sea lento y no sea apreciable en un corto plazo.

III.6.3.2 Resultados de la modelación con MODFLOW-SWI2

III.6.3.2.1 Convergencia

Para la definición de la discretización temporal del modelo en régimen cuasi-estacionario se probaron casos considerando entre 2.500 y 150.000 pasos de tiempo, implicando paso de tiempo de 10 días a medio día. Sin embargo, para el modelo MODFLOW 2005 el caso que presentó un mejor balance volumétrico final acumulado fue el caso con 25.000 pasos de tiempo. Con el modelo MODFLOW NWT no se logró obtener un cierre aceptable, por lo que los resultados mostrados en esta sección corresponden únicamente a los obtenidos con MODFLOW 2005. En la Figura III-86 se muestra la evolución de la discrepancia de la zona 1 (agua dulce), zona 2 (salmuera) y balance hídrico para el caso con 25.000 pasos de tiempo (3 días cada uno), caso en que se logró un menor valor en la discrepancia volumétrica final de las zonas de distinta densidad para el modelo MODFLOW-2005.

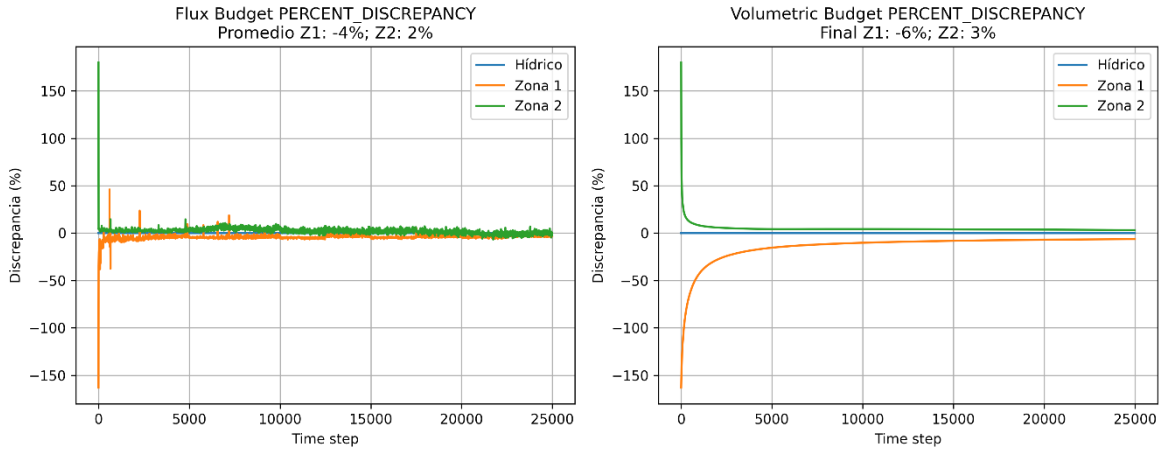


Figura III-86: Evolución de las discrepancias de flujo y volumétricas, para las zonas de agua fresca (zona 1), salmuera (zona 2) y balance hídrico total del modelo MODFLOW-2005.
Fuente: Elaboración propia.

El modelo MODFLOW 2005 presenta discrepancias importantes al inicio de la simulación, sin embargo, estas disminuyen asintóticamente en el tiempo, cerrando con valores menores al 10%. Si bien aumentar el número de pasos de tiempo presenta una leve mejora en la tendencia de las discrepancias, esto no generó mayores diferencias en niveles ni altura de las superficies calculadas con SWI2. En el caso de las discrepancias del modelo MODFLOW NWT, las discrepancias asociadas a flujos no se estabilizan y las discrepancias volumétricas de la zona de salmuera no logra estabilizarse bajo el 10%. En la Tabla III-34 se presentan los valores finales de los cierres, en términos de volúmenes, para los distintos casos de sensibilización. Estos resultados muestran que al ajustar los parámetros de SWI2 no mejoran sustancialmente los balances e indican que es necesario generar modificaciones mayores al modelo para lograr un cierre aceptable en los balances de las zonas de fluido de distinta densidad, en este estudio se revisó el refinamiento horizontal de la malla hasta celdas de 50 x 50 m^2, sin embargo, no se obtuvieron mayores diferencias en los balances ni ubicación de la interfaz salina, por lo que no se muestran en este informe. Esto sugiere la necesidad de

una discretización vertical del modelo, lo cual escapa a los alcances de este estudio. Dada la escala del modelo numérico, el cierre se considera razonable para esquematizar la ubicación de la interfaz salina mediante el modelo MODFLOW 2005.

Tabla III-34: Cierre en términos de volúmenes de entrada y salida al terminar el período cuasi-estacionario en los distintos casos de sensibilización.

Caso de sensibilización	Discrepancia (%)		
	Zona de agua fresca	Zona de salmuera	Zona de mezcla
Caso base	-6,22	2,74	No aplica
Tip y toe, 0.10	-6,43	3,56	No aplica
Tip y toe, 1.00	-4,23	1,60	No aplica
Alfa y beta, 0.01	-6,28	3,64	No aplica
Alfa y beta, 1.00	-5,51	1,22	No aplica
Porosidad, disminución en 25%	-5,90	4,11	No aplica
Porosidad, aumento en 25%	-6,55	1,51	No aplica
Incorporar zona de mezcla	-6,50	25,17	-27,63
MODFLOW NWT	-4,92	-11,38	No aplica

Fuente: Elaboración propia.

III.6.3.2.2 Resultados de la sensibilización de los parámetros de SWI2

Como resultado de la sensibilización de los parámetros de SWI2, en la Figura III-87 se muestra la variación absoluta, a escala de cuenca, de la altura de la interfaz salina al sensibilizar los parámetros tip y toe, alfa y beta de SWI2 y la porosidad efectiva.

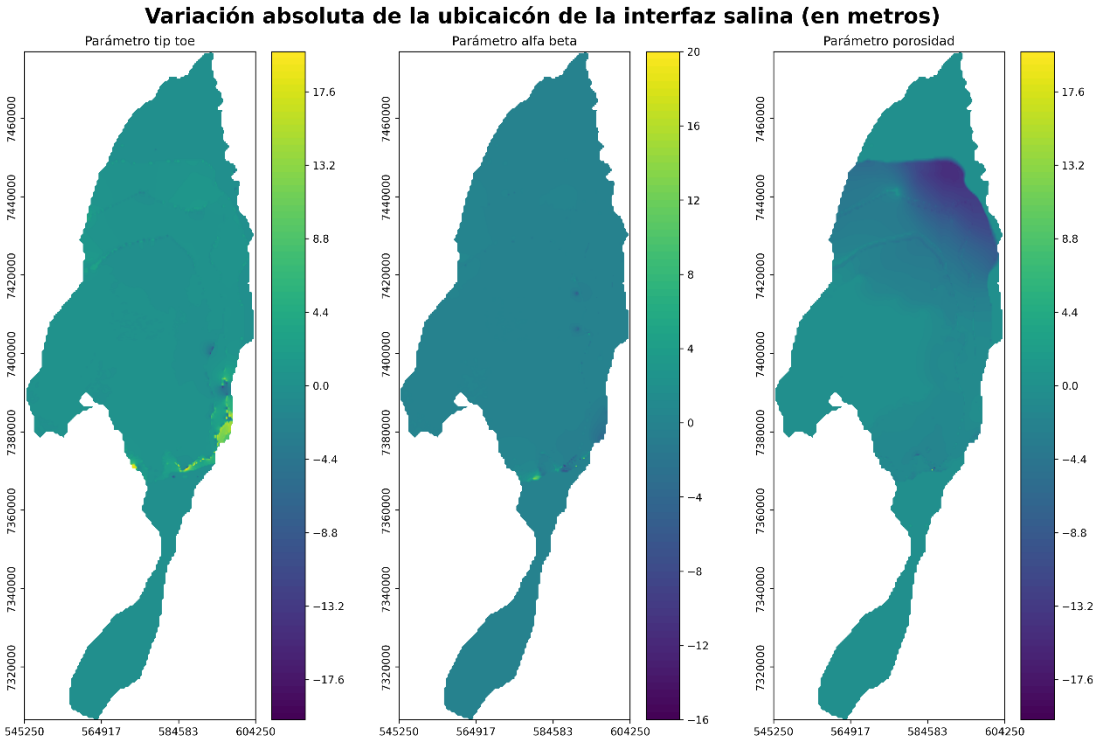


Figura III-87: Resultados de la sensibilización de los parámetros de SWI2 en términos de diferencias absolutas de la ubicación de la interfaz salina.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la sensibilización del caso con una interfaz abrupta entre la zona de agua fresca y salmuera muestran que la ubicación de la interfaz no se ve significativamente afectada por los parámetros de SWI2 (tip y toe o alfa y beta). Esto, debido a que no se observa una tendencia, sino que más bien diferencias puntuales en algunas celdas del modelo MODFLOW. Sin embargo, al aumentar o disminuir la porosidad efectiva en un 25% se aprecia que, hacia el exterior de la zona del núcleo hay un efecto consistente en la posición de la interfaz salina, indicando que la porosidad afecta la inclinación de la interfaz salina, siendo este efecto más pronunciado en la zona norte. Estos resultados indican que, en una primera instancia, el valor base para los parámetros SWI2 serían suficientes para representar la espacialización de la interfaz salina a escala de la cuenca del Salar de Atacama. No obstante, los resultados al variar la porosidad indican que se requiere un mayor entendimiento de las propiedades de transporte en la zona marginal y norte del acuífero para disminuir su incertidumbre. Para el caso en que se consideró la existencia de una zona de mezcla, la distribución del ancho de esta zona se muestra la Figura III-88, calculada como la diferencia entre la altura de las superficies que representan un 25 y 75% de concentración de salmuera.

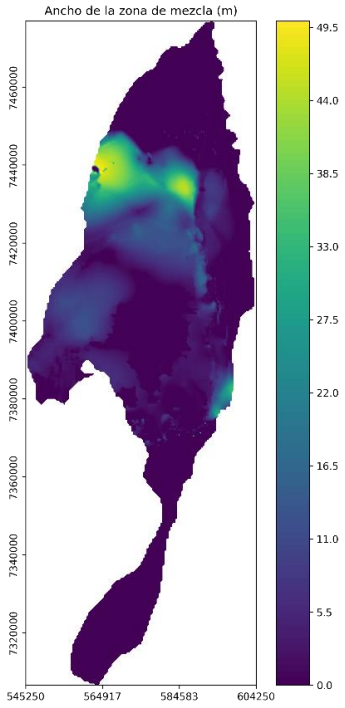


Figura III-88: Ancho de la zona de mezcla al considerar dos superficies de distinta densidad en el modelo MODFLOW con el paquete SWI2.

Nota: La figura muestra que el ancho de la zona de mezcla en el borde este es menor a 10 metros, lo cual no es consistente con la información geofísica presentada por CORFO-Amphos21 (2021). Esta figura no debe considerarse representativa de la cuenca, sino que como el resultado de un análisis de las capacidades de SWI2.

Fuente: Elaboración propia.

La zona de mezcla representada por SWI2 es relativamente delgada, comparada con la extensión del modelo, sin embargo, esta aumenta su tamaño en la zona norte. En la zona de marginal el ancho de la zona de mezcla calculado con SWI2 es menor a 10 metros, inconsistente con la información geofísica presentada por CORFO-Amphos21 (2021), por lo que considerar dos superficies de distinta densidad no permite representar correctamente la zona de mezcla entre salmuera y agua fresca. Estos resultados indican que considerar en SWI2 una única superficie que representa una interfaz abrupta entre la salmuera y agua fresca es una simplificación aceptable para entender la distribución de la salmuera a escala de la cuenca del Salar de Atacama.

III.6.3.2.3 Espacialización de la salmuera a escala del Salar de Atacama

Para el caso base, en la Figura III-89 se muestra la profundidad a la cual se puede encontrar la interfaz agua fresca – salmuera, desde la superficie, y el espesor de la zona de salmuera, calculada como la diferencia entre la altura de la superficie que separa las zonas de distinta densidad y el fondo del acuífero.

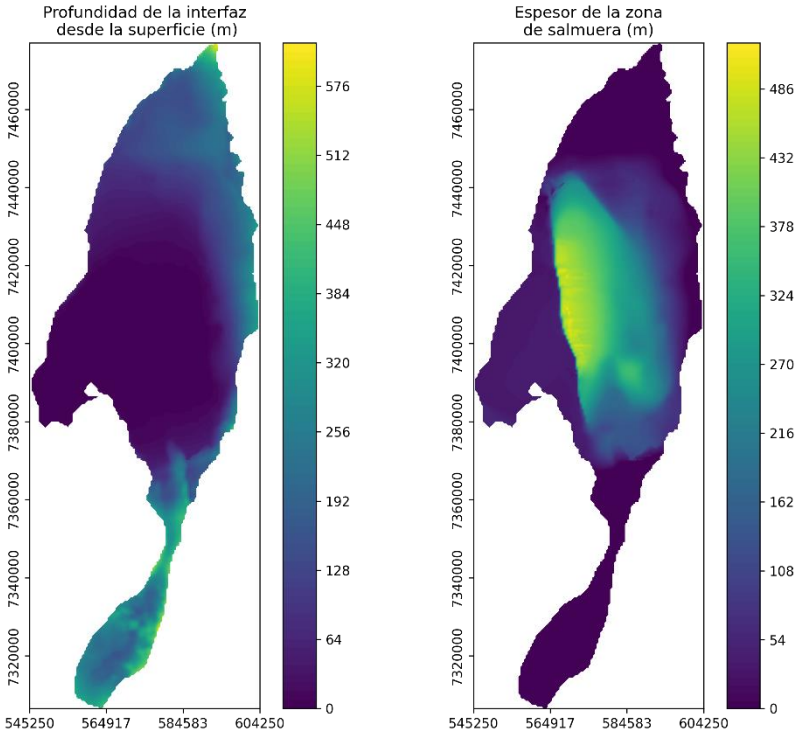


Figura III-89: Profundidad a la cual se puede encontrar la interfaz salina, desde la superficie, y espesor de la zona de salmuera.
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que la profundidad a la cual se puede encontrar la salmuera, desde la superficie, es somera en la zona del núcleo y aumenta hacia los extremos, siendo un resultado consistente con la existencia de una zona de transición a agua fresca hacia los extremos del acuífero (CORFO-Amphos21, 2021). En la Figura III-90 se muestra la ubicación de 4 cortes transversales en dirección oeste – este y 3 cortes en dirección norte – sur, que se detallan en la Figura III-91 y Figura III-92, para caracterizar la distribución de la salmuera a lo largo del acuífero.

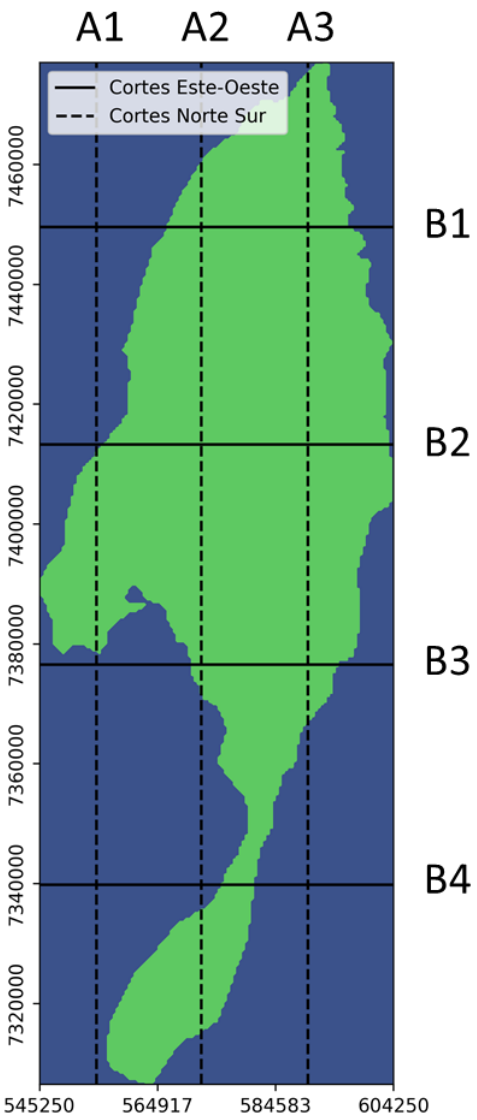


Figura III-90: Ubicación de los cortes mostrados en la Figura III-91 y Figura III-92.
Fuente: Elaboración propia.

Los perfiles A2, A3, B1 y B4 muestran que no hay salmuera en la zona norte ni en la zona sur del acuífero. Los perfiles A1 y B2 muestran que, si bien en la zona del núcleo, en la Falla Salar, la altura de salmuera es baja, el acuífero está saturado en salmuera. El perfil A3 muestra que la inclinación de la cuña no es la misma en todo el acuífero, en particular, en la zona norte hay una cuña con menor inclinación que la representada en la zona sur. Los cortes transversales muestran que SWI2 tiene la capacidad de acuñar la salmuera en la zona del núcleo y representar una disminución de su altura hacia los extremos del acuífero, representando la existencia de la interfaz entre agua dulce y salmuera en el acuífero del Salar de Atacama.

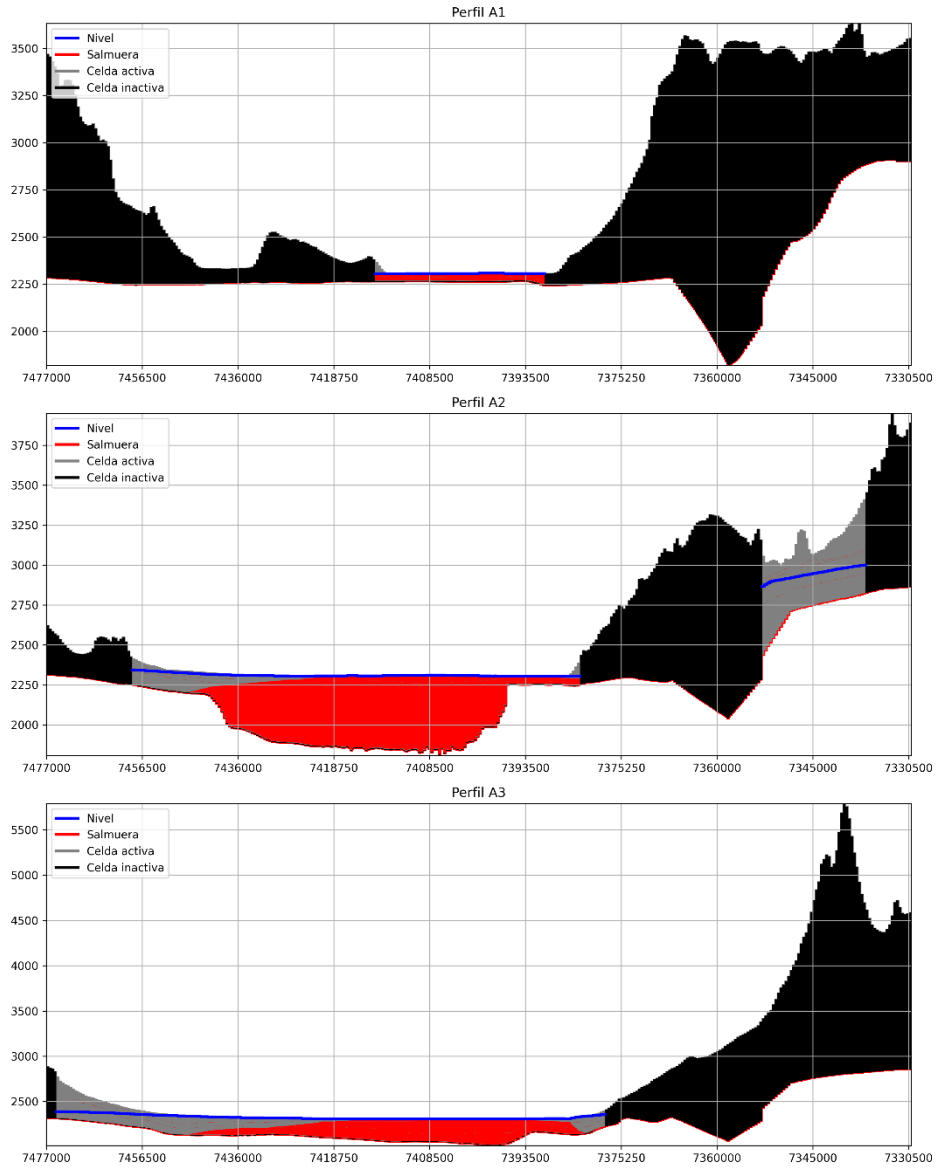


Figura III-91: Ubicación de la interfaz salina y niveles en cortes transversales en la dirección Norte-Sur, calculadas con MODFLOW-2005.
Fuente: Elaboración propia.

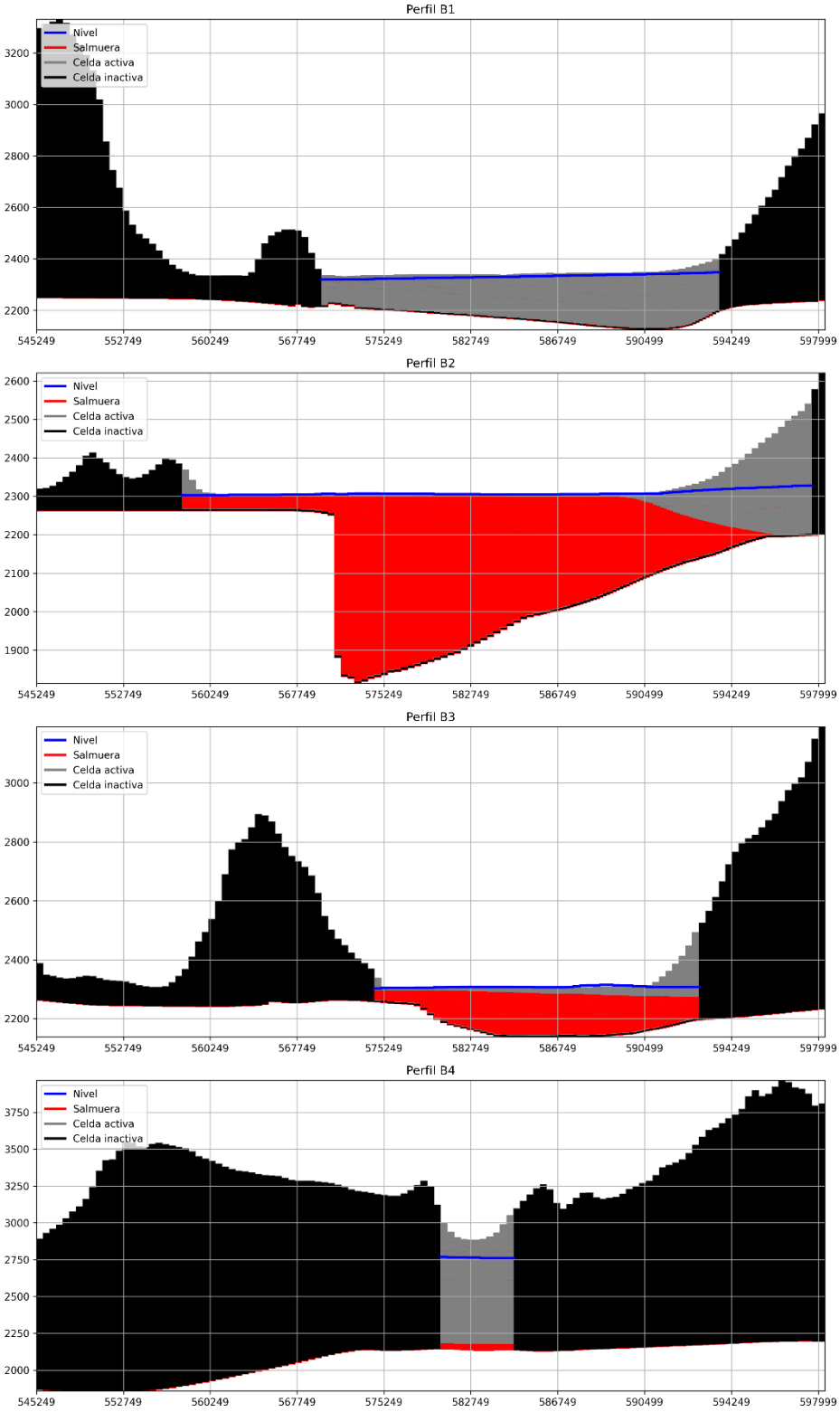


Figura III-92: Ubicación de la interfaz salina y niveles en cortes transversales en la dirección Oeste-Este, calculadas con MODFLOW-2005.
Fuente: Elaboración propia.

III.6.3.2.4 Comparación con perfiles SEAWAT

Para contrastar los resultados de la distribución de la salmuera con los resultados obtenidos por CORFO-Amphos21 (2021), en la Figura III-93 se presentan los perfiles Quelana, Peine y La Punta La Brava con los resultados del modelo SEAWAT y SWI2 en régimen cuasi estacionario. En los perfiles no se incorporan los resultados de la sensibilización debido a que en estas zonas no se aprecia una diferencia visible al variar los parámetros de SWI2 o la porosidad. En el caso del escenario con zona de mezcla, esta zona tampoco se logra apreciar en estas figuras, por lo que no se incorpora.

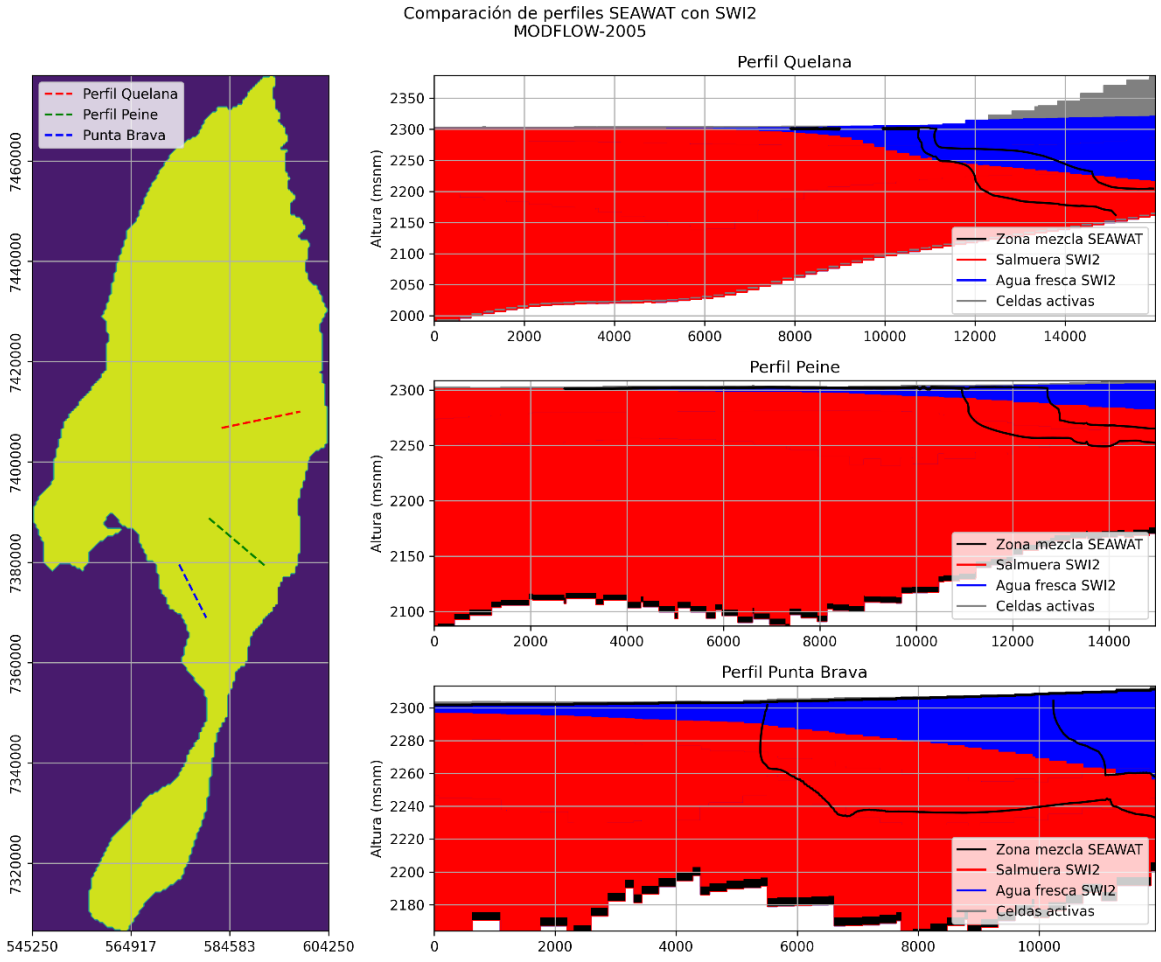


Figura III-93: Comparación de los resultados obtenidos con SWI2 y con SEAWAT al considerar una única superficie o una interfaz abrupta entre la salmuera y el agua fresca.
Fuente: Elaboración propia.

La comparación de los perfiles muestra que SWI2 tiene la capacidad de aproximar la ubicación de la interfaz salina según los resultados de SEAWAT. Sin embargo, la distribución obtenida con SWI2 presentan una menor inclinación de la interfaz que los perfiles SEAWAT. Esta diferencia puede ser consecuencia de que SWI2 no considera resistencia al flujo dentro de un acuífero (dentro de una capa del modelo MODFLOW), por lo que el desplazamiento vertical de la interfaz podría estar sobreestimado, a diferencia del modelo SEAWAT que

considera la resistencia al flujo de forma explícita en la ecuación de transporte de solutos. Esto sugiere la necesidad de un refinamiento en la dirección vertical de la grilla para representar de mejor manera los flujos verticales en SWI2. Cabe notar que los parámetros tip y toe influyen en la inclinación de la interfaz al restringir el desplazamiento horizontal, sin embargo, estos se definen con un valor único para toda la extensión del modelo. La sensibilización de los parámetros tip y toe (que determinan la pendiente mínima que permite el desplazamiento horizontal de la interfaz), de la porosidad y del número de superficies (o equivalentemente, explicitar o no la existencia de una zona de mezcla) no presentaron mayores diferencias en la inclinación de la interfaz (No se muestran en este análisis debido a que se superponen).

III.6.4 Conclusiones, limitaciones y recomendaciones

III.6.4.1 Conclusiones de la modelación con SEAWAT

A continuación, se enumeran breves conclusiones respecto a la simulación de densidad variable mediante los perfiles SEAWAT definidos por CORFO-Amphos21 (2021):

- Los modelos de flujo con densidad variable (perfiles SEAWAT) corresponden a una simplificación bidimensional de un funcionamiento tridimensional, cuyos resultados deben tomarse de modo referencial. Adicionalmente, el código utilizado permite la representación de la curva de evapotranspiración como un único segmento y no se incorporó la simulación de procesos de precipitación/disolución (transporte reactivo). Estos perfiles permiten evaluar, de forma general, tendencias en los niveles, concentraciones y desplazamientos de la interfaz salina simulados. De este modo, estos valores no deben ser utilizados para evaluar efectos específicos en los sistemas de protección ambiental o sistemas lagunares (funcionamiento de los sistemas lagunares, el cual es tridimensional y obedece a una relación con cuerpos de agua superficiales y subterráneos, cambios en la ubicación de las lagunas, desaparición de estas, entre otros), los cuales requieren de herramientas más complejas y construidas para ello.

- Adicionalmente, los perfiles presentados no permiten definir con precisión el efecto específico del movimiento de la interfaz sobre el funcionamiento de los sistemas lagunares, cambios en la ubicación de las lagunas, desaparición de las mismas, entre otros. La dinámica de estos procesos es tridimensional y obedece a una relación con cuerpos de agua superficial y subterránea, que no forman parte de los modelos desarrollados.

- Entre las limitaciones del código utilizado se encuentran la simplificación que se debe realizar sobre la curva de evaporación utilizada (al no poder definir más de un segmento) y la no simulación de procesos de precipitación/disolución (transporte reactivo).

- Por tanto, los efectos específicos sobre los sistemas lagunares debe ser evaluada con herramientas más complejas que incluyan la interacción de agua superficial y

subterránea, procesos en la zona no saturada, y densidad variable.

- La actualización de los parámetros de entradas o variables que alimentan los perfiles SEAWAT son la recarga directa, representada por la infiltración desde los Catchments WEAP en la superficie del modelo Salar-Monturaqui, y la variabilidad temporal de los niveles prescritos a partir del modelo tridimensional de flujo MODFLOW.

- La comparación de los resultados de los perfiles SEAWAT a partir de los resultados del modelo integrado y del modelo desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021), muestra que la recarga directa no es una componente con un efecto significativo en la distribución de niveles ni de concentración de solutos. Adicionalmente, dado que el modelo MODFLOW fue calibrado para representar correctamente las tendencias en pozos de medición, incluyendo los pozos definidos en los extremos de los perfiles, la actualización de los niveles prescritos no presentó mayor diferencia al comparar los resultados con los obtenidos por CORFO-Amphos21 (2021).

- La comparación entre niveles y perfiles verticales de conductividad eléctrica simulados en régimen transitorio con valores observados muestra que los resultados de los perfiles SEAWAT son coherentes y presentan tendencias similares.

- Los perfiles SEAWAT permiten entender localmente el comportamiento de la interfaz salina y los fluidos de distinta densidad. Los resultados en régimen natural muestran la existencia de una zona de mezcla entre la salmuera y el agua fresca. Los resultados en el período histórico muestran que no hay un desplazamiento de la interfaz o cuña salina mayor al orden de magnitud del tamaño de celda.

III.6.4.2 Conclusiones de la modelación con MODFLOW-SWI2

A continuación, se enumeran breves conclusiones respecto la experiencia de modelación de flujo con densidad variable a escala de la cuenca del Salar de Atacama con MODFLOW-SWI2:

- El paquete SWI2 de MODFLOW tiene la capacidad de representar un acuñamiento de la salmuera en la zona del núcleo junto a una disminución de la altura de la salmuera hacia los extremos norte, este y sur del acuífero. Este es un avance importante en cuanto a la modelación de flujo con densidad variable en sistemas complejos como lo es el sistema subterráneo de la cuenca del Salar de Atacama.

- Los balances de las zonas de distinta densidad no logran alcanzar valores menores a un 1%. Sin embargo, dada la escala del modelo, los resultados son considerados razonables para entender la distribución de la salmuera en el acuífero.

- Los resultados de la sensibilización de parámetros muestran que una correcta representación de la porosidad disminuiría la incertidumbre al representar la distribución de la salmuera, en especial en la zona norte.

- La comparación de los perfiles SEAWAT con la distribución espacial de SWI2 muestra que, si bien los resultados de SWI2 representan una interfaz con menor inclinación que los resultados de SEAWAT, esta interfaz existe en las zonas que SEAWAT predice su existencia. Esto indica que SWI2 tendría la capacidad de representar la zona de lagunas en el Salar de Atacama.

- Si bien el paquete SWI2 de MODFLOW muestra tener la capacidad de representar la distribución de la salmuera a escala de la cuenca del Salar de Atacama, los balances no son suficientemente satisfactorios como para ser incorporados en un modelo integrado, como lo es el resultado del presente informe. Además, la necesidad de más información de los parámetros de transporte (porosidad en este caso), resultante de la sensibilidad de la porosidad, levantan una brecha respecto al uso de esta herramienta. Adicional a esto, no hay suficiente información de concentración química en profundidad para una calibración y validación adecuada del modelo.

- El modelo desarrollado en el presente estudio es un modelo altamente complejo. En el que sí se quiere llevar a cabo un análisis más detallado, que permita hacerse cargo de problemas como las discrepancias altas en el balance de SWI2—se pueden llevar a cabo las siguientes actividades:

    - Redefinir la geometría del modelo (modificar discretización vertical para evitar capas muy gruesas/delgadas y representar de mejor manera la resistencia al flujo vertical).
    - Verificar condiciones de borde (cambiar situación actual de recarga con flujo prescrito por una condición de recarga más suave, e.g., zona perimetral de conductividad infinitamente alta que recibe la recarga de WEAP).
    - Configurar adecuadamente y en forma minuciosa el solver (hacer barrido completo de los parámetros del solucionador, tanto NWT como SWI2).
    - Verificación de condiciones iniciales del modelo (diseñar periodo de calentamiento 'burn-in' pseudo-estacionario que asegure convergencia previa a corrida de alternativas).

Esta exploración es un avance importante en la modelación de flujo con densidad variable a escala de cuencas con salares, por lo que, un eventual estudio enfocado en cerrar esta experiencia sería una ganancia importante para la implementación de modelos integrados para le gestión hídrica en salares. En la actualidad, la estrategia WEAP-MODFLOW-SWI2 está operativa para sistemas costeros, sin embargo, hay esfuerzos pendientes para la correcta implementación en salares. La mejor manera de obtener un modelo tridimensional a escala de la cuenca del Salar de Atacama con el uso de la herramienta explorada en este acápite debe llevar a cabo las actividades listadas, en particular la revisión de la discretización vertical, y realizar las pruebas correspondientes para identificar y solucionar los problemas de convergencia. Sin embargo, es importante notar que, como muestran las discrepancias presentadas en el Capítulo III.6.3.2.1, el balance de flujo es correcto, siendo el balance de las zonas de distinta densidad las que presentan cierres no satisfactorios. Esta experiencia debe tomarse como un buen ejemplo de consideraciones particulares para aquellas zonas

en las que se desee llevar a cabo este análisis, en el que modelos regionales deban refinar a escalas locales ciertas zonas.

III.6.4.3 Estrategia para la modelación de flujo con densidad variable en el modelo integrado

Respecto a la modelación de flujo con densidad variable en la cuenca del Salar de Atacama para representar la espacialización y comportamiento de la interfaz salina:

- La modelación con los perfiles SEAWAT, si bien no permiten representar a escala de cuenca la ubicación de la interfaz salina, presentan una buena convergencia y representan correctamente las tendencias de niveles y perfiles verticales de conductividad eléctrica observados. Estos perfiles permiten estudiar de forma local el comportamiento de la interfaz salina.

- La modelación con el paquete SWI2 permitió obtener una primera aproximación a escala de la cuenca del Salar de Atacama de la distribución de salmuera, sin embargo, la convergencia del modelo no es adecuada para su utilización en el modelo integrado. En el apartado anterior se sugieren pasos a seguir para poder aprovechar las capacidades de SWI2 y una posible inclusión en este tipo de estudios.

Considerando estos puntos y lo expuesto a lo largo de la sección III.6, la estrategia de modelación para representar la interfaz salina en el modelo integrado se realiza mediante el uso de los perfiles SEAWAT en régimen transitorio a partir de los resultados del WEAP-MODFLOW. Esto significa que, 1) se simula primero el modelo integrado WEAP-MODFLOW y 2) tomando los resultados del modelo integrado, se actualiza la recarga directa y niveles prescritos para simular los perfiles SEAWAT. Esta estrategia de modelación debe considerar las limitaciones presentadas en las secciones III.5.4 y III.6.4.1.

III.7 Modelo en base a agentes

III.7.1 Introducción

En los capítulos anteriores se presentaron los resultados del modelo integrado de aguas superficiales y subterráneas desarrollado en la plataforma WEAP-MODFLOW, el cual va a ser la base para el desarrollo del Plan Estratégico de Gestión Hídrica (PEGH) de la cuenca del Salar de Atacama desarrollado por la DGA. En este capítulo, se presentan los resultados de la experiencia de desarrollar una estrategia de modelación complementaria e innovadora que permite incorporar no solo las interacciones entre los sistemas biofísicos, sino que también la interacción con los sistemas humanos en cuencas como la del Salar de Atacama.

La Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS por sus siglas en inglés) reconoció que los modelos hidrológicos (aguas superficiales y subterráneas) han sido concebidos y parametrizados en desconexión del comportamiento humano y las regulaciones institucionales (Montanari et al., 2013). Dado que el factor humano (e.g., regulaciones y la respuesta de los usuarios del recurso a estas) es un impulsor clave del ciclo hidrológico (e.g., a través de cambios en la escorrentía o en los niveles piezométricos de un acuífero), es clave poder representar las reacciones e interacciones bidireccionales existentes entre los sistemas hídricos y la sociedad, de modo de poder comprender como estos sistemas co-evolucionan.

La ciencia interdisciplinaria de la Socio-Hidrología nació para abordar este desafío, proponiendo acoplar el componente humano (e.g., cambios en el comportamiento humano y en las normas sociales) al ciclo del agua (Sivapalan et al., 2012), de modo de poder identificar y explorar los comportamientos emergentes a nivel del sistema (Pande & Sivapalan, 2017). A un nivel más amplio, este paradigma reconoce la complejidad presente en un sistema hídrico (Miller & Page, 2007), la cual surge de la heterogeneidad sustancial en tipos de actores (e.g., usuarios agrícolas, domésticos, industriales, etc.) y entre cada tipo (e.g., atributos demográficos o conductuales), así como de las múltiples interacciones de los actores entre sí y con su entorno, todo lo cual se retroalimenta en múltiples niveles. El nivel de granularidad y riqueza necesario para la representación correcta del componente social es muy difícil de lograr, si no imposible, utilizando paradigmas de modelación tradicionales, los cuales tienden a representar las relaciones del sistema con un alto nivel de agregación y abstracción. Frente a este escenario, es necesaria una herramienta capaz de tomar como enfoque al individuo, simulando sus decisiones e interacciones. La Modelación en Base a Agentes (ABM por sus siglas en inglés) ofrece estas capacidades.

El objetivo en este contexto es presentar una experiencia piloto del desarrollo de un ABM que sirva para explorar sistemas de gobernanza y apoyar la toma de decisiones con respecto a la extracción de agua (recurso hídrico y salmuera) en la cuenca del Salar de Atacama. El modelo se ha desarrollado tomando como base los conceptos de la modelación con actores, los cuales se materializaron a través de una serie de talleres realizados de manera virtual, cuyo propósito ha sido el de (1) describir, desde múltiples perspectivas y dimensiones, las interconexiones y retroalimentaciones asociadas a la gestión del recurso hídricos y la salmuera en una cuenca como la del Salar de Atacama,

(2) comprender el rol que tienen los actores y la institucionalidad en este proceso, ahondando en sus comportamientos e interacciones entre sí y con los recursos disponibles (e.g., fuentes de información con las que cuentan) a múltiples escalas, y finalmente, (3) entregar las bases conceptuales para poder codificar un modelo en base a agentes que se pueda acoplar al modelo de base física que se ha expuesto en los capítulos anteriores. En concreto, una primera ronda compuesta por tres talleres (denominados Talleres de Conceptualización) realizados con (1) expertos y académicos, (2) representantes de los servicios públicos a nivel nacional, y (3) representantes de los servicios públicos a nivel regional respectivamente, se centraron en capturar los modelos mentales de los participantes mediante grafos dirigidos. A partir de dichos grafos, se realizó un segundo grupo de talleres, denominados Talleres de Validación, en la que se convocó un grupo de actores quienes habían participado previamente de los Talleres de Conceptualización. Estos permitieron conceptualizar, mediante árboles de decisión, algunos de los comportamientos clave de agentes seleccionados.

Pese a que es posible identificar un número importante de espacios de interacción entre los sistemas biofísicos y humanos, cada uno de los cuales se puede abordar mediante un ABM, en esta experiencia se acotan esos espacios para desarrollar un modelo centrado en la institucionalidad ambiental y la manera en que se implementa esta institucionalidad en la cuenca del Salar de Atacama en relación con la gestión de los recursos hídricos y salmuera. Debido al amplio potencial existente en cuanto a la adición de nuevos componentes a este modelo, se diseña un código siguiendo un esquema de Programación Orientada a Objetos[68], de modo de poder implementar en futuros esfuerzos dichas mejoras de forma eficaz.

Tomando en cuenta estos antecedentes, la presentación de esta experiencia en este capítulo se presenta siguiendo el esquema de los capítulos anteriores, es decir, primero se detalla la metodología de desarrollo del ABM, detallando el proceso de planificación, implementación, y procesamiento de resultados de los Talleres de Conceptualización y de Validación. Luego, un acápite de resultados presenta el ABM finalmente implementado en código programable. Se finaliza el capítulo con conclusiones respecto de la experiencia, sus limitaciones, y una propuesta de pasos a seguir.

III.7.2 Metodología

III.7.2.1 Marco metodológico para el desarrollo del ABM

Entre la gran variedad de herramientas y métodos analíticos utilizados en los estudios Socio-Hidrológicos, los ABM destacan por estar equipados para formalizar y simular las interacciones dinámicas entre los sistemas hídricos y la sociedad, ya que permiten representar toda la gama de actores del mundo real como agentes virtuales,

[68] La Programación Orientada a Objetos es un paradigma de programación basado en el concepto de objetos, los cuales comparten características al ser heredadas de una misma clase. Esto permite modelar las relaciones entre dichos objetos o entidades, a la vez que se reutilizan porciones de código.

heterogéneos, y autónomos que interactúan, aprenden y se adaptan (de forma independiente o como grupo), para producir trayectorias y resultados a nivel de sistema. En el caso de los sistemas de aguas subterráneas[69], este se puede utilizar para construir laboratorios o cuencas artificiales (ver Epstein y Axtell 1996), en las que se puede poner a prueba el comportamiento humano y la gobernanza institucional (leyes, regulaciones y políticas), sin el riesgo de cometer algún error en la contraparte real (i.e., el sistema real humano-aguas subterráneas).

A nivel académico, la investigación de sistemas hidrogeológicos con ABM se ha centrado principalmente en el rol de la agricultura y el suministro de agua. Dichos modelos se han utilizado como herramientas exploratorias para describir un sistema humano-subterráneo real o hipotético, formalizar y explicar los procesos e impulsores subyacentes, y posteriormente experimentar, probar y comparar los efectos de posibles intervenciones o cambios en el comportamiento humano sobre las dinámicas sociales e hidrogeológicas acopladas. Así, al variar los parámetros sociales, conductuales, de gestión, o hidrogeológicos, los estudios han buscado evaluar cualitativa o cuantitativamente las dinámicas que emergen a un nivel agregado (e.g., la sustentabilidad del acuífero). El objetivo exploratorio de estos modelos, por tanto, contrasta fuertemente con el uso tradicional de los modelos hidrogeológicos, es decir, el pronosticar los efectos de alguna acción futura o condición física, o el recrear condiciones pasadas (e.g., distribución de cargas hidráulicas o flujos) mediante la investigación de alternativas sobre un modelo calibrado.

A nivel de políticas públicas, la Modelación Basada en Agentes ha sido aplicada en diversos ámbitos con ambiciosos objetivos tales como regular el problema de evasión de impuestos (Vardavas et al., 2019), regular el consumo de tabaco (Wallace et al., 2015), diseñar medidas a nivel de viviendas para enfrentar el riesgo frente a inundaciones (Haer et al., 2017), y apoyar el proceso *ex-ante* para la evaluación de políticas públicas aplicando economía conductual (Castañeda & Guerrero, 2019), entre otros (para acceder a una revisión mas extensa ver Gilbert et al., 2018).

En términos prácticos, y adaptando la propuesta de Wallace et al., (2015), la implementación de un ABM requiere del desarrollo de los siguientes pasos:

1. **Definición del objetivo**: Los ABM pueden tener diferentes usos, y pueden ayudar a lograr distintos objetivos. Sin embargo, estos solo agregan conocimiento y valor cuando se enfocan y se adaptan a un propósito específico. Dicho propósito determina además las decisiones de diseño, la estructura del modelo, y los requerimientos de datos. En esta etapa, por tanto, se busca definir el objetivo o la(s) pregunta(s) de investigación que el modelo busca responder.

[69] Dentro de los sistemas hídricos, los sistemas de aguas subterráneas son el foco de atención en el caso de esta experiencia de implementación piloto de un ABM para la cuenca del Salar de Atacama.

2. **Alcances de la modelación incluida su conceptualización**: Dada la complejidad inherente en un sistema hídrico, es fundamental mantener la parsimonia del modelo, añadiendo características de manera iterativa e incremental. En términos prácticos, esto se traduce en identificar a los actores clave (en función del paso 1), y tomar la perspectiva de cada uno de estos para diseñar el sistema social.

3. **Especificación del modelo**: El diseño del modelo incluye la especificación de:

    a. **Agentes y sus propiedades (parámetros)**: Un agente se define como un sistema computacional que se sitúa y percibe su entorno, tiene objetivos definidos, y es capaz de llevar a cabo una acción flexible y autónoma para alcanzar estos objetivos (Jennings et al., 1998). En el contexto hídrico, un agente puede representar a los distintos usuarios del recurso hídrico (e.g., agrícola, doméstico, industrial, minero), así como a organizaciones (e.g., ONGs, empresas, organizaciones de usuarios y otros grupos de interés, etc.), y entidades gubernamentales asociadas con la gestión. En cuanto a las propiedades de estado de estos agentes (e.g., aspectos demográficos, conductuales, etc.), aunque se ha generado en la literatura una tipología funcional que permite identificar parámetros basales a considerar por tipo de agente (ver Kaiser et al., 2020), la inclusión de parámetros siempre debe responder al objetivo de la modelación (i.e., al punto 1).

    b. **Decisiones (acciones)**: El proceso de toma de decisiones de un agente puede descomponerse en 3 partes (Schlüter et al., 2017): (i) Lo que ingresa (i.e., percepción del estado del ambiente social y biofísico), (ii) lo que sale (i.e., la ejecución del comportamiento), y (iii) lo que sucede entre ambas partes (i.e., las reglas que llevan a la selección y ejecución del comportamiento, incluyendo el proceso de evaluación de la información recolectada y de selección de la opción de comportamiento). La elección de la teoría del comportamiento humano (para revisar teorías disponibles se dirige al lector a An, 2012; Groeneveld et al., 2017; Müller-Hansen et al., 2017) y de la arquitectura de software que permite implementarla (para revisar arquitectura disponibles se dirige al lector a Balke & Gilbert, 2014), al igual que el punto anterior, debe responder al objetivo de modelación.

4. **Implementación del modelo**: En este paso se traduce en código programable el modelo especificado. Es importante que al escribir dicho código se documente tanto el proceso de diseño, como los resultados obtenidos. Esto paso incluye además la verificación del modelo obtenido en términos de la evaluación de la precisión del código, de modo de asegurar que sea una representación justa del modelo conceptual. Para ello, se pueden utilizar, por ejemplo, análisis de sensibilidad y/o revisiones directas de las salidas del modelo.

5. **Calibración y validación**: La validación de un ABM se refiere a determinar que tanto el modelo conceptual como su implementación son representaciones adecuadas del sistema bajo estudio. Para lograrlo, se hace uso de métodos y procesos que

permiten escoger los valores de los parámetros de un modelo, lo cual se denomina a su vez calibración. Sin embargo, validar un ABM (y calibrarlo), es aún uno de los grandes desafíos no resueltos (An et al., 2020), dadas las fuertes limitaciones en cuanto a datos disponibles. Por ello, es usual encontrar trabajos que combinan las ventajas de múltiples métodos, como por ejemplo: análisis de sensibilidad (locales y/o globales), comparaciones de resultados con datos reales, Modelación Orientada a Patrones (Grimm, 2005), y validación mediante expertos.

6. **Diseño de experimentos y Análisis de Resultados**: Una vez que el modelo ha sido implementado, verificado, y validado (dentro de las limitaciones por datos disponibles), este puede ser utilizado para responder las preguntas de interés. Esta etapa, por tanto, se enfoca en el diseño de los experimentos que serán realizados sobre la "cuenca artificial" (i.e., el modelo). Cada experimento puede incluir un grupo de variables inciertas que se busca explorar, diversas políticas a ser puestas a prueba sobre el modelo, y una selección de métricas de interés que permitan sintetizar los resultados y comunicarlos de forma efectiva.

Para el caso de la implementación piloto de un Modelo en Base a Agentes para la cuenca del Salar de Atacama, se resuelven cada uno de los pasos anteriores con soluciones metodológicas que se presentan de manera sintética en la Tabla *III-35*, los cuales se explican con mayor detalle en las siguientes secciones.

Tabla III-35: Marco metodológico requerido para implementar el Modelo en Base a Agentes piloto para la cuenca del Salar de Atacama.

Etapa	Descripción
Definición del objetivo	El objetivo del ABM desarrollado es el de explorar posibles alternativas de gestión del recurso hídrico con un foco en la institucionalidad ambiental.
Alcances de la modelación incluida su conceptualización	Los alcances de la modelación se definen a partir de los resultados de los Talleres de Conceptualización y Validación
Especificación del modelo	El modelo incluye 2 tipos de agentes: operadores mineros (usuarios industriales del recurso hídrico) y una agencia reguladora (i.e., la Institucionalidad Ambiental). Las decisiones de estos agentes se conceptualizan mediante talleres.
Implementación del modelo	El ABM se implementa en NetLogo[70], usando como sistema

[70] https://ccl.northwestern.edu/netlogo/

Etapa	Descripción
	físico el componente de aguas subterráneas[71] de una versión simplificada de una cuenca endorreica, y como sistema social características seleccionadas de la institucionalidad ambiental y su aplicación en la cuenca del Salar de Atacama.
Calibración y Validación	La identificación y selección de los agentes a modelar, así como el diseño de sus decisiones (i.e., todo el sistema social), se obtiene mediante talleres realizado con expertos y representantes de diversos sectores públicos a nivel nacional y regional. Este enfoque participativo es el utilizado para validar y calibrar el modelo.
Diseño de experimentos y Análisis de Resultados	Se implementa una situación base representativa de la institucionalidad ambiental en la cuenca del Salar de Atacama. Sobre esta, se conceptualizan diversos escenarios alternativos de gobernanza. Se detalla además la información necesaria para poder incorporar otros actores y decisiones al modelo, a partir de la información recabada en los Talleres de Conceptualización y de Validación.

Fuente: Elaboración propia.

La secuencia de actividades necesarias para lograr generar la herramienta final o ABM (i.e., el modelo prototipo) se detalla en la Figura III-94.

[71] En principio también se puede implementar un sistema de aguas superficiales, pero en este prototipo de ABM se implementa solo el sistema de aguas subterráneas que se considera el más complejo y representativo de los desafíos de gestión en una cuenca como la del Salar de Atacama.



Figura III-94: Línea temporal detallando la secuencia de actividades necesarias para implementar el prototipo del Modelo en Base a Agentes.
Fuente: Elaboración propia.

Los Talleres de Conceptualización (realizados con (1) expertos y académicos, (2) representantes de los servicios públicos a nivel nacional, y (3) representantes de los servicios públicos a nivel regional) se enfocaron en conceptualizar el problema de gestión de los recursos hídricos en la cuenca del Salar de Atacama. Los resultados de estos talleres revelan cuales son los agentes clave en cada dimensión de interés de la cuenca, así como algunas de las decisiones clave que dichos actores toman. Los Talleres de Validación comienzan desde las decisiones de los agentes clave identificados en los Talleres de Conceptualización, ahondando en cada uno de estos agentes mediante árboles de decisión. Cabe destacar que se realizó un seguimiento de estos talleres de validación con los usuarios institucionales (i.e., Regulador Ambiental y DGA). La tercera actividad corresponde al desarrollo del Modelo Conceptual, resultado de esta experiencia piloto, el cual se formaliza traduciendo los árboles de decisión obtenidos de los Talleres de Validación en el lenguaje de programación NetLogo. Esto incluye tanto la codificación del sistema social como la implementación de un modelo hidrogeológico simplificado (i.e., sistema físico), orientado a representar una cuenca endorreica en la cual toman lugar extracciones de aguas subterráneas.

Se presenta a continuación una descripción con mayores detalles respecto de los objetivos, alcances, y la metodología utilizada para el desarrollo de los Talleres de Conceptualización, Talleres de Validación, y la construcción del ABM. Bajo la premisa que el resultado final de este proyecto es la implementación del ABM, se incluyen en estos acápites algunos resultados intermedios que se obtienen de los talleres (tanto de Conceptualización como de Validación), ya que esto es necesario para comprender la secuencia de actividades.

III.7.2.2 Talleres de Conceptualización

Durante marzo del año 2020 se realizaron 2 Talleres de Conceptualización, los cuales congregaron a expertos del mundo académico y representantes del sector público nacional respectivamente. Luego, durante mayo del mismo año, se realizó el tercer y último Taller de Conceptualización, el cual congregó a actores del sector público pertenecientes a la Región de Antofagasta.

El principal objetivo de estos 3 talleres fue el de conceptualizar el problema de gestión del recurso hídrico en la cuenca del Salar de Atacama, abarcando e incluyendo los distintos puntos de vista mantenidos por diversos actores y su conocimiento teórico y práctico sobre el sistema. Unificando dichas perspectivas, se genera una imagen enriquecida de las dinámicas que toman lugar en la cuenca, y que incluyen tanto a actores (con sus objetivos particulares) como las interacciones entre estos y con los recursos disponibles en la cuenca (e.g., recursos hídricos, salmuera, etc.). Luego, utilizando teoría de grafos y análisis exploratorio de redes, algunas de estas dinámicas son seleccionadas para ser conceptualizadas en los talleres de validación mediante árboles de decisión.

La metodología de base de estos talleres se fundamenta en el desarrollo de modelos mentales o cognitivos. Un modelo mental representa las creencias internas sostenidas por un individuo sobre el mundo externo (Johnson-Laird, 2010), es decir, describe sus constructos internos sobre el ambiente externo (Denzau & North, 1994) o su "sistema de creencias" (Axelrod, 1976). Por tanto, estos modelos sostienen y representan los procesos de toma de decisiones y los comportamientos de las personas (S. A. Gray et al., 2013). Además, y dado que pueden representarse mediante grafos (i.e., como un conjunto de nodos y las conexiones o relaciones entre ellos, incluida su magnitud y sentido), estos pueden ser agregados para representar el conocimiento compartido dentro de la comunidad o el llamado "mapa social cognitivo" (Özesmi & Özesmi, 2004).

Entre las metodologías participativas existentes en la literatura para capturar modelos mentales, e incorporar el conocimiento local y experto en la toma de decisiones, destaca el mapeo conceptual y semi-cuantitativo denominado *Fuzzy-Cognitive Mapping* (FCM) (Kosko, 1986). Esta técnica, basada en la teoría de grafos, es capaz de capturar de forma sistemática los modelos mentales de los participantes sobre un sistema dado mediante ejercicios grupales de modelación. En línea con ello, esta técnica ya ha sido utilizada en la literatura para la conceptualización participativa de Modelos en Base a Agentes de aguas subterráneas (Giabbanelli et al., 2017; Mehryar et al., 2019; Pope & Gimblett, 2015; Straton et al., 2009).

Para mejorar la representación del sistema social e institucional que se representará a través del ABM, los 3 Talleres de Conceptualización utilizaron la técnica de conceptualización FCM. Los talleres se centraron en torno a la representación de la gestión del recurso hídrico en la cuenca y sus matices en las diversas dimensiones interconectadas de este recurso (e.g., ambiental, sociocultural, económica). Para poder capturar esta amplia gama de dinámicas e interacciones que presenta el problema en cuestión, cada taller congregó a un grupo diverso, distinto, e interdisciplinario de actores (ver Tabla III-36).

Durante el primer taller participaron un total de 25 expertos del mundo académico, distribuidos en 6 equipos de trabajo (i.e., 4 personas por equipo en promedio), los cuales fueron formados agrupando las disciplinas científicas de los participantes en dos grandes grupos: (1) Ciencias Ambientales, Ecología y Ciclo Hidrológico, (2) Ciencias Sociales, Minería, y Economía. Durante el segundo taller, participaron un total de 26 representantes del sector público nacional, distribuidos en 5 equipos de trabajo (i.e. 5 personas por equipo en promedio), los cuales fueron formados agrupando a los participantes según su área de expertise y rol en sus respectivas agencias gubernamentales de trabajo, siguiendo la misma clasificación de grupos utilizada en el primer taller. Durante el tercer taller, participaron un total de 21 representantes del sector público regional de Antofagasta, distribuidos en 5 equipos de trabajo (i.e., 4 personas por equipo en promedio), los cuales fueron formados agrupando equitativamente representantes de ambos grandes grupos antes mencionados (e.g., un grupo de 4 participantes estaría formado por 2 expertos en Ciencias Ambientales, Ecología y Ciclo Hidrológico, y 2 expertos en Ciencias Sociales, Minería, y Economía). Cabe destacar que cada equipo de trabajo de cada taller estuvo liderado además por un "Moderador" y un "Coordinador", ambos pertenecientes al equipo de investigadores del proyecto.

Tabla III-36: Síntesis participantes de cada Taller de Conceptualización.

Taller	Equipo de Trabajo	Clasificación[1]	Número de participantes
1 - Expertos	1	A	5
	2	A	4
	3	A	3
	4	B	4
	5	B	4
	6	B	5
2 – Sector Público Nacional	1	A	6
	2	A	3
	3	A	6
	4	B	6
	5	B	5
3 – Sector Público Regional	1	A y B	4
	2	A y B	6
	3	A y B	4
	4	A y B	3
	5	A y B	4

Nota: A. Ciencias Ambientales, Ecología y Ciclo Hidrológico; B. Ciencias Sociales, Minería, y Economía. Fuente: Elaboración propia.

Detalles respecto a la estructura interna de los talleres (i.e., las etapas de los talleres), y el post-procesamiento realizado sobre los resultados (e.g., limpieza de datos), se presenta en el Anexo 5 de la Etapa III. A continuación, se presenta la metodología seguida para analizar los grafos que resultan de estos talleres.

Dada la vasta riqueza de información contenida en un grafo, y en la amplia disponibilidad de métricas en la literatura, se decidió estructurar el análisis de estos en 2 partes secuenciales, las cuales a su vez llevan a un total de 4 escalas de análisis complementarias entre sí. En la primera parte, se analizaron los resultados directamente obtenidos del post-procesamiento, aplicando 3 (del total de 4) escalas de análisis (ver Figura III-95). En la segunda parte, se crea un nuevo grafo a partir de la unión de todos los grafos obtenidos en los Talleres de Conceptualización. Sobre dicho grafo agregado, se aplica la última escala de análisis denominada "análisis exploratorio de grafos", la cual se orienta a dilucidar las

dinámicas que toman lugar en la cuenca y que involucran a agentes clave y su accionar sobre el sistema (ver Figura III-96). En los análisis de grafos se distinguen 3 tipos de nodos: (1) Actores, Objetos de Valoración u ODV, y Variables. Los actores son representativos de las distintas partes interesadas en la cuenca (e.g., reguladores, o usuarios del recurso hídrico). Los ODV corresponden a variables ambientales, sociales, culturales, técnico-económicas, de ordenamiento territorial o medio construido, entre otros aspectos de distinta naturaleza, que se consideran particularmente especiales por su valor biológico, social, económico, cultural y/o productivo (entre otros), y que pueden o no tener un nivel de protección o tutela por parte del Estado. Los ODV se basan en el concepto de altos valores de conservación (Brown et al., 2013), los cuales son utilizados en diferentes estándares de certificación (especialmente, silvicultura y agricultura) y, en general, para el uso de recursos y la planificación de su conservación. El concepto de ODV ha sido utilizado previamente en el diseño de política pública para definir el emplazamiento de proyectos de generación hidroeléctrica[72] y de franjas de transmisión eléctrica[73]. Por lo tanto, el concepto de ODV se utiliza para representar aquellos elementos que es imprescindible proteger o mejorar en la cuenca, ya sea en términos de objetivos, o aspiraciones finales de interés. Por último, las Variables agrupan todos aquellos conceptos que permitan conectar nodos tipo Actores con nodos tipo ODV. En concreto, los análisis de estos grafos de manera independiente y agregada permiten, de forma sinérgica y coherente, condensar la información requerida para el ABM, abordando la complejidad en la gestión de los recursos hídricos en la cuenca.

[72] http://www.minenergia.cl/geo/Guias/Guia_PER_WEB_2015.pdf

[73] http://www.minenergia.cl/archivos_bajar/consulta_ciudadana/2018/07/guia_franjas.pdf

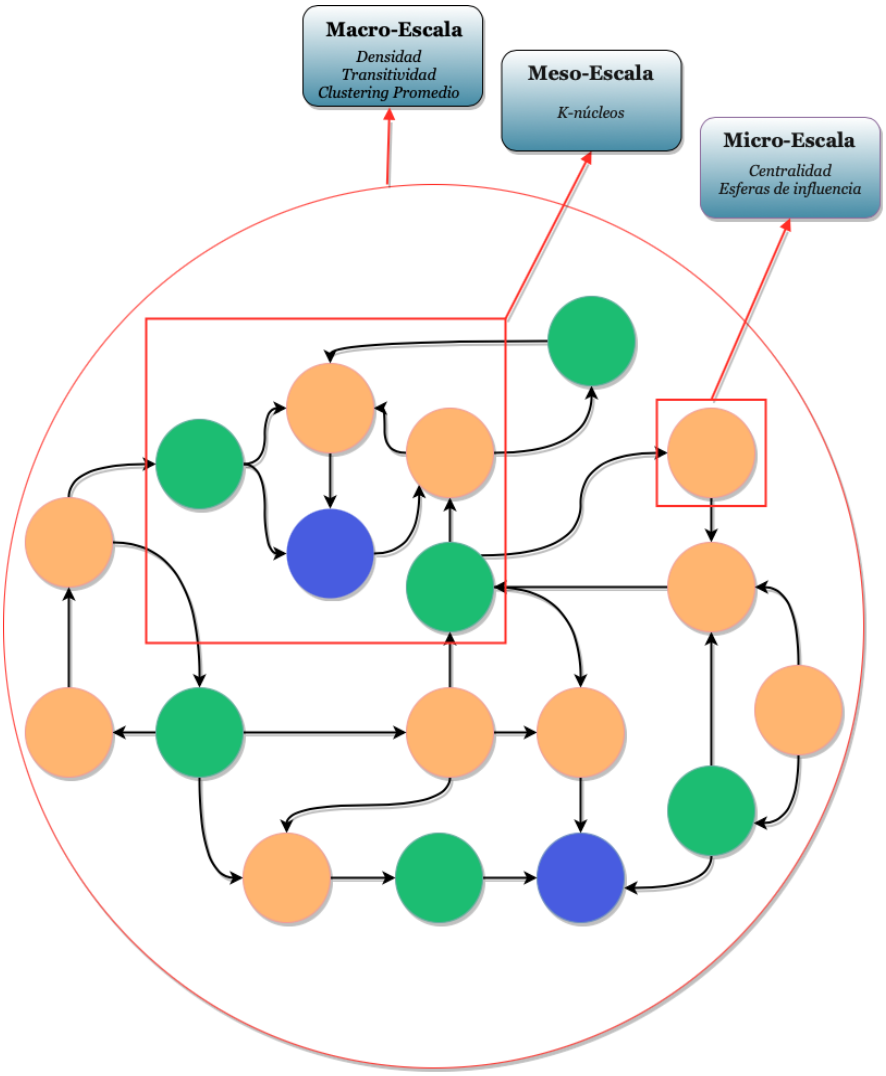


Figura III-95: Escalas de análisis aplicadas a los modelos mentales generados durante los Talleres de Conceptualización.
Nota: En verde actores, en naranja variables, y en azul Objetos de Valoración (ODV). Las flechas en negro muestran relaciones entre conceptos. En rojo se demarcan las escalas de análisis.
Fuente: Elaboración propia.

- **Análisis a Macro-Escala**

Esta escala toma como unidad de análisis un grafo, buscando caracterizar, describir, clasificar, y comparar un grupo de grafos mediante medidas estructurales cuantitativas. Las dos métricas escogidas para ello son las siguientes. Primero, **la densidad**, métrica que mide la fracción de conexiones existentes sobre el total posible que pudiese existir en un grafo. Este índice toma valores desde 0 (para una red sin conexiones) a 1 (para una red completamente conectada). Dado que muchas de estas conexiones pueden ser redundantes (i.e., de removerse del grafo, sigue habiendo un camino entre los nodos), es conveniente medir también la **formación de triángulos o tríadas** (i.e., configuración mutuamente conectada entre un nodo, su adyacente, y el adyacente de este último). Una forma de medirla es a través de la **transitividad**, índice que busca cuantificar el grado de

interconexión entre nodos adyacentes midiendo la fracción de tríadas existentes sobre el total posible que pudiese contener un grafo dado. Esta métrica toma valores desde 0 (para una red sin tríadas) a 1.

A modo de ejemplo, al comprar todos los grafos realizados en los talleres, aquellos con mayor densidad y transitividad presentan un mayor nivel de complejidad en términos de las interacciones entre los conceptos explicitados en ellos.

- **Análisis a Meso-Escala**

Esta escala toma como unidad de análisis los sub-grafos[74] existentes en cada red (ver por ejemplo el sub-grafo constituido por los nodos encerrados en el cuadro rojo en la Figura III-95 y sus respectivas conexiones), y hace uso del índice denominado **grado de centralidad**. Esta métrica cuantifica la importancia de un nodo en un grafo (o sub-grafo) a partir de la cantidad de nodos adyacentes a él (i.e., vecinos). Así, de entre la multitud de sub-grafos existentes en un grafo, es posible identificar aquellos que representan las zonas más densas (denominadas núcleos), los cuales tienen un rol central en el funcionamiento de la red. Para ello, se aplica el **algoritmo *K-core*** (Batagelj et al., 1999), el cual remueve iterativamente aquellos nodos (y sus conexiones) cuya centralidad es menor a un valor especificado como límite. El resultado de este proceso corresponde al sub-grafo o núcleo cuyo valor *K* corresponde al utilizado en el algoritmo. Entre los posibles núcleos, el más relevante corresponde al de mayor valor de centralidad, conocido como el núcleo principal del grafo.

A modo de ejemplo, para un grafo dado, su núcleo principal entrega información del tema o los temas centrales tratados por el equipo que los realizó, al mostrar únicamente los nodos más conectados y sus conexiones.

- **Análisis a Micro-Escala**

Esta escala toma como unidad de análisis **un nodo** (i.e., sus características), y se centra en identificar aquellos nodos que son estructuralmente más importantes en el grafo. Para cuantificar esta importancia, se utiliza nuevamente la métrica **grado de centralidad**, la cual se basa en contar el número de conexiones que tiene cada nodo (i.e., número de vecinos). Este "análisis de importancia" a micro-escala se realiza primero para los nodos tipo ODV, y luego para los nodos tipo Actores. En el primer caso, al identificar a los principales ODV es posible comprender cuales son los principales objetivos o métricas de interés en la cuenca, así como que los determina de manera directa. Por otro lado, al identificar a los principales actores, es posible tomar su perspectiva para comenzar a comprender su función, interacciones, y relaciones en la cuenca. Para lograr esto, luego de identificados los nodos centrales, se obtienen sus redes egocéntricas (o esferas de influencia).

Una red egocéntrica corresponde al sub-grafo que se obtiene al seleccionar un nodo

[74] Se entiende como sub-grafo al grupo de nodos conectados entre sí que pertenecen a dicho grafo.

cualquiera, y considerar todas sus conexiones inmediatas (de entrada o salida). La Figura III-96, a modo de ejemplo, muestra como de un grafo original (en azul oscuro) puede calcularse una red egocéntrica para un nodo tipo ODV (en azul) o actor (en verde), al considerar solo los nodos que quedan encerrados en los rectángulos respectivos, así como las conexiones entre estos.

A modo de ejemplo, el nodo del tipo ODV más importante por grafo, entrega información sobre aquel objetivo de interés más importante para el equipo que lo realizó.

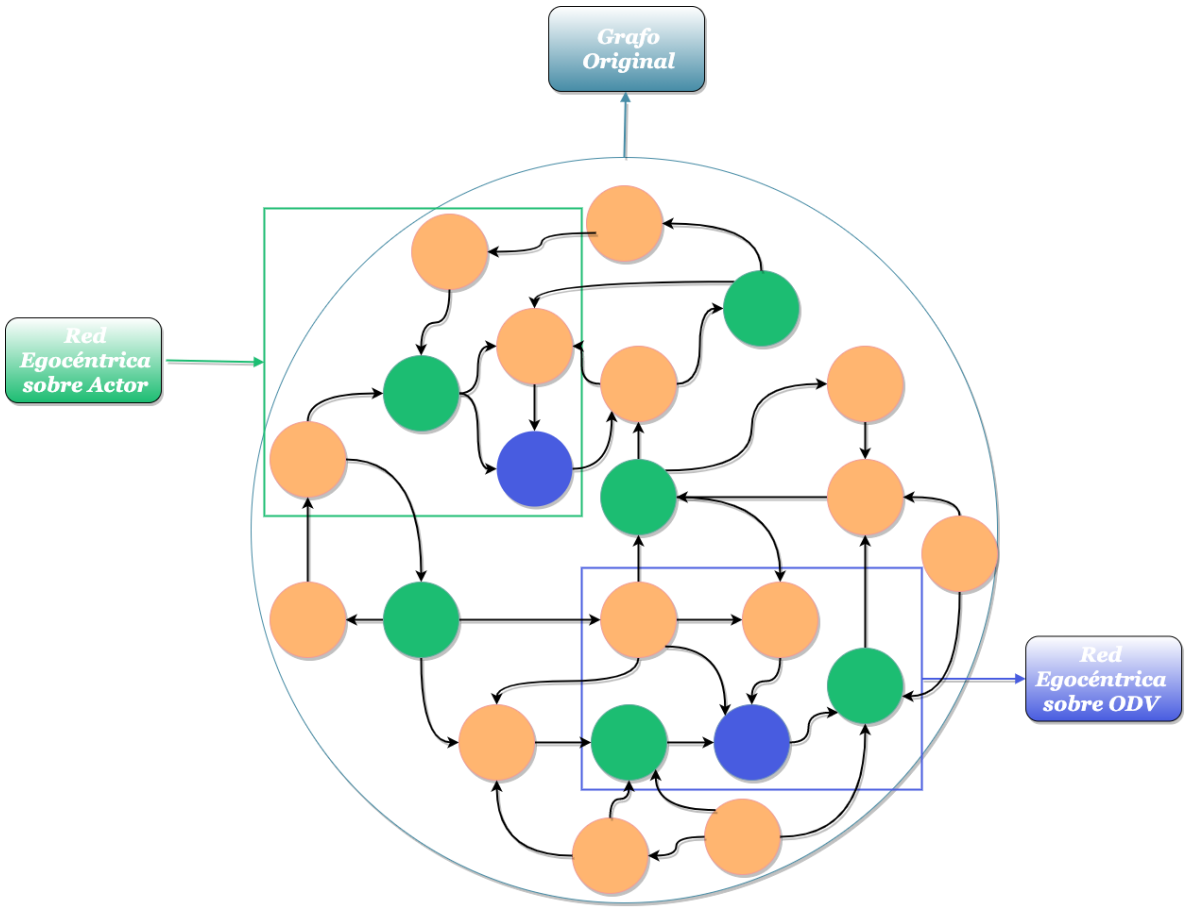


Figura III-96: Ejemplo conceptual para la creación de una red egocéntrica sobre un nodo tipo ODV o Actor, en base a un grafo original cualquiera.
Fuente: Elaboración propia.

- **Análisis Exploratorio de Redes**

Las 3 escalas de análisis antes presentadas se aplican directamente sobre los grafos obtenidos desde los Talleres de Conceptualización. En esta escala, sin embargo, el objeto de estudio corresponde a una nueva red creada a partir de la unión de todos los grafos obtenidos durante los talleres, es decir, mediante la combinación directa de sus nodos y ejes (ver Figura III-97). Este nuevo grafo, entrega una imagen enriquecida y comprehensiva en cuanto a la gestión del recurso hídrico en la cuenca. Por ello, se procede a analizarla siguiendo un formato similar a la metodología de micro-escala. En concreto, se siguen los

siguientes pasos consecutivos:

1. Selección de una dimensión de interés[75].
2. Determinar el principal ODV de la dimensión (medido a partir del índice Grado de Centralidad), y obtener su red egocéntrica.
3. Determinar el principal actor involucrado en el ODV identificado en el Paso 2, y obtener su red egocéntrica.
4. Determinar las decisiones que toma el agente en pos del ODV.

[75] Se consideran las dimensiones (1) Socio-Cultural, (2) Economía, (3) Ambiental, y (4) Recursos Hídricos.

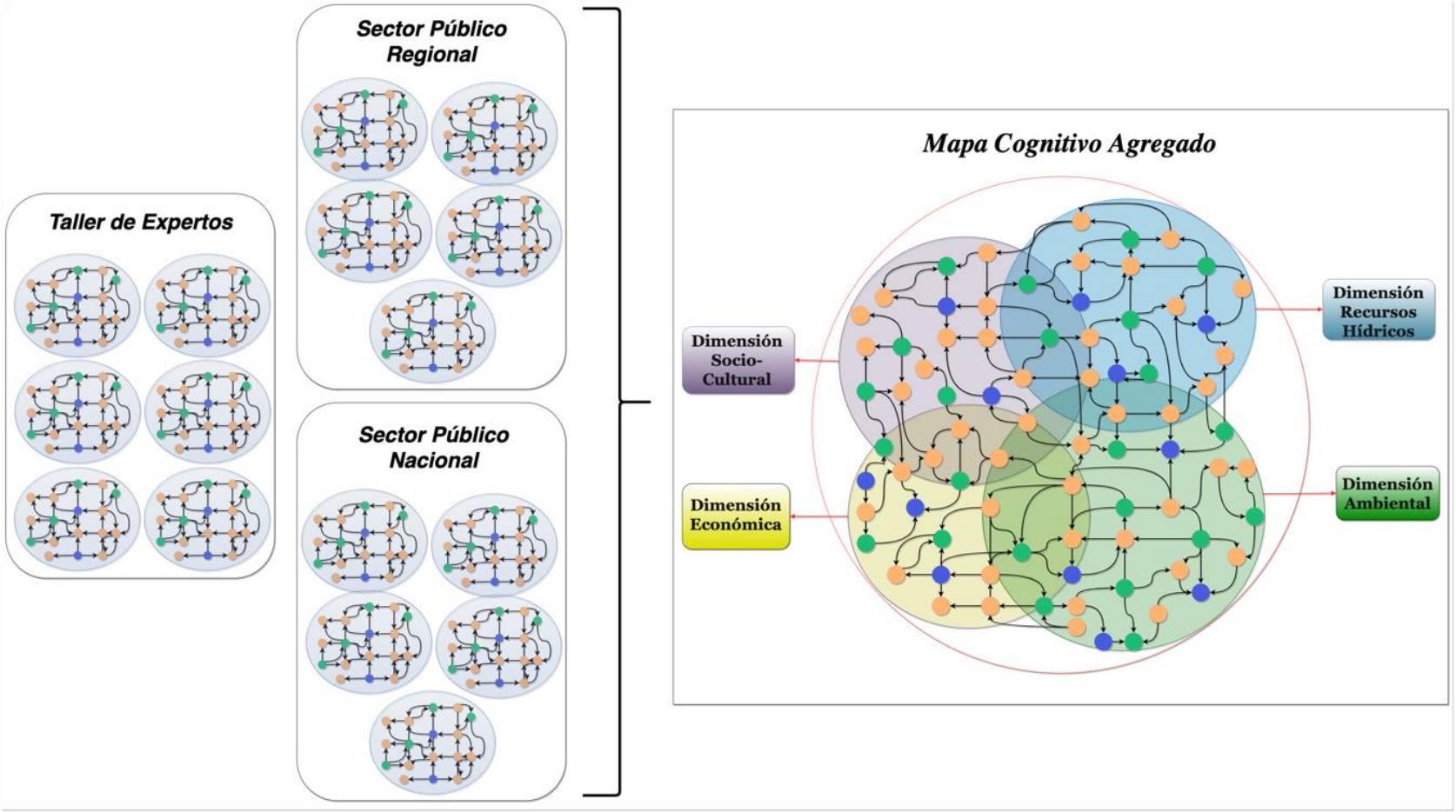


Figura III-97: Conceptualización de la unión de mapas cognitivos y del Análisis Exploratorio de Redes.
Fuente: Elaboración propia.

Cada una de las escalas de trabajo utilizadas entrega una mirada distinta para analizar los grafos generados durante los Talleres de Conceptualización. Dado que cada escala tiene su propio propósito, con resultados y análisis que van más allá de su contribución al ABM (e.g., aportar al proceso participativo y al desarrollo del proyecto), a continuación, se resumen aquellos que finalmente fueron transferidos para ser usados directamente en los Talleres de Validación (ver acápite III.7.2.3). Cabe destacar que el detalle del resto de los resultados se presenta en extenso en el Anexo 6 de la Etapa III.

En síntesis, los resultados de los Talleres de Conceptualización permitieron identificar los ODV más importantes (i.e., centrales) sobre cada una de las cuatro dimensiones de la cuenca, y, a su vez, como estos se ven afectados por los comportamientos de diversos actores. En particular, se identificó también a los actores más relevantes para cada uno de estos ODV, junto a algunos de los procesos claves de toma de decisiones. Toda esta información se resume en la Tabla III-37.

Tabla III-37: Síntesis por dimensión y principal ODV asociado, de los principales actores y sus procesos de toma de decisión identificado.

Dimensión	ODV	Agente	Decisiones
Recursos Hídricos	*Preservar los Recursos Hídricos*	*DGA*	*Asignación de derechos de aprovechamiento de aguas*
			Normas y fiscalización del uso de derechos de aprovechamiento de aguas
			Monitoreo y vigilancia del uso de derechos de aprovechamiento de aguas
Ambiental	*Conservar la Biodiversidad*	*Institucionalidad Ambiental*	*Proceso Fiscalizador y Sancionatorio*
			Diseño y aprobación de Resoluciones de Calificación Ambiental
			Monitoreo de variables ambientales y del ciclo hidrológico
Sociocultural	*Preservar-Mejorar Calidad de Vida*	*Comunidades Indígenas*	*Uso de recursos hídricos para actividad agrícola*
			Denuncias ambientales
			Monitoreo de variables ambientales y del ciclo hidrológico
Económica	*Desarrollar la Actividad Minera*	*Operadores Mineros*	*Uso de recursos hídricos y salmuera para producción minera*
			Establecimiento de acuerdos de colaboración
			Monitoreo de variables ambientales y del ciclo hidrológico

Fuente: Elaboración propia.

III.7.2.3 Talleres de Validación

Durante enero del año 2021 se realizó el Taller de Validación, el cual congregó a expertos del mundo académico y representantes del sector público nacional, quienes habían participado previamente de los Talleres de Conceptualización (ver Acápite III.7.2.2). El principal objetivo de este taller fue el de conceptualizar algunos de los comportamientos seleccionados a partir de los resultados de los Talleres de Conceptualización mediante árboles de decisión. Dichos árboles explican los comportamientos en términos de secuencias de patrones causales, que incluyen al sistema hidrológico, hidrogeológico, y social. En el caso del trabajo con el grupo denominado Institucionalidad Ambiental (foco principal de este ejercicio) y con la DGA, se realizó además un taller de seguimiento en marzo del año 2021 para completar el trabajo de validación.

La metodología de los Talleres de Validación consistió en una serie de etapas secuenciales (ver detalles en Anexo 7 de la Etapa III) orientadas a la generación de un árbol de decisión para una de las decisiones que se definieron para cada agente, de acuerdo con los resultados de los Talleres de Conceptualización (ver síntesis en la Tabla III-36). Cabe notar que la decisión escogida para ser conceptualizada en los talleres fue acordada por el equipo de investigación, dada su importancia.

De modo de contar con la mayor precisión posible en la construcción de cada árbol de decisión, los participantes fueron seleccionados (y agrupados) en base a su nivel de conocimiento sobre la operación de cada agente en particular. Para el agente Institucionalidad Ambiental se contó con 11 participantes, representantes del MMA, SMA, CONAF, y diversas universidades y centros de investigación. Para el agente DGA se contó con 4 representantes de dicha institución tanto a nivel central (nacional) como regional. En cuanto a los agentes que se asocian directamente a la extracción de los recursos hídricos (empresas mineras y comunidades indígenas), a pesar de que no se incluyó la participación de las contrapartes directas de estos agentes (i.e., comuneros o personal pertenecientes a las faenas mineras), se incluyó una representación indirecta mediante representantes académicos y del sector público, lo que permite desarrollar una visión inicial de estos procesos de toma de decisión para efectos del diseño del piloto.

Considerando el foco definido para la construcción del prototipo de ABM, se entrega a continuación la información resultante del post-procesamiento del Taller de Validación del agente Institucionalidad Ambiental. Los resultados provisorios de los agentes DGA, Comunidades Indígenas y Operadores Mineros se presentan en el Anexo 8 de la Etapa III. Antes de proceder a analizar los resultados, es importante tener en consideración que los árboles de decisión no buscan hacer una representación exhaustiva de los procesos bajo estudio, así como un modelo tampoco busca ser una representación exacta de la realidad (escenario en el cual ya no tendría utilidad alguna dada la complejidad inherente en los procesos simulados). Sino que buscan capturar, en base a la experiencia colectiva de un conjunto de expertos en el asunto, cuáles son los factores y las dinámicas clave en el proceso, así como las grandes brechas y oportunidades de adaptación.

La Figura III-98 presenta el árbol de decisiones que sintetiza el proceso de fiscalización que

realiza la Institucionalidad Ambiental en la cuenca, y del cual participan íntegramente otros organismos sectoriales. Dicho proceso, como se puede observar, ocurre por 3 vías independientes: (1) Programas anuales (i.e., en base al Ciclo de Programación de la Superintendencia del Medio Ambiente, que detalla las actividades de fiscalización, los presupuestos sectoriales, y los indicadores de desempeño a emplear), (2) Oficios (e.g., fiscalizaciones activadas por notificaciones de traspaso de umbrales del Plan de Alerta Temprana (PAT)), o (3) Denuncias Ambientales (e.g., denuncias generadas por la ciudadanía, por otros organismos sectoriales, o incluso por titulares de las RCA).

El proceso fiscalizador está intrínsecamente ligado a los otros 2 procesos de decisión identificados como prioritarios para este agente: (1) el proceso de formulación y evaluación de RCA, y (2) el proceso de monitoreo. El primero tiene como resultado la aprobación e implementación de proyectos extractivos en la cuenca, incluyendo Planes de Seguimiento Ambiental que determinan las características y el funcionamiento del segundo. Cabe destacar que todos estos procesos de decisión involucran a otros agentes.

Siguiendo con la esquemática presentada, el proceso fiscalizador se centra luego en las variables comprometidas en las RCA. Las condiciones que aseguran el cumplimiento normativo ambiental asociado a estas variables se especifican en los respectivos Planes de Alerta Temprana (PAT). A modo de ejemplo, los participantes identifican el traspaso de umbrales definidos sobre ciertos indicadores de estado como el desencadenante de un posible Proceso Sancionatorio por parte de la SMA, y que puede llevar luego a un Plan de Cumplimiento (el cual establece los procedimientos a seguir por el titular para retornar a un estado de cumplimiento). Además, en caso de existir efectos no previstos sobre las variables comprometidas, cada RCA cuenta con procedimientos específicos para su tratamiento (e.g., la herramienta de verificación del efecto sinérgico, o la medición de contribución de efectos entre proyectos sobre objetos de protección).

Por otro lado, la ocurrencia de efectos sobre variables no comprometidas en la normativa ambiental (i.e., efectos no previstos), puede llevar a generar una denuncia ambiental, lo cual podría desencadenar una investigación centrada en dilucidar las responsabilidades de los titulares de RCA (i.e., con sus operaciones) sobre el efecto generado.

Las dinámicas definidas en este árbol de decisión son implementadas en la representación del Sistema Social del ABM cuya metodología de construcción se explica en el siguiente acápite.

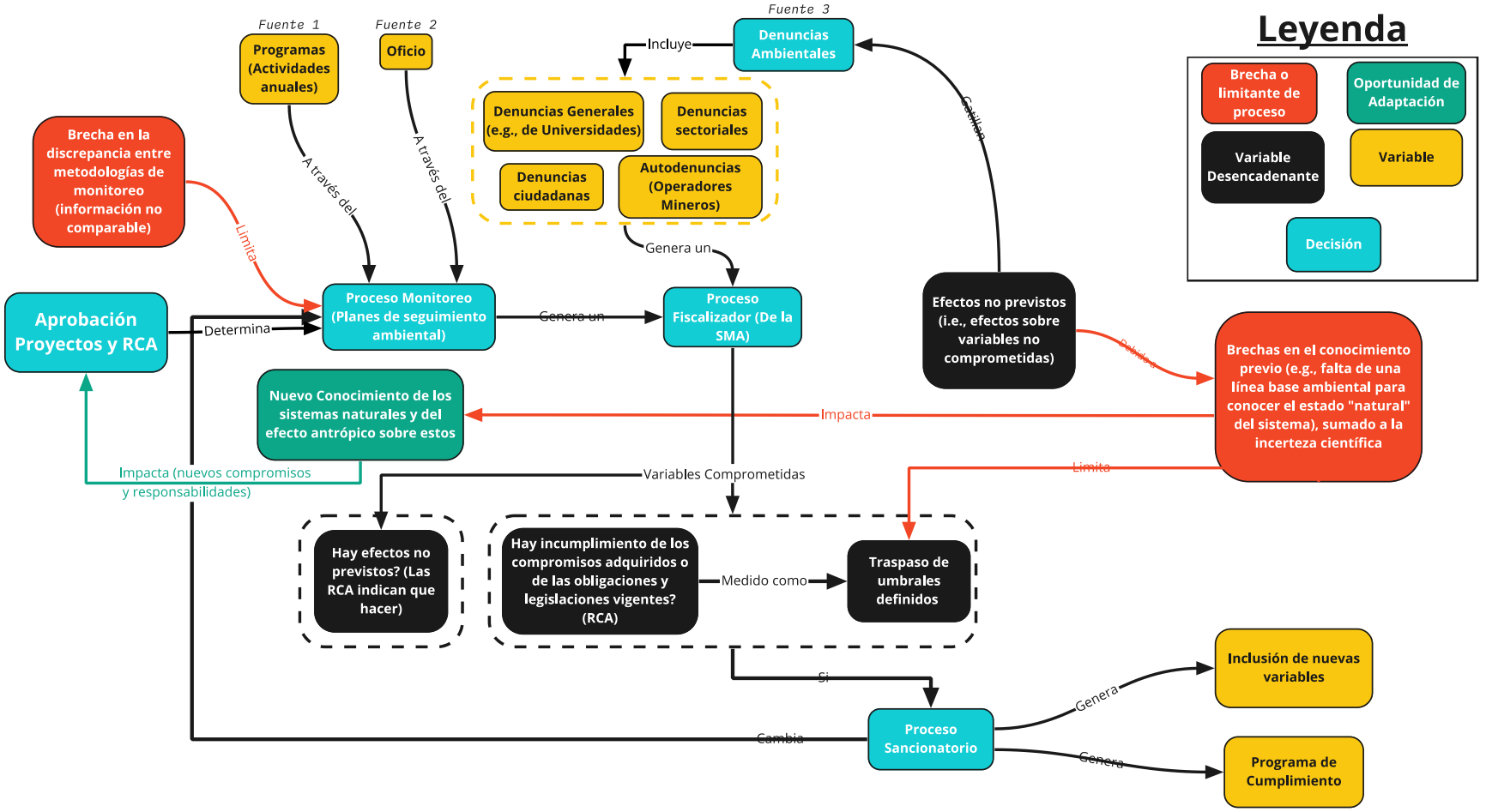


Figura III-98: Árbol de decisiones para el Agente Institucionalidad Ambiental.
Nota: Brechas, oportunidades de adaptación, variables, desencadenantes, y decisiones en cuadros rojos, verde oscuro, naranjas, negros y celestes respectivamente.
Fuente: Elaboración propia.

III.7.2.4 Construcción de ABM prototipo

En este acápite se presenta y detalla la generación e implementación en código programable del Sistema Físico (i.e., hidrogeológico) del ABM, el cual fue escrito en el lenguaje de programación para Modelos en Base a Agentes NetLogo. Dicho Sistema Físico simula el flujo de aguas subterráneas de una cuenca endorreica cualquiera, y aproxima lo que ocurre en la cuenca del Salar de Atacama a nivel hidrogeológico, ya que no está calibrado, validado, ni representa algunas particularidades que ocurren en la cuenca (e.g., la interfaz salina). Este Sistema Físico, sin embargo, responde a un único objetivo, que es poder contar con una plataforma integrada en NetLogo para implementar y explorar el Sistema Social del ABM. Dicho Sistema Social corresponde al principal resultado de este trabajo, y será discutido en extenso en el acápite III.7.3. En esta sección, por lo tanto, se presentará la descripción, implementación y verificación del Sistema Físico del ABM.

III.7.2.4.1 Implementación sistema físico

Para implementar el sistema físico, se toma de base la herramienta de modelación FlowLogo (J.C. Castilla-Rho et al., 2015; Juan Carlos Castilla-Rho, 2017; Juan Carlos Castilla-Rho et al., 2017). FlowLogo corresponde a una implementación de las ecuaciones de flujo de aguas subterráneas en el lenguaje de programación NetLogo. En su versión actual, provee de un simulador de flujo de aguas subterráneas con múltiples procedimientos predefinidos que ensamblan automáticamente el sistema de ecuaciones que representan condiciones de contorno y diversas tensiones sobre el sistema, tales como: pozos, manantiales, desagües, ríos, contornos de carga o flujo fijo, evapotranspiración (constante o a tasa dependiente de la carga), y recargas laterales o areales. Además, al estar escrito en NetLogo, es fácilmente editable, en particular siguiendo arquitecturas Orientadas a Objetos que permitirían representar y simular procesos físicos más complejos.

Dado que el objetivo del modelo es poder simular dinámicas sociales sobre un sistema físico simplificado, todos los componentes, parámetros, y variables simuladas en dicho sistema no son representativos de la cuenca del Salar de Atacama. Mas bien, describen la dinámica hidrogeológica general de una cuenca endorreica con la presencia de un solo acuífero no confinado. La Figura III-99 esquematiza la representación física mencionada.

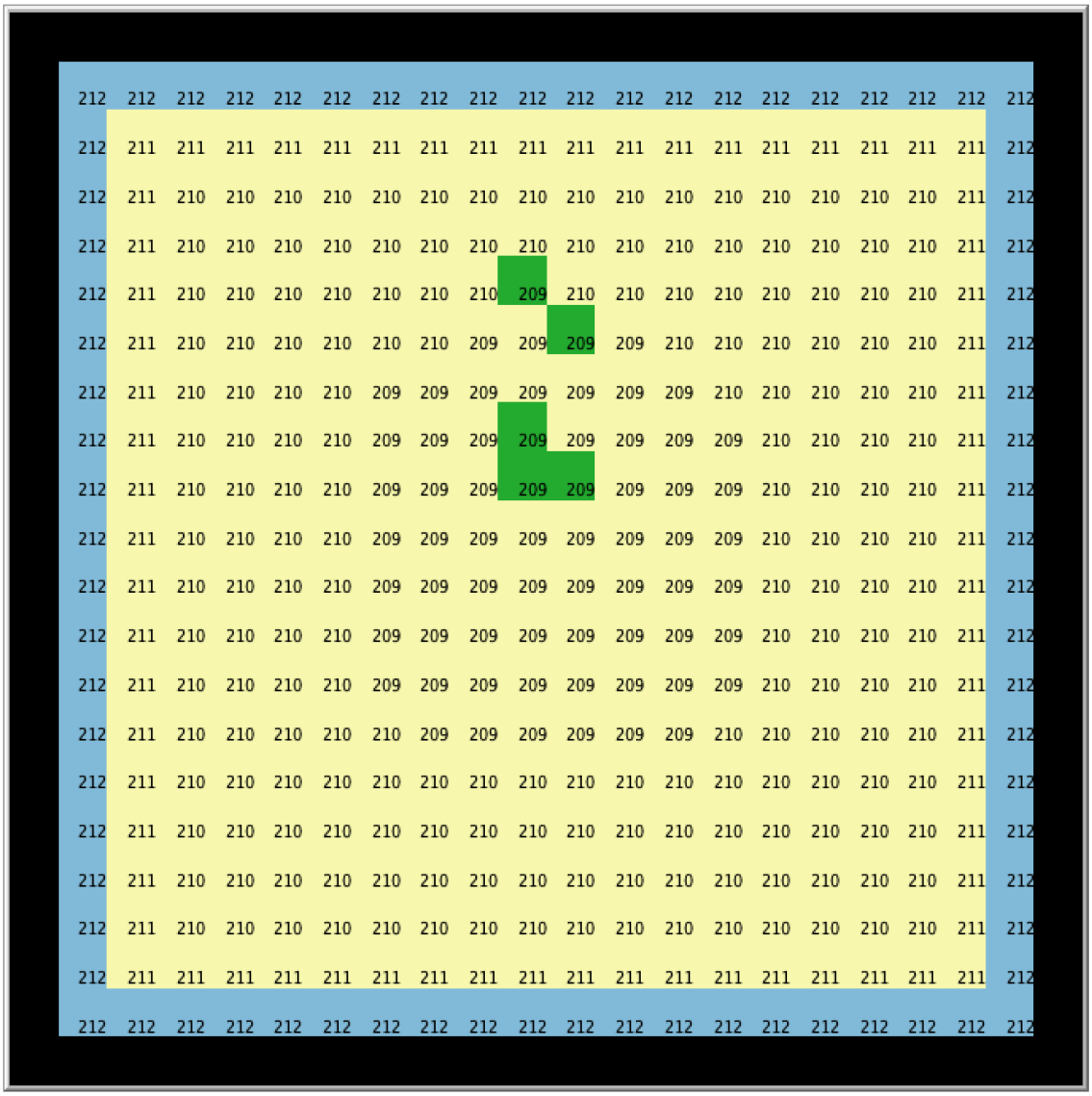


Figura III-99: Sistema Físico simulado en la Interfaz de FlowLogo.
Nota: En negro las celdas inactivas (i.e., no flujo), en celeste las celdas con recarga superficial (simulada como inyecciones), en verde los drenes, y en amarillo las celdas con evapotranspiración activa (notar que las celdas con recarga y con drenes también tienen evapotranspiración). Los números muestran el nivel piezométrico en cada celda.
Fuente: Elaboración propia.

El sistema físico implementado en NetLogo se visualiza como una grilla en dos dimensiones (20 x 20 celdas cuadradas con resolución de 100 metros x 100 metros), sobre las cuales se distinguen celdas activas e inactivas (e.g., ver aquellas sombreadas en negro en la Figura III-99). Dentro del espacio denotado por la primera categoría (i.e., celdas activas), se simulan diversos procesos físicos, los cuales incluyen: (1) Evapotranspiración, (2) Recargas superficiales, y (3) Lagunas. Todos estos ocurren sobre un único acuífero no confinado (i.e., sin distinción entre salmuera y agua fresca), con un espesor saturado (15 metros), conductividad hidráulica (2 metros al día), coeficiente de almacenamiento específico

(0.02), y distribución del nivel piezométrico inicial (210 metros), todos homogéneos sobre la grilla de modelación. Además, la simulación considera condiciones transientes con un paso temporal diario.

El sistema físico implementado en FlowLogo es capaz de representar tanto un escenario sin explotación antrópica (i.e., situación base), como aquel con explotación productiva del acuífero. En esta sección solo se detalla el primero de estos, relegando el segundo (i.e., el proceso de extracción de agua del acuífero) a la descripción del sistema social. A continuación, se grafican indicadores clave que permiten verificar el funcionamiento hidrogeológico esperado de la implementación de FlowLogo. Es importante recordar que todo el sistema físico representado aquí de forma simplificada para una cuenca cualquiera será luego reemplazado por el modelo hídrico integrado.

La situación base consiste en aquella en que no existen extracciones de agua desde el acuífero por usuarios u operadores. Este escenario describe una situación de línea base ambiental de la cuenca. Al no existir componentes extractivos, solo los procesos hidrogeológicos simulados interactúan entre sí para determinar el flujo de agua subterránea y, por tanto, los niveles piezométricos del acuífero. En particular, esto implica una simulación de los siguientes tres procesos.

III.7.2.4.1.1 Evapotranspiración

Este proceso se encuentra presente en toda el área activa del modelo, y se conceptualiza como un flujo de descarga del acuífero a una tasa que varía acorde con el nivel piezométrico de cada celda. Así, mientras más cercano se encuentre el nivel de la cota del terreno, mayor será la evapotranspiración. Si el nivel piezométrico desciende bajo una cota de extinción definida para la celda, la evapotranspiración se desactiva. Dado que este proceso suele seguir un comportamiento oscilatorio, se incluye un factor ponderador creado a partir de una función seno con período anual (ver Figura III-100). Con ello, se logra una oscilación anual del flujo por evapotranspiración, tal y como se observa en la Figura III-101.

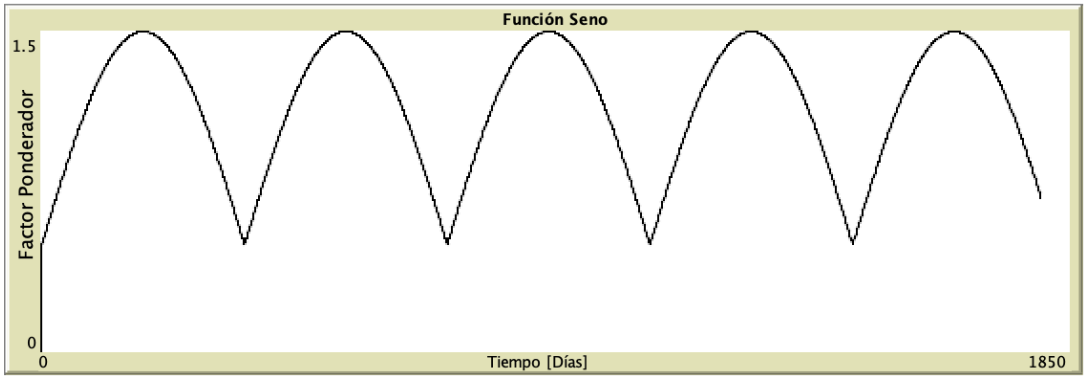


Figura III-100: Variación estacional del factor ponderador de la evapotranspiración, considerando una simulación de aproximadamente 5 años en FlowLogo.
Fuente: Elaboración propia.

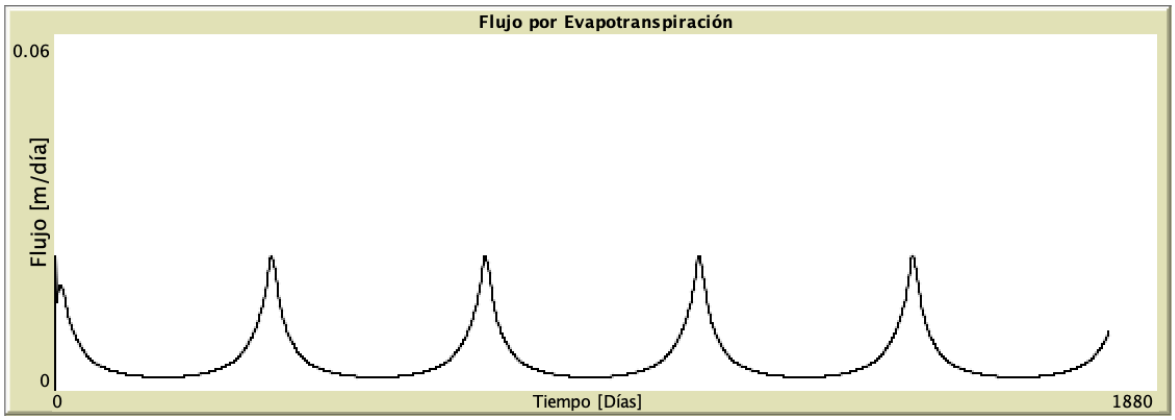


Figura III-101: Flujo por Evapotranspiración de una celda activa cualquiera del modelo, considerando una simulación de aproximadamente 5 años en FlowLogo

Fuente: Elaboración propia.

III.7.2.4.1.2 Recarga Superficial

Una de las principales entradas de agua al sistema físico simulado en FlowLogo, siguiendo la dinámica esperada en cuencas endorreicas, corresponde al flujo superficial que proviene desde las zonas altas de la cuenca (e.g., las recargas superficiales y laterales desde ríos, quebradas, y vertientes hacia el núcleo salino). Dicha recarga se conceptualiza a partir de pozos de inyección ubicados en todo el borde de modelo (ver Figura III-99) y que aportan agua al acuífero a una tasa constante (ver Figura III-102).

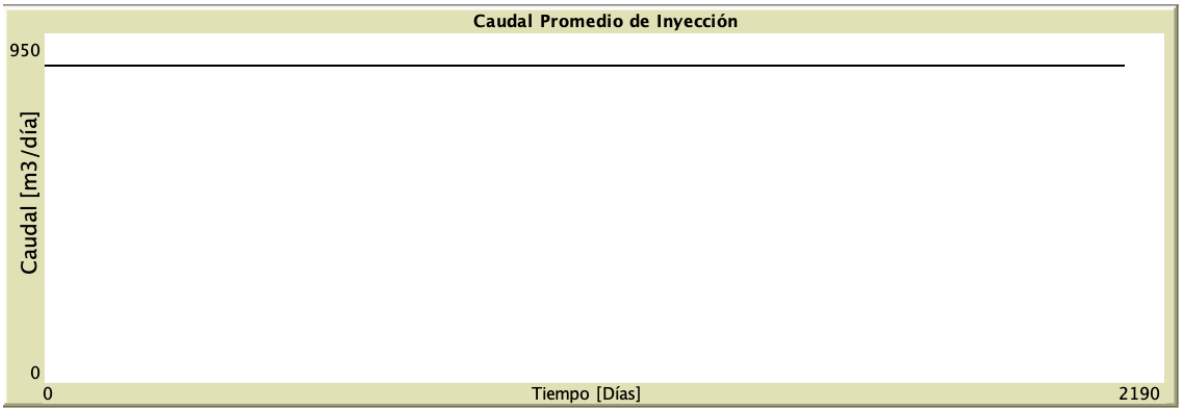


Figura III-102: Caudal promedio de inyección por aportes de escorrentía superficial sobre los bordes de la cuenca, considerando una simulación de aproximadamente 6 años en FlowLogo.

Fuente: Elaboración propia.

III.7.2.4.1.3 Drenes

La representación de afloramientos (como lagunas y humedales) en el sistema físico se realiza mediante drenes, es decir, celdas que solamente remueven agua del acuífero. Este proceso se conceptualiza a partir de un umbral fijo que se define para la celda (i.e., la elevación del dren), sobre el cual se activa el dren (en función del nivel piezométrico). El caudal extraído resultante se obtiene a partir de la conductancia configurada para la

celda, ponderada por la diferencia de niveles entre el acuífero y el dren. En el caso de la cuenca simulada, se representan drenes en una serie de celdas en posiciones específicas. Para ejemplificar y poder observar el funcionamiento general de un dren (i.e., cualquiera de estas celdas), la Figura III-103 muestra la variación del nivel piezométrico en una celda que presenta este proceso. Como se evidencia, el dren se encuentra activo en la mayor parte del período simulado. Sin embargo, a partir del año 4 se incrementa artificialmente la tasa de evapotranspiración para poder ver la desactivación del dren. Esta activación y desactivación se evidencia en la Figura III-104, la cual grafica el afloramiento en el dren (i.e., el caudal de extracción), siendo este positivo en todos los pasos temporales en que el umbral de activación es superado. Notar que la configuración forzada de activación y desactivación del dren antes mencionada, solo busca mostrar el funcionamiento físico de este proceso. En el modelo final, en vez de esta configuración forzada, el dren se activa endógenamente en base a las condiciones de la celda en cada paso temporal (i.e., el nivel piezométrico).

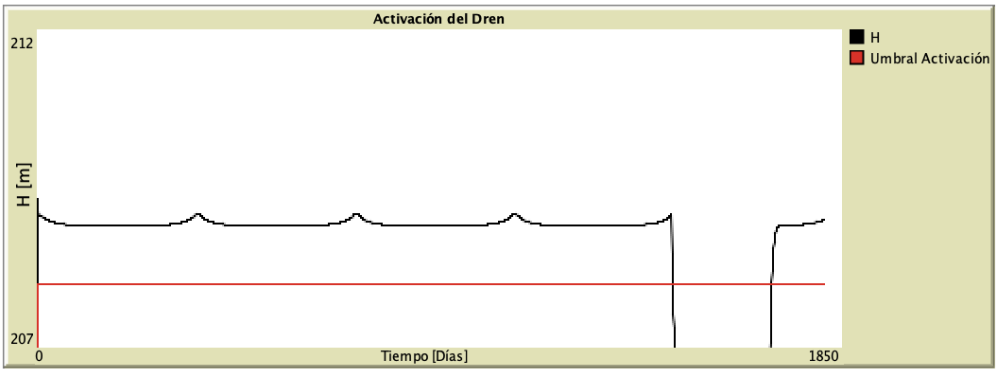


Figura III-103: Nivel piezométrico en una celda definida como dren, y el umbral de activación asociado, considerando una simulación de aproximadamente 5 años en FlowLogo.
Nota: En el año 4, y durante 6 meses, se aumenta la evapotranspiración respecto de las tasas entre años 1-3.
Fuente: Elaboración propia.

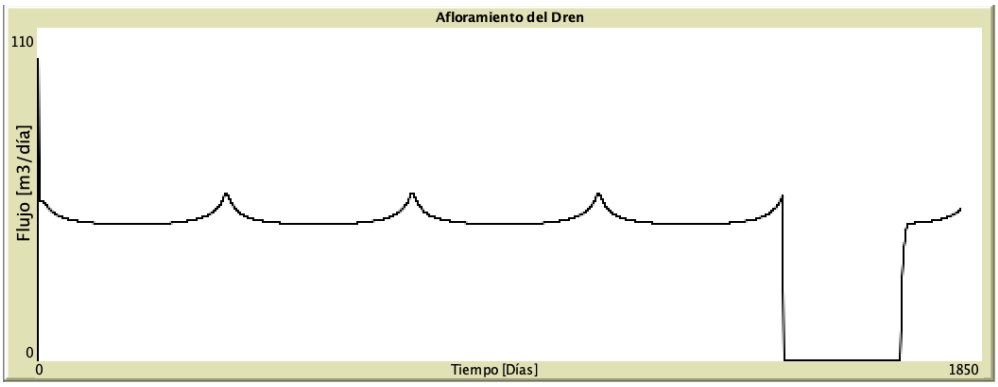


Figura III-104: Caudal de extracción desde el dren producto del afloramiento, considerando una simulación de aproximadamente 5 años en FlowLogo.
Nota: En el año 4, y durante 6 meses, se aumenta la evapotranspiración respecto de las tasas entre años 1-3.
Fuente: Elaboración propia.

Con los 3 principales procesos físicos ya implementados en FlowLogo, se procede a simular la "Situación Base" de la cuenca virtual generada. La Figura III-105 muestra la interfaz del modelo ejecutado, junto a 2 gráficos (lado izquierdo) que muestran los niveles piezométricos en celdas. Tal y como evidencian ambos gráficos, la situación base escogida y parametrizada, muestra un equilibrio entre las entradas (recarga superficial) y las salidas (evapotranspiración y drenes) en las celdas (así como en el modelo), generando un comportamiento oscilatorio que responde a la oscilación en la evapotranspiración. Ahora, dado que el afloramiento de los drenes en una condición de equilibrio natural es de particular interés en la simulación de proyecciones climáticas, el gráfico al costado derecho de la misma figura, resume el afloramiento total que se produce en el modelo por los drenes, el cual sigue un comportamiento oscilatorio anual similar.

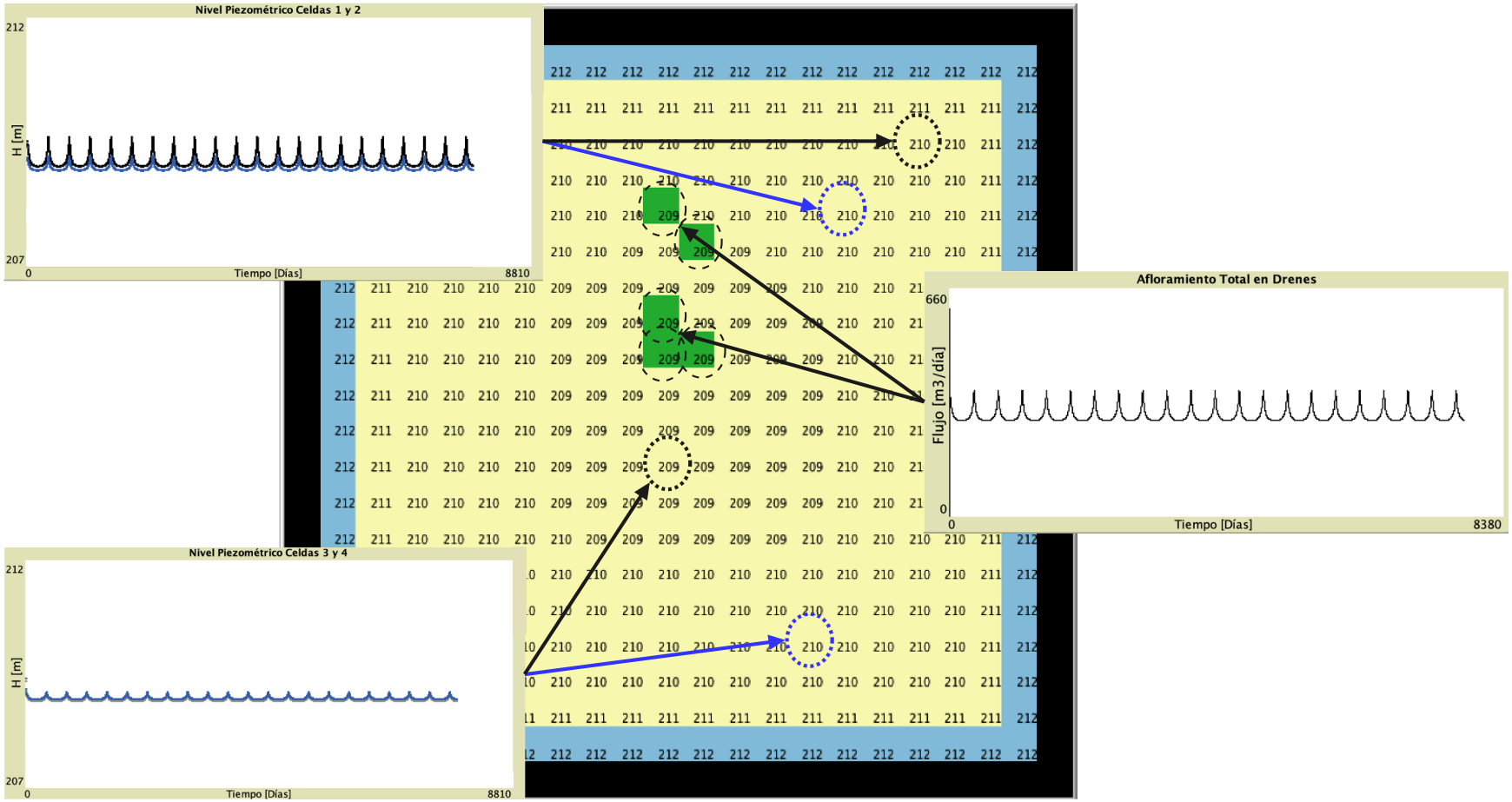


Figura III-105: Comportamiento oscilatorio resultante de la implementación del escenario Situación Base en FlowLogo.
Fuente: Elaboración propia.

III.7.3 Resultados

En este acápite se presenta la implementación en código programable del Sistema Social del ABM, es decir, los agentes que se simularon operando en la cuenca y sus procesos de decisión (notar que el Sistema Físico es presentado en el acápite III.7.2.4.1). Para el caso de este proyecto, este Sistema consta de los agentes (1) Unidad Fiscalizable (representativo de los operadores mineros), e (2) Institucionalidad ambiental. Sus procesos de toma de decisiones e interacciones entre sí y con el recurso hídrico, asemejan por tanto una operación extractiva de recursos hídricos y salmuera que toma lugar bajo una normativa (i.e., monitoreo y fiscalización) y sus instrumentos de gestión asociados. Cabe destacar que, al igual que el Sistema Físico, este es una representación simplificada de lo que sucede en la cuenca del Salar de Atacama, en términos de que solo se simularon algunos actores y comportamientos, dejando de lado otros. Los agentes y comportamientos no representados (e.g., comunidades indígenas, actores privados), se debe a que no participaron en esta etapa del proyecto en los talleres (ver brechas de la modelación en acápite III.7.4.2).

Para facilitar la explicación del Sistema Social, se detalla primero la arquitectura de agentes implementada. Luego, y comenzando desde dicha estructura de agentes, se agrupa la descripción del código en torno a "módulos", los cuales describen a modo de narrativas las dinámicas de interés, y que involucran a múltiples agentes. En concreto, se desarrolla un primer módulo para los Planes de Alerta Temprana, y un segundo módulo para la Fiscalización de las RCA. Al final de este acápite, se presentan conceptualizaciones posibles de escenarios de gestión alternativos identificados durante los talleres.

III.7.3.1 Arquitectura de Agentes

Para implementar el Sistema Social, se hace uso del lenguaje de programación NetLogo. En concreto, se crearon los siguientes agentes y atributos asociados en dicho programa.

- **Unidad Fiscalizable**: Corresponde a la unidad física en la que se desarrollan obras, acciones o procesos, relacionados entre sí, y que se encuentran regulados por uno o más instrumentos ambientales (en este caso, una RCA vigente). Es este agente, por tanto, el que mantiene uno o más pozos de extracción. Su ubicación en el modelo se representa mediante banderas (ver Figura III-106). Sus atributos incluyen:

    - **Nombre**: Nombre de la Unidad Fiscalizable.
    - **Dueño**: Nombre del dueño de la Unidad Fiscalizable (e.g., "Operador 1").
    - **Nivel de cumplimiento**: Variable que toma valores entre 0 y 1, representando de nulo a pleno cumplimiento del PAT por parte de cada operador respectivamente. Es decir, de activar y cumplir las medidas asociadas a cada fase cuando ello deba ocurrir en base a las características propias de cada PSA y PAT.

- **Fase 1 del PAT activa**: Variable *booleana*[76] que toma el valor de verdadero cuando la Fase 1 del PAT (Alerta Temprana) se encuentra activa sobre la Unidad Fiscalizable, y falso de lo contrario.
- **Fase 2 del PAT activa**: Variable *booleana* que toma el valor de verdadero cuando la Fase 2 del PAT (Plan de Contingencia) se encuentra activa sobre la Unidad Fiscalizable, y falso de lo contrario.

- **Estación de Monitoreo**: Corresponden a puntos de monitoreo de variables de estado (e.g., niveles piezométricos) que reflejan el comportamiento del proyecto y de los objetos de protección asociados al PAT según cada RCA. Su ubicación en el modelo se representa mediante círculos (ver Figura III-106). Sus atributos incluyen:

  - **Nombre**: Nombre de la estación de monitoreo (e.g., "Estación 1").
  - **Frecuencia de Monitoreo**: Corresponde a la frecuencia con que el dueño de una Unidad Fiscalizable (i.e., el titular de la RCA) realiza monitoreo de la variable de estado asociada a la Estación. El valor de esta frecuencia queda establecido en el PSA asociado a cada RCA.
  - **Listado de Cargas**: Listado con los niveles piezométricos observados por el dueño de la Unidad Fiscalizable en la Estación de Monitoreo, en base a la frecuencia establecida para la estación.
  - **Nivel de Activación Fase 1**: Corresponde al nivel piezométrico umbral para la Estación, bajo el cual se activa la Fase 1 del PAT.
  - **Nivel de Activación Fase 2**: Corresponde al nivel piezométrico umbral para la Estación, bajo el cual se activa la Fase 2 del PAT.

- **Agencia**: Agente representativo de una institución pública cualquiera. Por ejemplo, del *cluster* Institucionalidad Ambiental en la cuenca. Este agente tiene a disposición una serie de métodos codificados que aseguran la simulación adecuada de sus acciones en la cuenca (e.g., proceso de fiscalización). Su ubicación en el modelo se representa mediante la forma de una casa (ver Figura III-106). Cada agencia contiene los siguientes atributos clave:

  - **Nombre**: Nombre de la Agencia reguladora (e.g., Institucionalidad Ambiental).

[76] El tipo de dato lógico o booleano es en computación aquel que puede representar valores de lógica binaria, esto es 2 valores, que normalmente representan falso o verdadero.

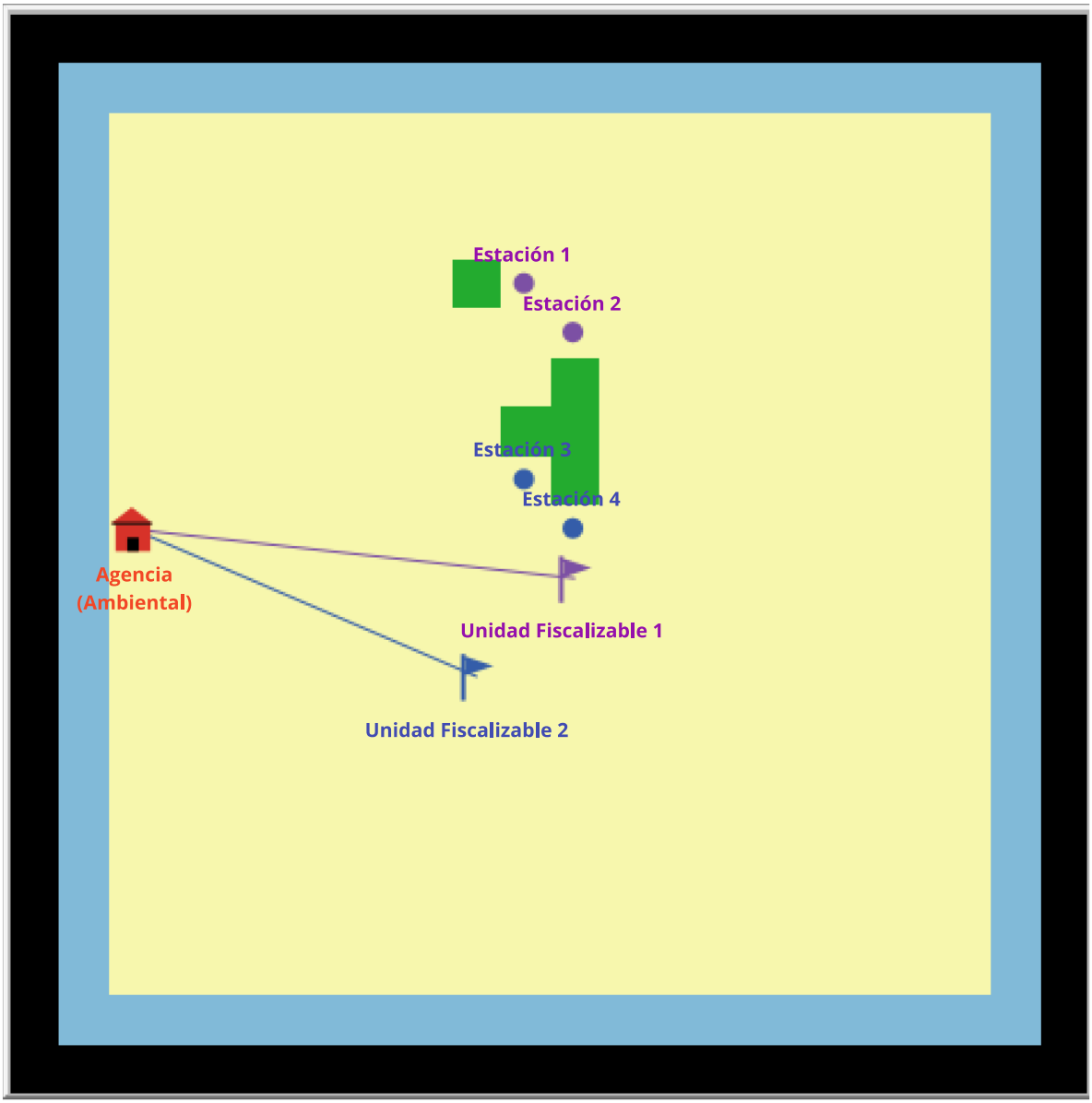


Figura III-106: Arquitectura de agentes implementada sobre el sistema físico en NetLogo.
Nota: En forma de casa roja el agente Agencia, en banderas los agentes Unidades Fiscalizables, y en círculos las Estaciones de Monitoreo.
Fuente: Elaboración propia.

III.7.3.2 Módulo Plan de Alerta Temprana (PAT)

El accionar de la Institucionalidad Ambiental se fundamenta en el proceso de fiscalización ambiental asociado a los Planes de Alerta Temprana (PAT). Tomando como base la estructura de agentes y atributos antes presentada, a continuación, se explica la implementación del código asociado a estos planes en NetLogo.

A modo de verificar el funcionamiento integral del Módulo PAT de forma simplificada, se hace uso de un ejemplo sintético que es codificado en NetLogo y que sigue la

esquematización presentada en la Figura III-106. Como se evidencia, este Módulo consiste en 2 instancias del agente Unidad Fiscalizable (una controlada "Operador 1" y otra por el "Operador 2"), una del agente Agencia Reguladora (llamada "Ambiental"), y cuatro del agente Estación de Monitoreo, las cuales se ubican en torno a los objetos de protección de cada PAT (denominadas "Estación 1" y "Estación 2" para el "Operador 1", y "Estación 3" y "Estación 4" para el "Operador 2"). Cabe notar que, aunque cada agente Unidad Fiscalizable cuenta con su propio PAT, el funcionamiento general de cada uno es similar, pudiendo variar en la implementación final los valores de los indicadores de estado (e.g., niveles de los umbrales) y/o el número de estaciones asociadas (i.e., número de estaciones).

Cada Estación de Monitoreo cuenta con dos umbrales de activación ($h_{fase\,1}$, $h_{fase\,2}$) medidos a partir del nivel piezométrico. Así, de acuerdo con el nivel piezométrico registrado por la estación (i.e., $h^i_{observado}$), esta puede encontrarse en solo uno de 3 posibles estados: (1) Operación Normal, (2) Fase 1, y (3) Fase 2. La información de monitoreo generada por cada Estación es obtenida por el Operador dueño de la Unidad Fiscalizable en la frecuencia de monitoreo establecida en cada estación en particular. Cada Operador, por tanto, recibe dicha información de múltiples Estaciones de Monitoreo, y decide si activar o no la fase asociada al PAT sobre sus operaciones (i.e., Operación Normal, Fase 1, o Fase 2) de acuerdo a esta información. Esta decisión se basa, por un lado, en una regla de activación/desactivación pre-establecida en la normativa ambiental (i.e., en el PAT), la cual se conceptualiza de forma similar en NetLogo según las siguientes relaciones:

$$Fase\ 1\ se\ activa\ si\ en\ cualquier\ estación\ i\text{:} \quad h^i_{observado} < h_{fase\,1}$$
$$Fase\ 1\ se\ desactiva\ si\ en\ toda\ estación\ i\text{:} \quad h^i_{observado} \geq h_{fase\,1}$$
$$Fase\ 2\ se\ activa\ si\ en\ cualquier\ estación\ i\text{:} \quad h^i_{observado} < h_{fase\,2}$$
$$Fase\ 2\ se\ desactiva\ si\ se\ termina\ la\ duración\ de\ la\ fase, y\ en\ toda\ estación\ i\text{:}\ h^i_{observado} \geq h_{fase\,2}$$

De activarse la Fase 1 de cualquier PAT, las medidas a ser implementadas incluyen el: (1) incremento en la frecuencia de monitoreo en aquellas estaciones en que el umbral asociado fue sobrepasado, y (2) dar aviso a la autoridad ambiental de la activación de la Fase del PAT. De activarse la Fase 2 de cualquier PAT, las medidas son idénticas a las de la Fase 1, pero además incluyen (3) una reducción del caudal de explotación de salmuera, y (4) una duración fija pre-establecida (e.g., 6 meses).

A modo de mostrar la operación de las reglas antes presentadas, la Figura III-107 ejemplifica el estado de operación (i.e., Operación Normal, Fase 1, o Fase 2) de una Estación de Monitoreo según los valores piezométricos registrados en ella. Como se observa, la Estación pasa a estar tanto en Fase 1 como en Fase 2 una vez se registra un valor inferior a cada umbral respectivo. Así mismo, la Estación desactiva la Fase 1 y 2 del PAT una vez que el nivel piezométrico sobrepasa el umbral y se han cumplido todas las medidas asociadas (e.g., duración fija pre-establecida de la Fase 2)[77]. La Figura III-108, por otro lado, toma de base

[77] Notar que en este ejemplo, el operador vuelve a Operación Normal tras acabarse la Fase 2. Sin embargo, podría darse el caso de que el operador vuelva a Fase 1 o a Fase 2 de traspasar los umbrales respectivos una vez se acabe la Fase 2.

este funcionamiento de una Estación cualquiera recién descrito, para definir el estado de operación de una Unidad Fiscalizable completa. Como se observa, de existir información de dos estaciones, tanto la Fase 1 como la Fase 2 se activan si cualquiera de las Estaciones de la Unidad Fiscalizable pasa a estar en dicho estado. Así mismo, y al igual que con el caso de una sola Estación, la Fase se desactiva una vez el nivel en todas las estaciones supera el umbral de cada fase, y se han cumplido las medidas específicas[78].

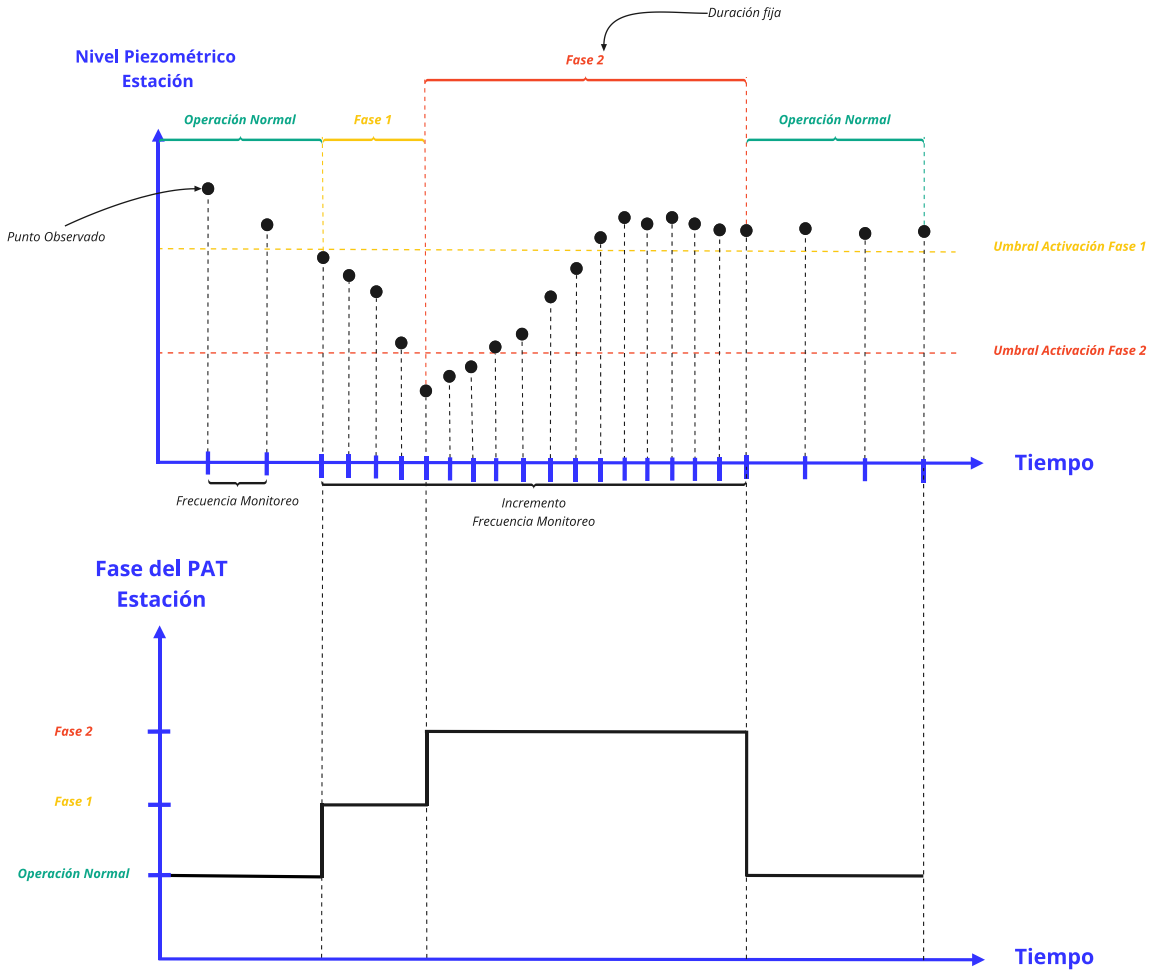


Figura III-107: Ejemplo de definición del estado de operación de una Estación de Monitoreo (i.e., Operación Normal, Fase 1, o Fase 2), en base a los puntos de observación registrados y su diferencia a los umbrales establecidos.
Fuente: Elaboración propia.

[78] Notar que, al igual que en la Figura III-107**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el o perador vuelve a Operación Normal, pero podría darse el caso de volver a Fase 1 o Fase 2.

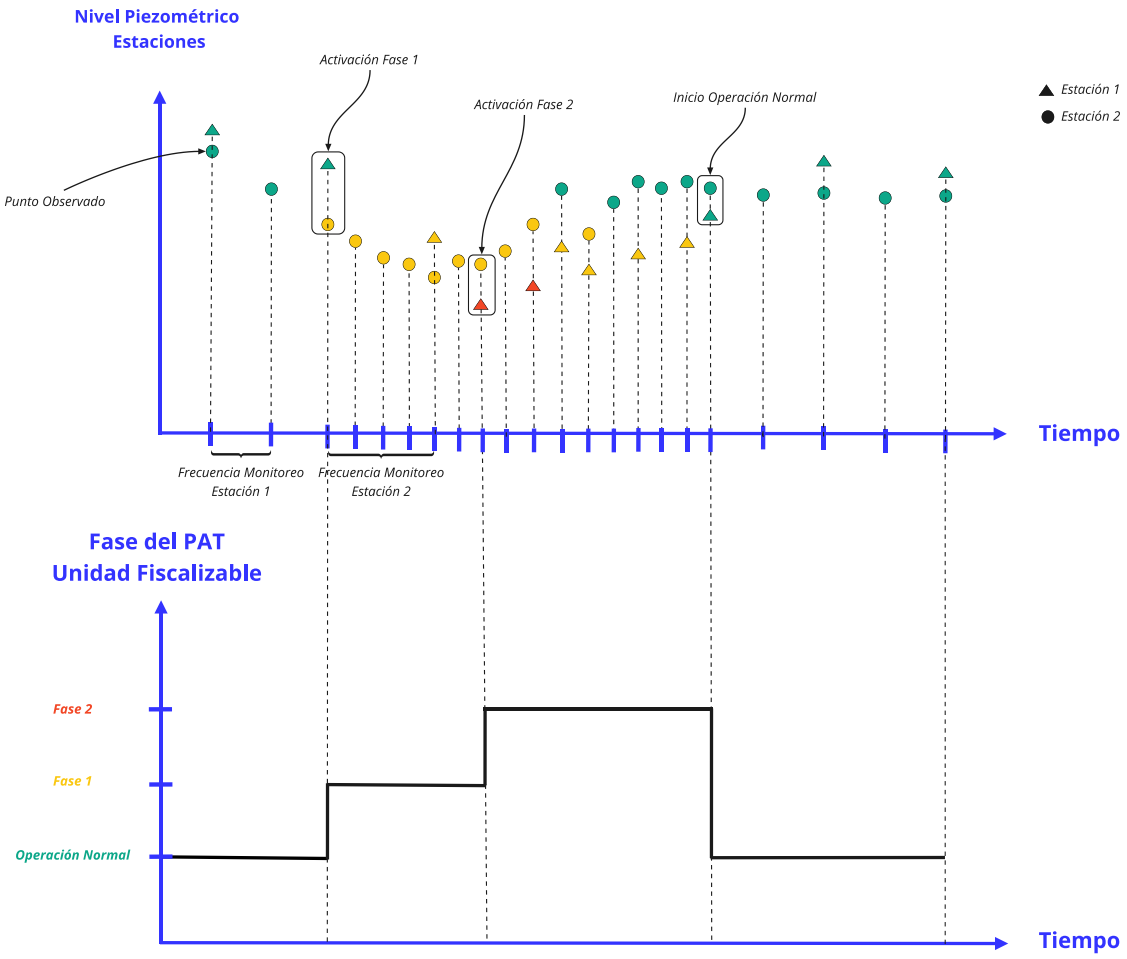


Figura III-108: Ejemplo de definición del estado de operación de una Unidad Fiscalizable (i.e., Operación Normal, Fase 1, o Fase 2), en base a la información registrada en 2 Estaciones de Monitoreo y sus diferencias a sus umbrales establecidos.
Fuente: Elaboración propia.

La implementación de estas reglas en NetLogo se presenta en la Figura III-109. Como se observa, la simulación distingue primero una Situación Base de una Situación con Explotación a nivel del sistema físico. Es decir, la simulación comienza con un período sin extracciones ni acciones antrópicas (i.e., sin agentes), en que es posible evidenciar el equilibrio descrito previamente para el sistema físico. Sin embargo, una vez iniciada la explotación del acuífero, el bombeo efectuado en las pertenencias de cada Unidad Fiscalizable hace descender los niveles del acuífero, provocando en particular que el "Operador 1" deba activar su Fase 1 del PAT (ver gráfico a la izquierda en la Figura III-109). El primer efecto observable de ello es el aumento en la frecuencia de monitoreo, el cual vuelve a la normalidad en el momento en que todas las estaciones registran un valor por sobre el umbral asociado.

Continuando la simulación (ver Figura III-110), los bombeos en la Situación con Explotación incrementan siguiendo un formato escalonado (asemejando a lo aprobado en las RCA de los operadores en el salar), lo cual lleva a la cuenca a alcanzar distintos estados de

equilibrio. En este caso, y tras el segundo escalón de bombeo, el Operador 2 entra en Fase 2 de su PAT (ver gráfico a la izquierda de la Figura III-110), disminuyendo su caudal aprobado de explotación durante un período de 6 meses, el cual se refleja en el inmediato aumento del nivel de la napa. Sin embargo, manteniendo las condiciones, la Fase 2 de dicho Operador se vuelve a activar, generando un equilibrio en torno a la activación de las fases del PAT. Se vuelve evidente en este ejemplo sintético, que los umbrales definidos para el Operador 1 nunca son cruzados, permitiéndole operar normalmente en todo el período de simulación.

Dado que podría darse el caso en que la normativa ambiental vigente no se cumpliera, para representar dicha situación se crea una variable denominada "Nivel de Cumplimiento", cuyo objetivo es reflejar la posibilidad de que una Unidad Fiscalizable cumpla o no la normativa. En concreto, esto se materializa en operar o no de acuerdo con las reglas establecidas en el PAT (i.e., no activar alguna fase del PAT). La conceptualización en código de este proceso se realiza mediante una variable aleatoria uniforme (x), la cual permite asociar el "Nivel de Cumplimiento" con la probabilidad asociada:

$$Sea\ \boldsymbol{x}\ una\ variable\ aleatoria \in [0,1)$$
$$La\ decisión\ de\ activación\ se\ toma\ ssi\colon\quad x \geq (1 - Nivel\ de\ Cumplimiento)$$

A continuación, se muestran dos ejemplos de operación de esta variable sobre sus dos valores extremos: (1) Completo cumplimiento de la normativa (i.e., Nivel de Cumplimiento igual a 1) y (2) Nulo cumplimiento (i.e., Nivel de Cumplimiento igual a cero):

$$Sea\ \text{Nivel de Cumplimiento} = 1 \quad \rightarrow \quad x \geq 0 \quad decisión\ se\ toma\ en\ todos\ los\ escenarios$$
$$Sea\ \text{Nivel de Cumplimiento} = 0 \quad \rightarrow \quad x \geq 1 \quad decisión\ se\ toma\ en\ ningún\ escenario$$

Continuando la simulación antes presentada, se disminuye el "Nivel de Cumplimiento" del Operador 2 desde un valor de uno (total cumplimiento) a cero (nulo cumplimiento), manteniendo el nivel inicial para el Operador 2 (i.e., total cumplimiento). En la Figura III-111 es posible evidenciar como, al disminuir el Nivel de Cumplimiento del Operador 2, este retoma su operación normal (i.e., sube su caudal de explotación) a pesar de encontrarse en Fase 2, provocando una fuerte caída en los niveles piezométricos (expansión del cono de depresión) del acuífero, la cual eventualmente alcanza al Operador 1, forzándolo a iniciar la Fase 1 de su PAT.

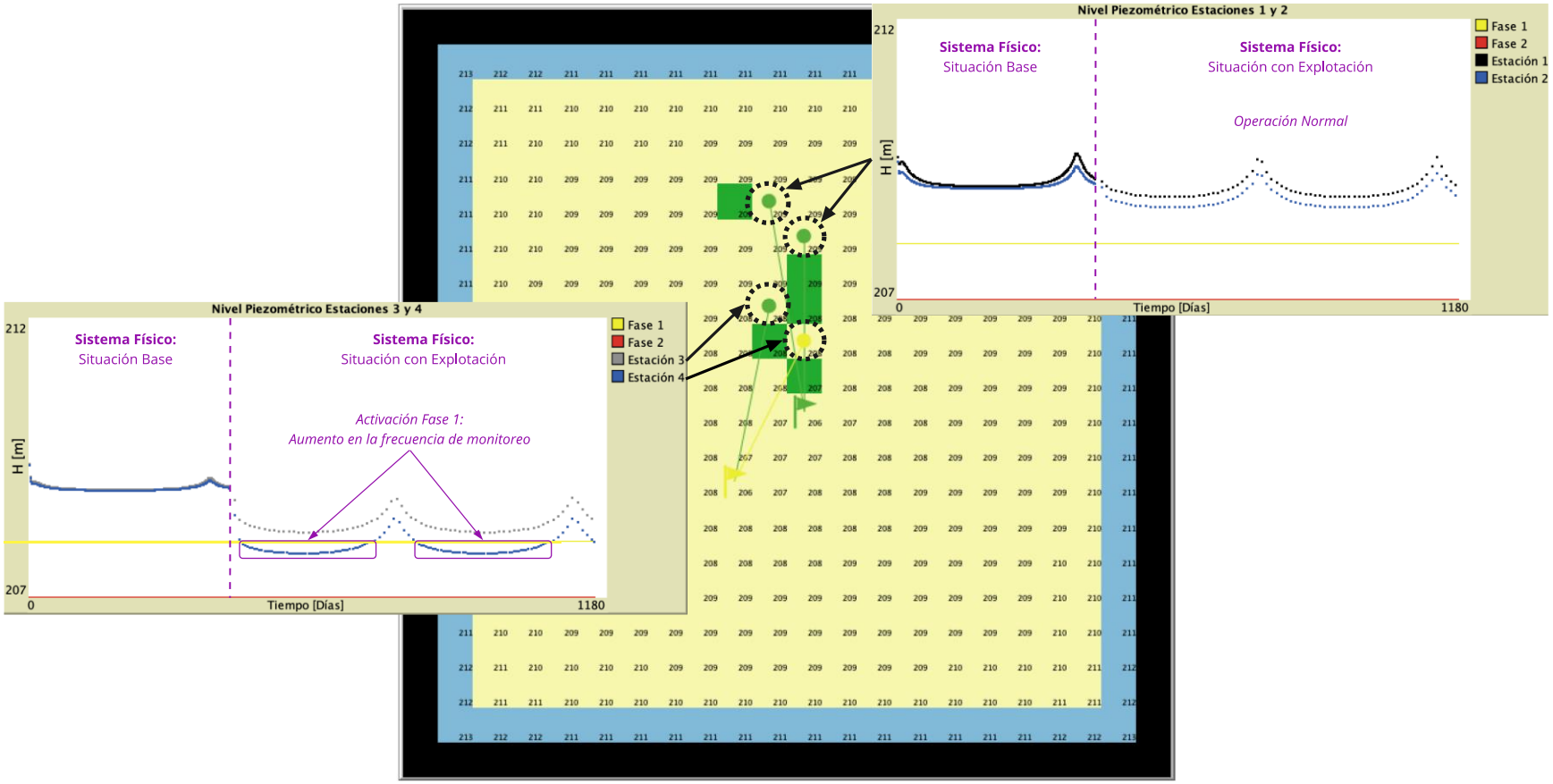


Figura III-109: Esquematización de un ejemplo sintético de simulación del Módulo PAT, incluyendo la activación y medidas de la Fase 1.
Nota: En forma de bandera y círculos cada Unidad Fiscalizable y Estación de Monitoreo respectivamente. El color en dichos agentes denota su estado de operación: Normal (verde), Fase 1 (amarillo), y Fase 2 (rojo).
Fuente: Elaboración propia.

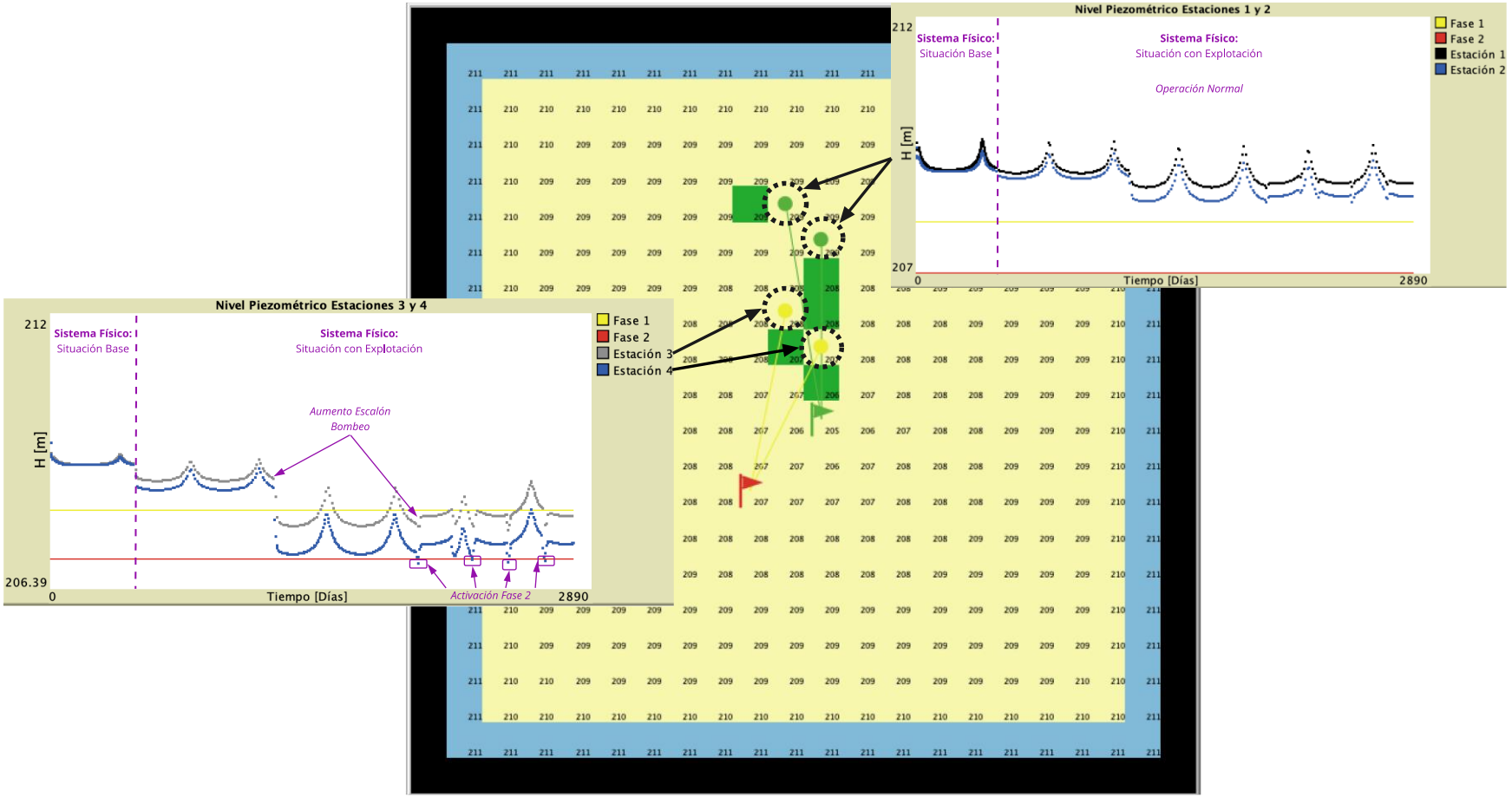


Figura III-110: Esquematización de un ejemplo sintético de simulación del Módulo PAT, incluyendo la activación y medidas de la Fase 2.
Nota: En forma de bandera y círculos cada Unidad Fiscalizable y Estación de Monitoreo respectivamente. El color en dichos agentes denota su estado de operación: Normal (verde), Fase 1 (amarillo), y Fase 2 (rojo).
Fuente: Elaboración propia.

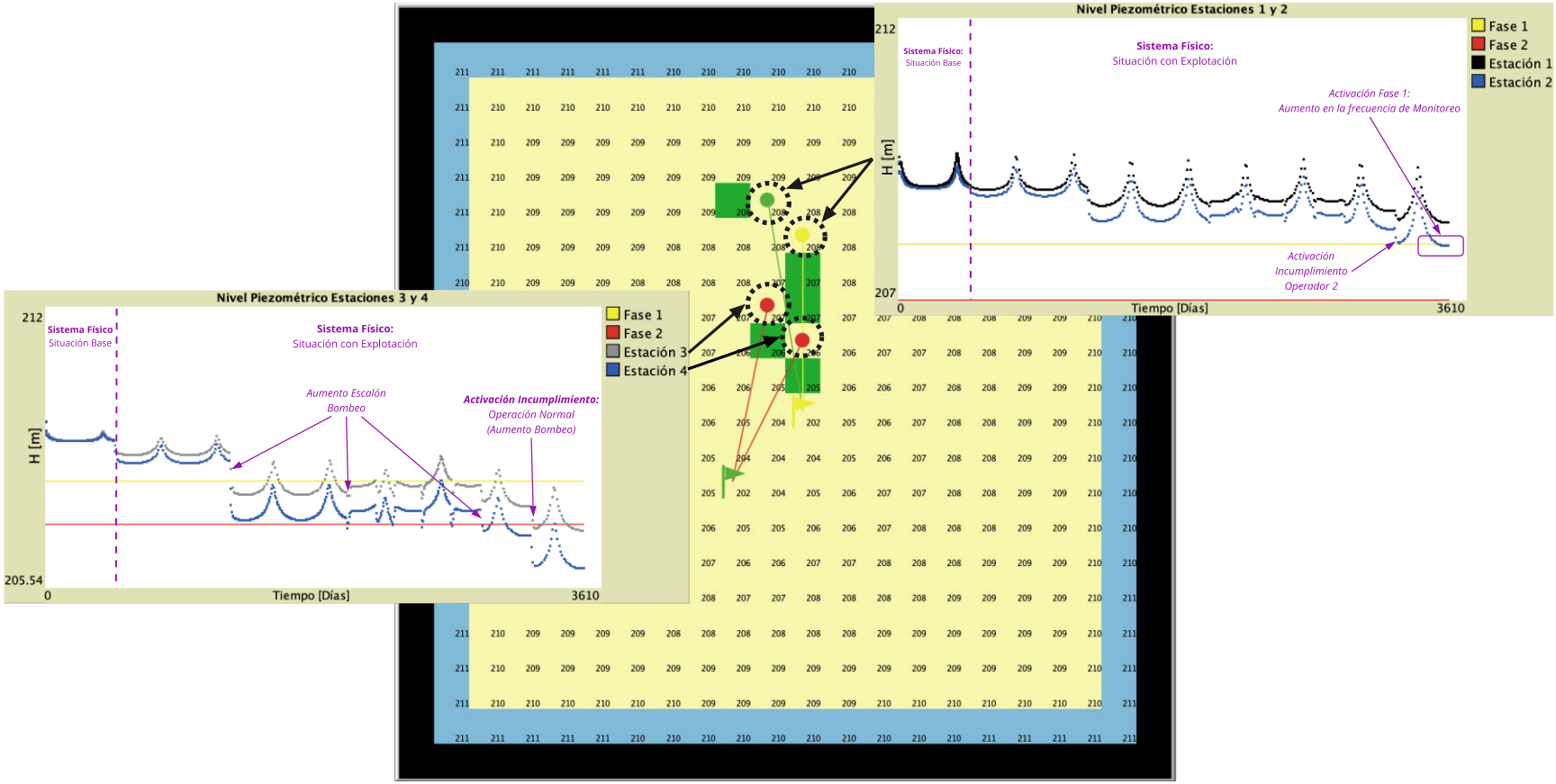


Figura III-111: Esquematización de un ejemplo sintético de simulación del Módulo PAT, incluyendo el Nivel de Cumplimiento (Operador 1 y Operador 2 con máximo y mínimo cumplimiento respectivamente).

Nota: En forma de bandera y círculos cada Unidad Fiscalizable y Estación de Monitoreo respectivamente. El color en dichos agentes denota su estado de operación: Normal (verde), Fase 1 (amarillo), y Fase 2 (rojo).

Fuente: Elaboración propia

III.7.3.3 Módulo Fiscalización

El proceso de fiscalización de las operaciones de extracción de salmuera y agua fresca por los titulares de las RCA en la cuenca, se materializa en el marco de los Programas Anuales de Fiscalización liderados por la SMA. Dicho proceso se conceptualizó en el ABM en 2 etapas secuenciales, las cuales asemejan a la vez que simplifican el proceso seguido actualmente por dicha institución: (1) Decisión de inicio (i.e., generación del Plan Anual de Fiscalización), y (2) Ejecución de la fiscalización. La primera etapa se modeló como una decisión que se toma al inicio de cada año por el agente Agencia, y que define si se ejecuta o no una fiscalización para cada uno de los agentes Unidad Fiscalizable presentes en la simulación (i.e., de manera independiente para cada uno), y en caso positivo, cuando esta debe ser ejecutada. Como se mencionaba, en la realidad este proceso ocurre a nivel central, tomando en cuenta para ello el universo total de resoluciones ambientales aprobadas (i.e., todas las RCA vigentes en Chile). Además, el modelo aritmético de priorización utilizado por la institución considera múltiples fuentes de información (e.g., atributos del espacio geográfico, información propia de las Unidades Fiscalizables). Dado que la representación del espectro completo de esta decisión (y su complejidad) está fuera del alcance de este trabajo, esta se conceptualizó de forma exógena al modelo (i.e., como un dato de entrada al sistema que es previamente determinado). En concreto, se utilizó una variable aleatoria uniforme, la cual determina si se fiscaliza o no cada una de las Unidades Fiscalizables (i.e., aproxima el resultado del proceso de selección anual de la SMA), y para aquellas que se deba realizar, se determina aleatoriamente el momento específico para ello.

Una vez creado el plan de fiscalización anual (i.e., la etapa 1), continúa el proceso con la ejecución de la fiscalización cuando corresponda (i.e., la segunda etapa). Esta etapa consiste en la revisión de toda la información histórica de monitoreo generada por los PAT de cada agente Unidad Fiscalizable hasta el momento en que ocurre la fiscalización. El objetivo de esta revisión es el de detectar incumplimientos a los compromisos establecidos en la RCA aprobada para cada operador. En concreto, esto se traduce en investigar un tipo de infracción considerada como gravísima: la no activación de las fases del PAT de acuerdo con las reglas establecidas en dicho plan. Aunque otras infracciones pueden ser conceptualizadas e ingresadas al modelo para ser estudiadas, la selección de esta infracción responde a su interacción directa con el sistema físico de base.

Durante la ejecución de la fiscalización, cada evento de infracción es registrado por el agente de Agencia, lo cual le permite calcular el "nivel de cumplimiento" de las normativas ambientales que rigen en la cuenca. Para calcular dicha métrica, y considerando solo las Unidades Fiscalizables que ya fueron fiscalizadas, calcula la proporción del tiempo de operación en que dicho agente cumplió la normativa. Este indicador de éxito, por tanto, entrega luces de la eficacia de actuales y futuras normativas pudiendo ser implementadas.

III.7.3.4 Escenarios Alternativos de Gobernanza

Durante los talleres se identificaron una serie de brechas y limitantes en cuanto a la implementación de la institucionalidad ambiental en la cuenca. Algunas de estas brechas

motivaron escenarios de gestión ambiental alternativos (i.e., hipotéticos) y que pueden ser representados en el ABM. En este acápite se describen de manera general cada uno de estos escenarios, y luego se ejemplifica como se podría aplicar la metodología del ABM a uno de ellos.

III.7.3.4.1 Escenario Alternativo 1: Efectos Ambientales No Previstos

Una de las dinámicas de interés y brechas en la gobernanza que fueron identificadas en los Talleres corresponde a los Efectos Ambientales No Previstos, es decir, efectos que no fueron previstos sobre variables ambientales en un proceso de Evaluación Ambiental, y que por lo tanto no forman parte de un PSA ni un PAT activo (Núñez, 2016). Aunque las denuncias ambientales entregan la capacidad a cualquier persona (natural o jurídica) para denunciar a la SMA infracciones o faltas sobre el cumplimiento a la RCA o a la normativa ambiental vigente, estas están circunscritas a los instrumentos de gestión ambiental sobre los que dicha institución tiene competencia. El resto de las variables o elementos de interés ambiental que no estén asociados a alguno de estos instrumentos, no cuentan con un mecanismo formal para retroalimentar la labor de la SMA, lo que puede intervenir con la realidad de las acciones de los actores locales. Una forma de enfrentar esta brecha consiste en hacer partícipes a los actores locales en el proceso de fiscalización ambiental, mediante la identificación de estos efectos y un accionar que sea incorporado en la institucionalidad ambiental.

III.7.3.4.2 Escenario Alternativo 2: RCA Adaptativa

Una de las brechas identificadas durante los talleres con respecto al rol de la institucionalidad ambiental en cuanto a sus herramientas de gestión disponibles, corresponde a la baja flexibilidad que existe en las RCA aprobadas para incorporar actualizaciones, en particular en cuanto al PAT. Este último instrumento (PAT) se configura caso a caso de acuerdo con las condiciones del proyecto (i.e., RCA). Por tanto, puede o no considerar actualizaciones en el tiempo.

El Sistema Social del ABM puede ser adaptado simulando un PAT dinámico, el cual se modifica endógenamente durante la simulación, a partir del aprendizaje que obtiene el agente Agencia sobre el sistema, y sus percepciones de éxito sobre las acciones implementadas. La información que permite modificar el PAT, por otro lado, no está necesariamente limitada a la información aprobada inicialmente. Es decir, es posible modificar el PAT añadiendo nuevos indicadores de estado (e.g., afloramiento en drenes), con sus respectivos niveles de activación, y medidas de mitigación asociadas. En concreto, al agente Agencia se le podría asignar un comportamiento satisfactorio (Simon, 1956), tomando como indicador central la eficacia del PAT tanto en: (1) Cumplir su objetivo fundamental (i.e., proteger los objetos sensibles, asegurando la sustentabilidad de las operaciones extractivas en la cuenca), como (2) Lograr cumplimiento de la normativa ambiental vigente por parte de los usuarios. Así, este agente dispondría de un amplio abanico de opciones de modificación, las cuales implementaría sobre el sistema para asegurar mantener sus propios indicadores de eficacia sobre umbrales específicos. En concreto, este escenario alternativo buscaría evaluar la ganancia de implementar un

sistema de gestión capaz de ser modificado en el tiempo.

III.7.3.4.3 Escenario Alternativo 3: PAT Integrado de cuenca

Aunque un análisis local y detallado permite comprender las dinámicas físicas (o de otra índole) en torno a objetos sensibles de interés, de modo de asegurar su conservación y sustentabilidad en el tiempo, el no considerar el panorama global en que se inserta un proyecto productivo, a través de las conexiones físicas que toman lugar al explotar un recurso que es en sí mismo compartido (e.g., salmuera o agua fresca), puede tener efectos tanto sobre el sistema biofísico (e.g., efectos no previstos, y comportamientos no anticipados), como sobre la operación de los proyectos (e.g., efectos sobre terceros).

El escenario PAT integrado de cuenca se plantea como una opción de gestión para hacer frente a esta desconexión en el análisis de proyectos sobre una cuenca. Este escenario se conceptualiza como un cambio sobre el sistema actual, en cuanto a que se añade un nuevo PAT, el cual considera una integración de las diferentes acciones de los PAT de los diferentes operadores. Dicho PAT estaría enfocado en abordar la cuenca como un todo, y de cubrir la operación de varios proyectos extractivos al mismo tiempo, con el fin de buscar sinergias y balances entre estos.

III.7.3.4.4 Ejemplo Aplicación Escenario Alternativo 1 sobre el ABM

Una forma de representar los efectos ambientales no previstos en el ABM, es a partir de los efectos hidrogeológicos que puede tener la operación extractiva de recursos hídricos (i.e., variación en niveles piezométricos, o la presencia de afloramiento de drenes que sustenten humedales o vegetación), en particular sobre puntos que no han sido considerados por algún instrumento normativo ambiental.

Para establecer en la simulación estos efectos, se extiende la arquitectura de agentes presentada en el acápite III.7.3.1 con los siguientes agentes y atributos asociados:

- **Actor Local**: Agente representativo de distintos actores ubicados en la cuenca con interés en el estado de algunos objetos de protección. Su ubicación en el modelo se representa mediante la forma de una persona (ver Figura III-112). Cada actor local contiene los siguientes atributos:

    - **Nombre**: Nombre del Actor Local.
    - **Nivel de Vulnerabilidad (o afectación)**: Variable numérica que refleja el grado de vulnerabilidad calculado para el actor local. Su cómputo se realiza a partir de la suma de las vulnerabilidades registradas en cada uno de los Objetos de Protección que el agente observa.

- **Agente Objeto de Protección**: Agente que representa aquel objeto de interés en la cuenca para un agente Actor Local, el cual puede verse afectado por la operación de algún proyecto con RCA favorable. Su ubicación en el modelo se representa mediante la forma de un árbol (ver Figura III-112).

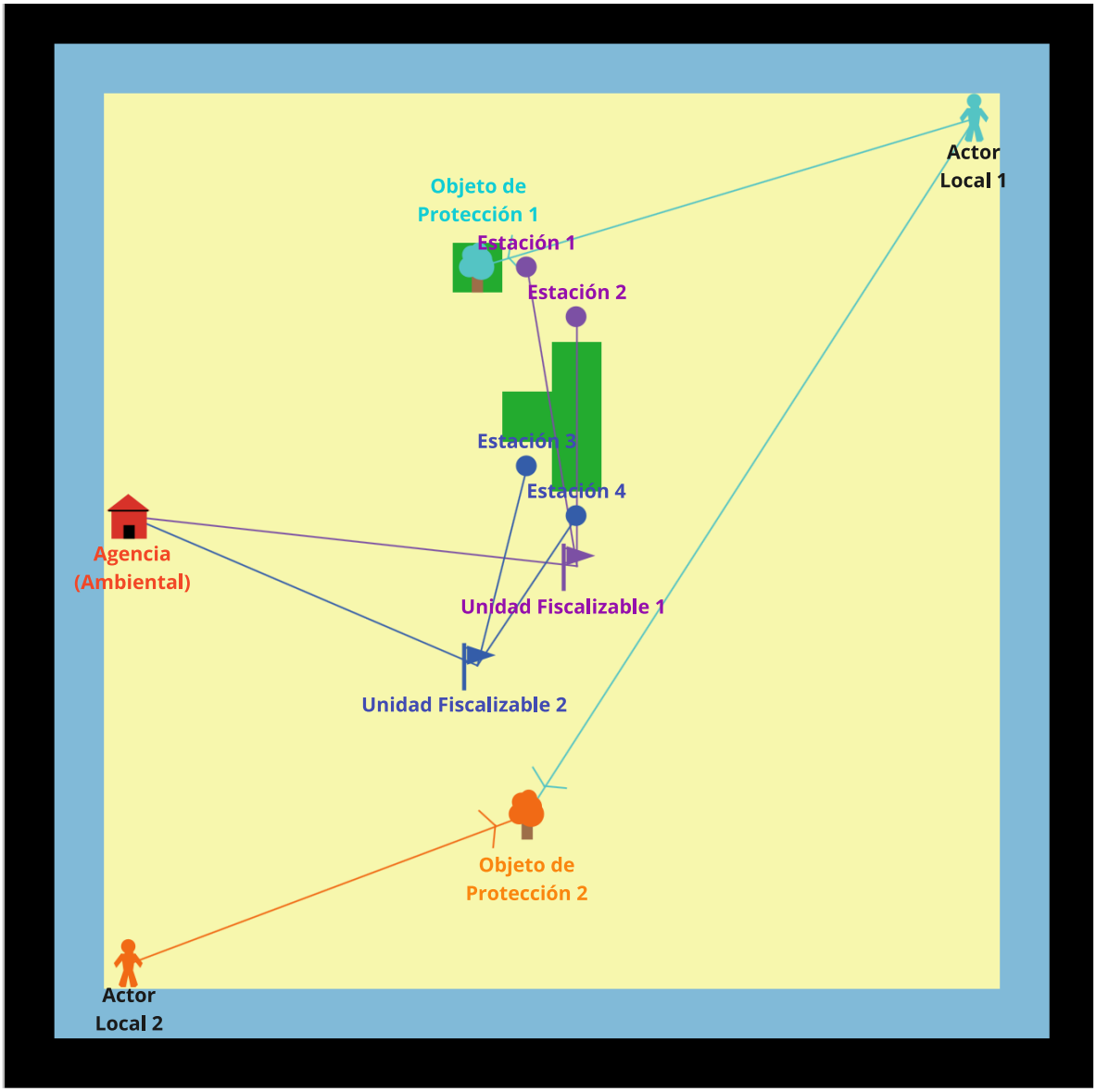


Figura III-112: Extensión de la arquitectura de agentes para el escenario alternativo de gobernanza Efectos Ambientales No Previstos.

Nota: En forma de casa roja el agente Agencia, en banderas los agentes Unidades Fiscalizables, en círculos las Estaciones de Monitoreo, y en forma de personas y árboles los agentes Actor Local y Objetos de Protección respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

Los agentes "Objeto de Protección" representan puntos geográficos de interés en la cuenca para agentes "Actor Local", siendo observados de forma regular por ellos, y sobre los cuales pueden (o no) ocurrir efectos no previstos. Cada agente "Actor Local" puede estar observando múltiples de estos puntos durante la simulación, y evaluando su estado. Esta evaluación, por tanto, refleja el nivel de aprobación del agente "Actor Local" sobre las actividades extractivas que toman lugar en la cuenca. Dado que esto depende de la percepción subjetiva que tiene el agente "Actor Local" (i.e., su evaluación personal sobre el estado del agente "objeto de protección"), se vuelve necesario conceptualizar dicha

percepción. Aunque esto puede hacerse de múltiples maneras, se utiliza aquí el concepto y cálculo de la vulnerabilidad.

El cálculo de la vulnerabilidad se conceptualiza a dos escalas, las cuales en su conjunto permiten representar la heterogeneidad presente en las características de cada agente "Objeto de Protección" y en sus niveles de importancia para los agentes "Actor Local" que la observan: (1) A nivel de cada agente "Objeto de Protección", y (2) a nivel de cada agente "Actor Local". El primer caso se esquematiza en la Figura III-113, la cual muestra una serie de niveles piezométricos medidos en la posición geográfica ocupada por un agente "Objeto de Protección", el cual es de interés para un agente "Actor Local" (notar que otra variable a observar podría bien ser el afloramiento en un dren). Como muestra esta figura, en este caso cinco períodos consecutivos de la simulación registran un descenso tal que se sobrepasa un "umbral de tolerancia" asociado al agente "Actor Local". Con cada uno de estos períodos, el valor de la vulnerabilidad aumenta, siendo calculada a partir del área bajo dicho umbral. Por otro lado, se observa que tanto al inicio de la simulación, como al final, existen períodos en que el "umbral de tolerancia" del actor no es sobrepasado. En cada uno de estos períodos, la vulnerabilidad se mantiene constante (i.e., no incrementa ni disminuye).

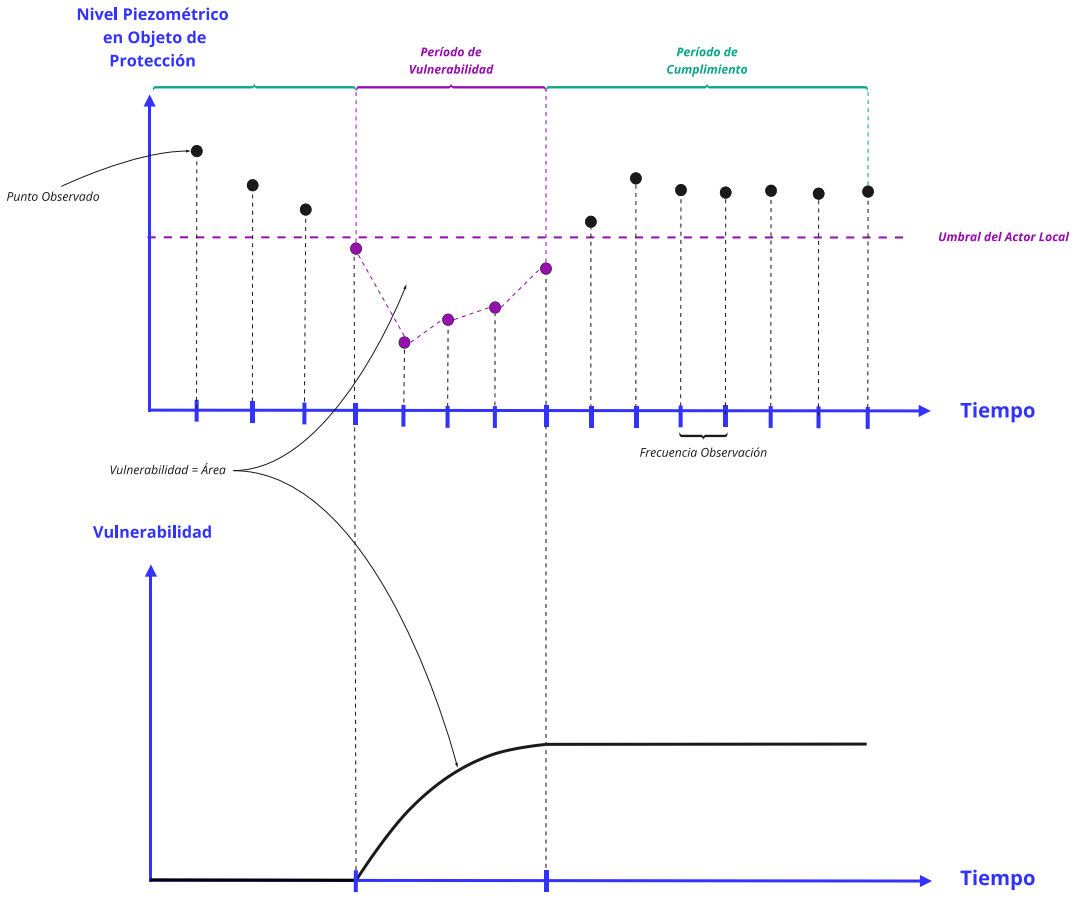


Figura III-113: Ejemplo implementación de la vulnerabilidad en sectores no protegidos.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura III-114 muestra la implementación antes esquematizada de la primera escala de cálculo de vulnerabilidad en código (NetLogo). Como se observa, cada agente Actor Local tiene su propia frecuencia de monitoreo, en base a la cual observa de forma periódica y regular el/los agente(s) "Objeto de Protección". En cuanto al valor del "umbral de tolerancia" (i.e., la cota piezométrica bajo la cual se genera o incrementa la vulnerabilidad), para simplificar el ejemplo, se define de forma idéntica para ambos agentes "Actor Local". La simulación muestra un período de Situación Base física (i.e., sin explotación) seguido de un período de explotación que es al final desactivado. Producto de los bombeos durante el período de explotación, el nivel freático disminuye bajo el umbral de tolerancia considerado por cada agente "Actor Local" sobre el agente "Objeto de Protección" denominado "Objeto 2" (ver la forma de árbol ubicada en la parte inferior de la Figura III-114, cuyas conexiones en rojo evidencian su estado actual, es decir, bajo el umbral crítico). Este evento lleva a un incremento en la vulnerabilidad del objeto, hasta que el bombeo es desactivado, momento en el que el equilibrio físico natural del sistema permite que los niveles del acuífero se recuperen, llevando a la vulnerabilidad de cada agente "Objeto de Protección" a estancarse en un nuevo punto de equilibrio.

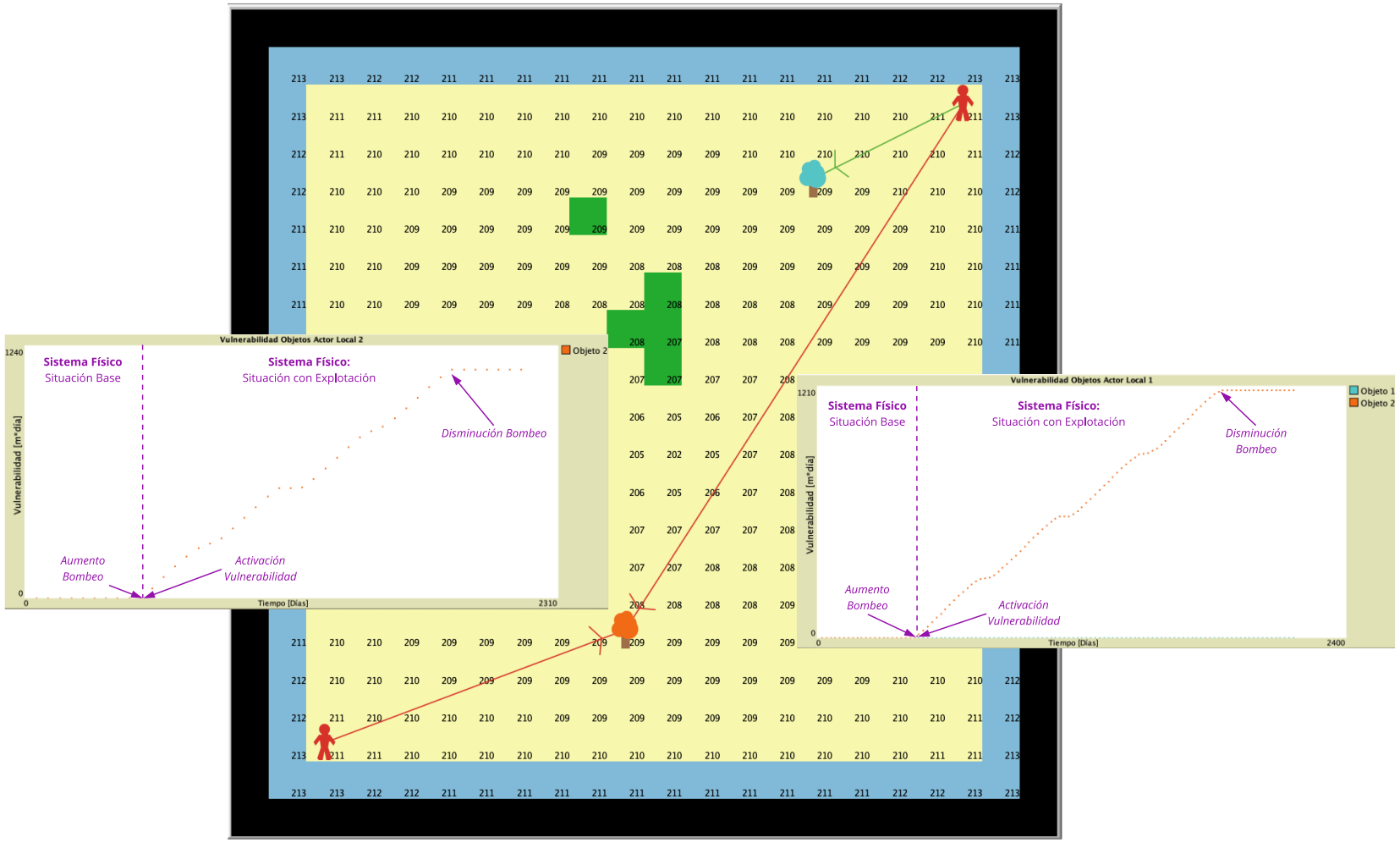


Figura III-114: Esquematización de un ejemplo sintético de simulación de múltiples Objetos de Protección siendo monitoreados por diversos Actores Locales.

Nota: Las flechas muestran la relación Actor-Objeto, y su color si se encuentran (rojo) o no (verde) en estado de vulnerabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la segunda escala, como se mencionaba, cada agente "Actor Local" puede estar observando múltiples agentes "Objetos de Protección". El nivel neto de vulnerabilidad del agente "Actor Local", se obtiene mediante una agregación lineal de la vulnerabilidad medida sobre los agentes "Objetos de Protección" que observa (ver ecuación 1). La Figura III-115 muestra el valor de vulnerabilidad a nivel de cada agente "Actor Local" para la simulación antes descrita. En dicha figura, y aunque ambos agentes "Actor Local" tienen el mismo umbral de tolerancia sobre el único agente "Objeto de Protección" que se activa durante la simulación (el Objeto 1 se encuentra distante de las operaciones extractivas, por lo que nunca ingresa a un estado de vulnerabilidad), sus curvas difieren dada la frecuencia de monitoreo específica de cada actor. Así, el "Actor Local 1" (curva en celeste) muestra una curva más suavizada sobre los valores de vulnerabilidad, mientras que el "Actor Local 2" (curva en naranja) llega incluso a no percibir los últimos pasos temporales del modelo bajo vulnerabilidad, dado su período de 50 días (i.e., 50 pasos temporales) de monitoreo

$$(1)\ Vulnerabiidad_{actor\ local} = \sum_{Objetos} Vulnerabilidad_{Objeto}$$

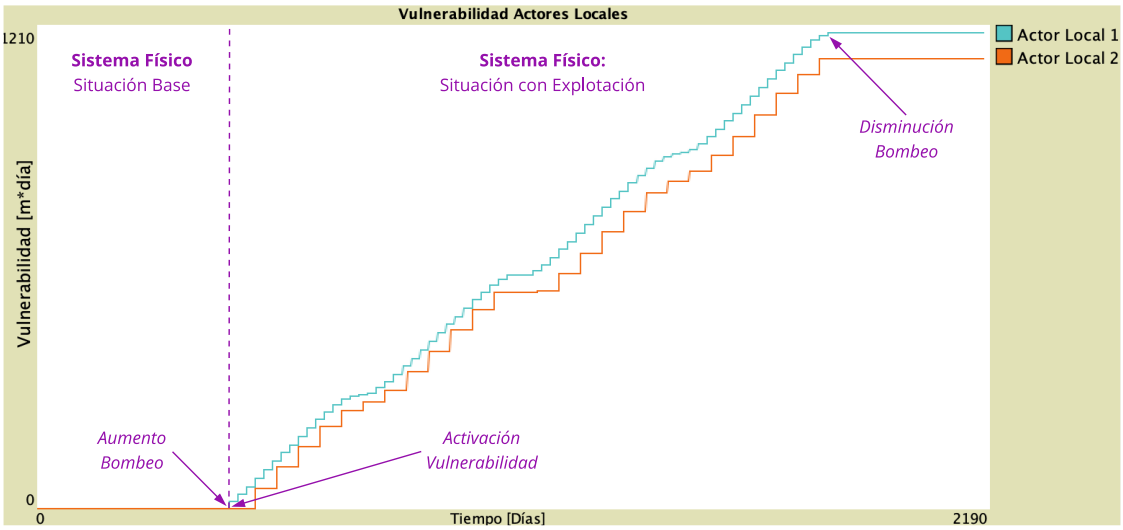


Figura III-115: Valores de vulnerabilidad calculados sobre cada agente Actor Local.
Nota: La simulación considera al inicio y al final una Situación Base (i.e., sin extracciones antrópicas), entre las cuales existe un período de bombeo intensivo del acuífero.
Fuente: Elaboración propia.

Como se evidencia, este cálculo de la vulnerabilidad por los agentes "Actor Local" es una forma de conceptualizar y medir el nivel subjetivo de aprobación de estos agentes sobre las operaciones extractivas que toman lugar en la cuenca. El vínculo con la institucionalidad ambiental se propone a través del ingreso de una Denuncia Ambiental por parte de estos, lo cual se formaliza mediante un umbral de sensibilidad. Así, de superarse dicho umbral de un agente "Actor Local" cualquiera, este ingresa una Denuncia Ambiental sobre la Unidad Fiscalizable más cercana. De este modo, el efecto no previsto por el PAT de una operación extractiva, puede ser capturado de forma interna en el modelo.

Es importante destacar que en la actualidad las Denuncias Ambientales están circunscritas a instrumentos de gestión ambiental específicos. Debido a ello, el ingreso de Denuncias Ambientales por concepto de efectos sobre variables que no estén consideradas en algún instrumento, no ocurre en la institucionalidad actual. Sin embargo, el escenario aquí descrito es capaz de representar dos situaciones que toman lugar bajo la normativa actual: (1) Los PSA suelen ser más amplios, en cuanto a número de variables, que los PAT. Así, por ejemplo, el estado de un elemento de vegetación (i.e., variable ambiental de interés en un PSA) podría ser monitoreado y denunciado a la institucionalidad por agentes "Actor Local" que lo observan; (2) Hay variables ambientales y del ciclo hidrológico que quedan fuera de los PAT y de los PSA. Dado que el conocimiento científico y de línea base ambiental sobre los sistemas a proteger es siempre limitado, poder responder de forma adaptativa requiere que actores locales puedan participar del proceso a través de variables ambientales de interés para estos. En otras palabras, esta representación permite incluir el monitoreo y la respuesta de actores locales frente a cambios físicos en zonas de interés.

III.7.4 Conclusiones, limitaciones y recomendaciones

Al inicio de este capítulo se remarcó la importancia de incluir en la modelación de recursos hídricos el componente humano, y el potencial que tiene la Modelación en Base a Agentes para cumplir este propósito. En línea con ello, se introdujo una guía comprensiva que enumera los bloques necesarios para poder implementar este tipo de modelos. La mayor parte de estos bloques fueron abordados en este informe, siguiendo un esquema de Modelación Participativa que en su conjunto reunió a más de 100 personas a lo largo de varios talleres realizados en un formato completamente virtual. Como resultado de este trabajo, se identificó a la institucionalidad ambiental como una pieza fundamental del componente humano en la cuenca del Salar de Atacama. Esto motivó la implementación en código (escrito en NetLogo) de un prototipo de ABM capaz de representar, de forma simplificada, la interacción entre un operador que extrae recursos hídricos, y aspectos de la gestión ambiental en la cuenca (e.g., Planes de Alerta Temprana, Planes de Seguimiento Ambiental, y el proceso de Fiscalización Ambiental). Esta implementación sentó las bases para la representación de escenarios alternativos de gestión ambiental, los cuales provienen de las brechas detectadas en el trabajo con actores realizado a lo largo del proyecto.

El estado actual del modelo permite verificar el comportamiento de procesos sociales y de gestión clave que toman lugar en la cuenca del Salar de Atacama. Sin embargo, es importante destacar algunas brechas del modelo en su estado actual, así como pasos propuestos para poder abordarlas. Cada una de estas se presenta a continuación en extenso.

III.7.4.1 Acople ABM a Modelo físico detallado

El modelo de flujo de aguas subterráneas implementado para el prototipo del ABM en NetLogo, corresponde a un modelo hidrogeológico simplificado, el cual no fue calibrado ni validado, dado que su objetivo era mantener la parsimonia del modelo a medida que se agregaban componentes al Sistema Social (principal foco del ABM). Esta representación

física puede ser reemplazada por el modelo integrado de aguas superficiales y subterráneas desarrollado durante el proyecto (presentado en el acápite III.5). Para lograrlo, se vislumbran dos alternativas: (1) diseñar un acople computacional entre NetLogo y WEAP-MODFLOW, o (2) reescribir el ABM desde NetLogo a Python. En el primer caso, se cuenta con la librería "PyNetLogo"[79], la cual permite controlar NetLogo desde Python, y existe una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API por sus siglas en inglés) que permite programar de manera remota algunos componentes de WEAP. En el segundo caso, se cuenta con la librería "Mesa"[80], la cual permite escribir de forma nativa en Python Modelos Basados en Agentes. Por otro lado, ya es posible manejar MODFLOW mediante Python a través librerías como "FloPy"[81], y WEAP ya es capaz de controlar MODFLOW internamente.

Tomando los antecedentes antes mencionados, el primer camino puede materializarse mediante un acople "suelto" (i.e., basado en el intercambio externo de archivos de información) del sistema social implementado en NetLogo y MODFLOW mediante FloPy. En cuanto al segundo camino, este requeriría (además de la re-implementación del código de NetLogo en Mesa) la codificación de rutinas en Python que controlen internamente WEAP y MODFLOW en cada paso temporal.

III.7.4.2 Conceptualización de Actores y Decisiones

Durante los Talleres de Validación (ver acápite III.7.2.3) se conceptualizó la decisión clasificada como prioritaria (de un conjunto de decisiones) para cada uno de los principales agentes identificados durante los Talleres de Conceptualización (ver acápite III.7.2.2). Dado que el prototipo del ABM se centró en la institucionalidad ambiental y su interacción con los Operadores Mineros, la conceptualización del resto de los agentes, así como de otras decisiones, corresponde a un trabajo futuro en el desarrollo y mejora continua de esta herramienta. A continuación, se detalla una propuesta para progresar en dichas conceptualizaciones para cada agente.

III.7.4.2.1 Agente Unidad Fiscalizable

La decisión desarrollada durante los Talleres de Validación con respecto a los Operadores Mineros (ver Anexo 8 de la Etapa III), tuvo como objeto la extracción de salmuera. Debido a que esta decisión toma lugar a diversas escalas temporales (e.g., desde un nivel operacional diario, a un nivel estratégico de largo plazo), este agente también puede seguir objetivos a distintas escalas. En la representación actual de este agente en el prototipo del ABM (i.e., el agente "Unidad Fiscalizable"), este tiene la capacidad de extraer salmuera desde el acuífero en base a una tasa fija. Una primera mejora, por lo tanto, corresponde a la inclusión de los niveles de extracción de salmuera utilizando la información histórica de los operadores. Esto se realiza de forma inmediata mediante el acople del sistema social al modelo hídrico integrado que contiene dicha información. Luego, se

[79] https://pynetlogo.readthedocs.io/en/latest/#
[80] https://github.com/projectmesa/mesa
[81] https://flopy.readthedocs.io/en/3.3.2/

vuelve de interés poder evaluar esquemas alternativos de explotación de salmueras. En particular, un primer esquema corresponde a la representación de los planes de sustentabilidad ambiental presentados por los operadores, los cuales describen metas de reducción en las extracciones en el largo plazo. Un segundo esquema corresponde a un diseño distribuido espacialmente de la explotación. En este caso, la activación o desactivación de la red de pozos podría responder al objetivo de maximizar la extracción de salmueras en aquellas zonas donde la evapotranspiración sea mayor, de modo de aprovechar recursos que de otro modo saldrían de la cuenca mediante evaporación natural.

III.7.4.2.2 Agente Actor Local

La decisión desarrollada durante los Talleres de Validación con respecto a los actores comunidades indígenas (ver Anexo 8 de la Etapa III), tiene como objeto la extracción de agua para la irrigación y producción agrícola. Dicha decisión puede ser implementada de manera directa en el prototipo del ABM mediante el acople del sistema social al modelo hídrico integrado, el cual permitiría representar los flujos superficiales, y con ello la actividad agrícola.

Aunque una representación inicial de esta decisión, en un sistema meramente físico, podría responder a condiciones hidrológicas (e.g., clima y precipitaciones), en un sistema hidro-social, los resultados de los Talleres de Validación sugieren que existen múltiples motivos que llevan a estos actores a tomar esta decisión, como: Generar ingresos económicos (e.g., la productividad de los cultivos), mantener una subsistencia alimentaria, y conservar las tradiciones ancestrales asociadas con la agricultura. El primero de estos motivos podría ser conceptualizado mediante un modelo agro-económico que refleje de manera apropiada la escala de decisión de este actor. El segundo y tercer motivo, sin embargo, requieren de una mayor comprensión de las percepciones del actor sobre las variables que influyen en la decisión. Esto último, sumado a que los resultados del Taller de Validación provienen de un trabajo realizado con expertos del mundo académico y representantes del sector público, llevan a requerir de un trabajo participativo más extenso y que involucre directamente a las comunidades indígenas y otros actores de la cuenca.

III.7.4.2.3 Agente Institucionalidad Ambiental

La decisión desarrollada durante los Talleres de Validación con respecto a la Institucionalidad Ambiental, tiene que ver con el proceso de fiscalización ambiental, incluyendo los PAT y los PSA. Sin embargo, el proceso de sanción no fue incluido, con lo cual aspectos como los Planes de Cumplimiento y las Autodenuncias no fueron representados en el modelo en base a agentes. Es importante mencionar que la exclusión de estos procesos responde a los objetivos propios de este proyecto, por lo que futuras versiones de esta herramienta pueden centrarse en incluir mayor detalle en estos procesos.

III.7.4.2.4 Agentes Dirección General de Aguas

La decisión conceptualizada durante los Talleres de Validación con respecto a la Dirección General de Aguas (ver Anexo 8 de la Etapa III) tiene como objeto la asignación de derechos de aprovechamiento de aguas. Siendo este un proceso de suma relevancia para la institución, sus principales determinantes fueron identificadas y resaltadas en el trabajo participativo. Sin embargo, dado que, en la cuenca del Salar de Atacama, objeto final de este estudio, ya se encuentran asignados todos los derechos, se decidió relegar la inclusión de este agente y esta decisión para futuras exploraciones.

En cuanto a las decisiones que no fueron conceptualizadas durante el Taller de Validación (i.e., las normas y fiscalización del uso de los derechos de aprovechamiento de aguas, junto al monitoreo y vigilancia de variables del ciclo hidrológico), es importante destacar que en gran medida estas son capturadas, para el caso de la cuenca del Salar de Atacama, mediante el proceso conceptualizado de la Institucionalidad Ambiental (i.e., mediante el ciclo de programación anual, las instancias mismas de fiscalización que toma lugar de manera conjunta con otras agencias sectoriales, y el monitoreo de información hídrica en la cuenca mediante el PSA de las RCA). Sin embargo, estas decisiones sí pueden tomar lugar por accionar particular de la DGA, y por fuera del ámbito de la institucionalidad ambiental, como ocurre con los PAT asociados a derechos de aprovechamiento de aguas. Su inclusión, por tanto, puede ser conceptualizada y agregada a un nuevo agente dentro del prototipo del ABM siguiendo un formato similar al aquí propuesto para el agente regulador ambiental.

III.8 Uso del modelo integrado para la gestión de recursos hídricos y de salmuera y recomendaciones para futuros desarrollos

El objetivo general de este proyecto ha sido desarrollar un Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la cuenca de Salar de Atacama, como herramienta numérica, de soporte para la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico y la salmuera en la cuenca de Salar de Atacama. Se espera que este modelo sirva para construir el Plan Estratégico de Gestión Hídrica que desarrolla la Dirección General de Aguas y contribuir también a la gestión sustentable de las actividades de extracción de minerales no metálicos que se desarrollan en la cuenca del Salar de Atacama. En este capítulo se da cuenta de las bases que se entregan con los modelos desarrollados para resolver estos objetivos, y se plantean estudios y trabajos que sirvan para reducir algunas de las brechas detectadas. El detalle de las brechas para cada componente ha sido descrita con mayor profundidad en los capítulos designados para cada uno de los modelos.

III.8.1 Modelos de base para la gestión de los recursos hídricos y la salmuera en la cuenca del Salar de Atacama

De acuerdo con lo presentado en capítulos anteriores se han desarrollado modelos de base física acoplados que representan las condiciones históricas de la hidrología y el uso de los recursos hídricos y la salmuera en la cuenca. Este modelo representa todos los flujos naturales (precipitación, escorrentía superficial, flujos subterráneos y evapotranspiración) así como también todas las intervenciones antrópicas de extracción de agua fresca (a nivel superficial y subterránea) para riego de cultivos, para consumo de agua potable y consumos industriales. Se incluyen también extracciones y reinyecciones de salmuera. Estos modelos se han desarrollado en las plataformas de simulación WEAP, MODFLOW y SEAWAT y se acoplan de manera directa o a través de rutinas diseñadas en código Python. De esta manera se obtiene un modelo único integrado. Este modelo integrado considera como base las definiciones y conceptualizaciones propuestas por CORFO-Amphos21 (2021), sin embargo, este modelo responde en su totalidad a forzantes climáticas y antrópicas, facilitando la representación de proyecciones climáticas futuras y la variabilidad del clima en lugar de estacionalidades impuestas. El modelo es consistente en los órdenes de magnitud y estrategia de las precipitaciones, recargas y balances del estudio de CORFO-Amphos21 (2021). En la Tabla III-38 se muestra un contraste entre el trabajo desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021) y el trabajo realizado en este proyecto y en la Tabla III-39 se muestra una síntesis de las principales similitudes y diferencias entre estos trabajos.

Tabla III-38: Contraste de los alcances y estrategias de los trabajos desarrollados por CORFO-Amphos21 (2021) y el desarrollado en este proyecto.

Proyecto	Objetivo	Dominios y estrategia de modelación	Herramienta modelación numérica	Escenarios futuros	Uso de recursos hídricos y salmuera (revisión con actores)
CORFO-Amphos21 (2021)	• Modelación subterránea con parámetros de entrada de flujos superficial y lateral.	• Lateral (conceptual) • Salar-Monturaqui (conceptual superficial y numérico subterráneo)	MODFLOW USG/SEAWAT	• Escenario climático • Extracción de agua industrial y salmuera	• Extracción de agua industrial y salmuera • Sin revisión con actores
CORFO-PUC (2021)	• Modelación Integrada subterránea/ superficial/lateral (modelo físico). • Piloto modelo de agentes con integración modulo físico y social.	• Lateral (numérico) • Salar-Monturaqui (numérico superficial y subterránea)	WEAP/MODFLOW NWT/SEAWAT	• Proyección climática • Caracterización de cambios en población, superficie cultivada y posibles cambios en mercado del litio	• Extracción de agua fresca, agua industrial y salmuera • Sin revisión con actores

Tabla III-39: Principales similitudes y diferencias de los trabajos desarrollados por CORFO-Amphos21 (2021) y el desarrollado en este proyecto.

Similitudes (Amphos21 – PUC)	Diferencias (Amphos21 – PUC)
• Dominios y zonificación • Modelo hidrogeológico de base • Precipitación anual y distribución espacial • Consistencia en ordenes de magnitud recarga y balances	• Objetivos y alcances • Forzantes climáticas • Modelación hidrológica (numérico vs conceptual) e integración • Ajuste de parámetros hidráulico en rango de A21

El modelo integrado presentado en este proyecto es capaz de evaluar cambios en la escorrentía que puedan ocurrir producto de cambios en el largo plazo en las condiciones climáticas, en el uso del suelo y en las condiciones que inciden en la extracción de agua fresca y salmuera y los efectos que estas extracciones generan en el ciclo hidrológico. Es importante destacar que, pese a que esta herramienta implica una capacidad de representar los procesos hidrológicos e hidrogeológicos a una escala de cuenca, su resolución espacial limita el uso de la herramienta para poder realizar una gestión especifica en sitios puntuales que puedan estar muy afectados por las condiciones locales. En distintas secciones de esta Etapa del proyecto se destacan algunas otras limitaciones que pueden ser resueltas de acuerdo a las recomendaciones de trabajo futuro que se plantean en el siguiente acápite.

En la Etapa II se presenta una propuesta metodológica y algunos resultados para plantear proyecciones de desarrollo económico y demográfico en la cuenca que va a incidir en los consumos futuros de agua fresca y salmuera. Es importante destacar que, para la construcción de escenarios reales de gobernanza, éstos sean discutidos y consensuados con los actores de la cuenca por lo que se ha sugerido que su diseño sea realizado en el marco del proceso de participación ciudadana del PEGH para la cuenca, dirigido por la DGA. En dicho proceso de puede utilizar la herramienta para simular escenarios de consumo hídrico en conjunto con intervenciones de escenarios que proponga la DGA, incluyendo un portafolio de acciones estratégicas a corto, mediano y largo plazo, en coordinación con otros servicios públicos relacionados a la administración del recurso hídrico.

Por otra parte, se ha desarrollado un prototipo de modelo en base a agentes que se ha construido a partir de talleres con expertos y representantes del sector público. Este proceso participativo sirve de preámbulo para el diseño del PEGH para el desarrollo de una visión conjunta de gestión del recurso hídrico en la Cuenca del Salar de Atacama. Este modelo representa el proceso de toma de decisiones con un foco en la implementación de la institucionalidad ambiental en la cuenca.

III.8.2 Recomendaciones de nueva información y estudios para mejorar los modelos de base para la gestión de los recursos hídricos y la salmuera en la cuenca del Salar de Atacama

En el desarrollo de las herramientas de modelación de este proyecto se han detectado un conjunto de brechas que pueden ser suplidas a través de nuevos estudios, nuevos monitoreos y procesos con actores relevantes en la cuenca. Algunas de estas recomendaciones se plantean a continuación (mayores detalles se pueden encontrar en los capítulos de modelos respectivos).

III.8.2.1 Recomendaciones de mejora de información

Se identifican dos tipos de brechas de información y por ende dos tipos de estrategias para abordarlas. Por una parte, existen brechas de información respecto de componentes del

ciclo hidrológico natural que debiesen resolverse a través de mejoras en monitoreo y por otra parte existen brechas de información respecto de los procesos de toma de decisiones y usos actuales y futuros de recursos hídricos y salmuera en la cuenca. Algunos ejemplos de estas brechas son las siguientes:

III.8.2.1.1 Recomendaciones en mejoras en información respecto de componentes del ciclo hidrológico natural

1. Estaciones meteorológicas: Existen solamente 6 estaciones de precipitación con extensión de datos suficientemente largas para el uso en modelos hidrológicos numéricos como el desarrollado en este proyecto. Se requiere ampliar la cobertura espacial, especialmente en zonas altas. En parte este requerimiento se va a resolver en la medida que estaciones de duración más cortas (existen 29 estaciones en total, pero solo 6 con larga duración de monitoreo) acumulen más datos. Sin embargo, no se observa la instalación de nuevas estaciones en zonas de mayor altura (relevante para la simulación de los procesos de acumulación y derretimiento de nieve y la evolución de los glaciares presentes en la cuenca).
2. Estaciones fluviométricas: Existe una sola estación de larga data de monitoreo fluviométrico en la cuenca (San Pedro en Cuchabrachi) y que tiene deficiencias respecto del monitoreo de crecidas. Se debe mejorar la calidad del registro en esa estación e incorporar nuevas estaciones que registren las condiciones fluviométricas en los ríos y quebradas del borde este de la cuenca. Se deben también realizar aforos a lo largo de estos ríos para identificar puntos de afloramiento y de infiltración de cauce.
3. Nivel de pozos y propiedades hidráulicas de suelos: Pese a que existe un gran número de pozos de monitoreo (manejados en su gran mayoría por empresas mineras), estos están concentrados en la zona sur este de la cuenca (zona del salar y Monturaqui). Existe escasa información respecto de niveles en la zona norte del acuífero del salar. Por otra parte, se han realizado análisis de propiedades hidráulicas de los suelos en la zona del Salar y Monturaqui, pero faltan análisis comparables en la zona de las cuencas laterales.

III.8.2.1.2 Recomendaciones en mejoras en información respecto de toma de decisiones y usos actuales y futuros de recursos hídricos y salmuera

Por otra parte, existen brechas de información respecto de toma de decisiones y usos actuales y futuros de recursos hídricos y salmuera en la cuenca. Estas brechas pueden ser cubiertas a través de procesos participativos y de monitoreo respecto del uso del agua. Algunos ejemplos de estas brechas son las siguientes:

1. Superficie cultivada y tipo de riego: La información revisada a escala comunal no permite distinguir las diferentes condiciones de riego que existen en la cuenca. Es esperable que la actualización del censo agropecuario y los estudios que desarrolla la CNR al respecto permitan suplir esta brecha. Se requiere

información respecto de las expectativas de crecimiento de la actividad agrícola en la cuenca. Potencialmente esta brecha se puede suplir en el trabajo participativo del PEGH.

2. Consumo de agua potable para la población residente y flujo de turistas: Se requiere un estudio que determine cuáles son las tasas de consumo de agua potable por parte de la población que reside de manera permanente y temporal en la cuenca. Adicionalmente se requiere tener una mejor caracterización del flujo de visitantes asociados a la actividad turística en la cuenca. Por el momento se cuenta con información secundaria indirecta como por ejemplo la asistencia a paraqués nacionales. Se debe también proyectar las expectativas de crecimiento de esta actividad especialmente en el contexto de la actual pandemia COVID-19. Potencialmente esta brecha también se puede suplir en el trabajo participativo del PEGH.

3. Implementación de los agentes en el ABM: La implementación realizada del actor "institucionalidad ambiental", "operador minero" (unidad fiscalizable), y "actor local" se basó en un trabajo de talleres realizados durante el proyecto. Esta implementación puede enriquecerse y complementarse con talleres con actores claves (e.g., comunidades indígenas y operadores mineros) en la cuenca en el marco del proceso participativo del PEGH.

III.8.2.2 Recomendaciones en desarrollo de modelos

En este proyecto se han logrado importantes avances en el trabajo de desarrollo y acople de modelos para representar los distintos componentes del ciclo hidrológico en la cuenca del Salar de Atacama. Sin embargo, quedan algunas brechas relevantes que pueden ser suplidas con estudios posteriores:

1. Modelación de flujo con densidad variable: Pese a los esfuerzos por desarrollar una herramienta de modelación de flujo con densidad variable a escala regional (en tres dimensiones) con la plataforma SWI2 quedan brechas pendientes asociadas a la resolución espacial de las herramientas utilizadas e información que permita validar los resultados. De esta manera se sigue la estrategia utilizada por CORFO-Amphos21 (2021) de modelar esta condición en perfiles bidimensionales ubicados en sectores estratégicos de la zona sur de la cuenca. Potencialmente se pueden modificar las condiciones del modelo MODFLOW de base para poder desarrollar este tipo de modelo.

2. Acople modelo en base a agentes (ABM) a modelo de base física: En este proyecto se ha presentado un prototipo de ABM implementado sobre una condición hipotética de cuenca endorreica. Validando los procesos de toma de decisión a través de talleres con actores locales se puede implementar el módulo social desarrollado en el modelo de base física de la cuenca del Salar de Atacama. En su defecto es posible implementar algunos componentes claves como por ejemplo los Planes de Alerta Temprana.

3. Modelo ecológico integrado: en la modelación de las condiciones hidrológicas

a nivel superficial se han implementado algunos procesos ecológicos claves como por ejemplo la evapotranspiración de la vegetación. Sin embargo, se requiere el acople con otras herramientas y determinar información clave, como por ejemplo las batimetrías de sistemas lagunares e información crítica para representar variables ecológicas de la biota, para poder aspirar a tener modelos numéricos ecológicos integrados que permitan simular el estado de ecosistemas clave frente a cambios en componentes del ciclo hidrológico.

III.9 Conclusiones

En el presente capítulo se presentan algunas de las conclusiones principales del trabajo de formulación y ejecución del proyecto: **Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama**. Esta etapa de formulación y ejecución consistió principalmente en el desarrollo de una herramienta de modelación integrada a nivel de hidrología superficial y subterránea y un modelo conceptual de como este tipo de herramientas de base física pueden además acoplarse con modelos que representan la toma de decisiones de actores usuarios de los recursos hídricos y la institucionalidad asociada a la gestión de estos recursos.

La herramienta integrada de base física se desarrolló utilizando los modelos WEAP (modelo de hidrología superficial), MODFLOW (modelo de hidrogeología subterránea) y SEAWAT (modelo acoplado de flujo de agua subterránea y transporte de solutos) quedando de esta manera desarrollada una herramienta con las características técnicas básicas de los modelos que la DGA se encuentra desarrollando como base para la construcción de Planes Estratégicos de Gestión Hídrica (PEGH) en distintas cuencas del país.

El desarrollo del modelo hidrológico superficial se construye tomando en cuenta cuatro consideraciones conceptuales de base:

1. Simulación de los procesos hidrológicos en base a unidades de modelación climáticamente homogéneas distribuidas en la zona de las cuencas laterales y el salar de la cuenca del Salar de Atacama. Estas unidades de modelación llamadas catchments contienen en su interior distintos tipos de coberturas y usos de suelo con parámetros hidrológicos propios que permiten simular su rol en el ciclo hidrológico.
2. Simulación de procesos hidrológicos tomando en cuenta la variabilidad climática a un paso de tiempo diario y considerando series de tiempo de al menos 30 años seguidos para poder representar de manera adecuada la variabilidad interanual y estacionalidad climática. Adicionalmente, el modelo se construye con la capacidad de poder representar proyecciones de cambio climático futuro. De esta manera el modelo también puede representar las condiciones hidrológicas esperadas en el futuro en la cuenca.
3. Simulación explícita de los procesos de interacción entre río y acuífero tanto a nivel de los acuíferos (o zonas saturadas) que existen a nivel subterráneo en las cuencas laterales como también la interacción de estas zonas saturadas con el acuífero presente en la zona central de la cuenca en el Salar. Este proceso permite generar las infiltraciones y afloramientos comunes en distintos ríos y quebradas de la zona lateral así como también la recarga a nivel superficial como lateral al acuífero del salar.
4. Simulación de las necesidades de los usuarios de recursos hídricos tomando en cuenta las necesidades de consumo final pero también otras consideraciones como las restricciones físicas (infraestructura) o legales (derechos) y la practica utilizada en la manera de responder a estas necesidades (ej. turnos de riego).

Teniendo en cuenta estas consideraciones se ha desarrollado un modelo que es capaz de representar de manera adecuada los procesos hidrológicos e hidrogeológicos relevantes.

Como en todo modelo, existen limitaciones relacionadas a la información disponible, escala del modelo y capacidad de las herramientas numéricas, entre otros. Por ejemplo, para poder representar espacialmente las coberturas vegetales y no vegetales presentes en la cuenca, fue necesaria la utilización de información adicional (estudio CEA para caracterizar mejor las zonas con vegetación y el trabajo del MMA para delimitar de mejor manera cuerpos de agua y vegas) para poder corregir y precisar los lugares con presencia de vegetación y cuerpos de agua. Esto cumple un papel importante a la hora de poder modelar aquella vegetación relevante, como lo son los bosques de tamarugos presentes en el sector de Tambillo y las áreas cultivadas por los diferentes regantes de la cuenca. Es importante la representación de la vegetación nativa que habita dentro de la zona del salar para los modelos propuestos. En este contexto destaca la elección de especies nativas representativas para cada tipo de cobertura, junto con sus parámetros particulares de cada una. La elección de algunas especies en particular busca incluir aquellas taxa que son abundantes y que poseen información apropiada como para ser incorporadas en los modelos. Este esfuerzo por incluir especies nativas ayuda a acercarse un poco más a la realidad local de la vegetación. Parte de la información que permita por ejemplo representar con mejor calidad los usos de recursos hídricos (ej. frecuencia de riego) puede ser obtenida en un proceso de revisión del modelo desarrollado en el marco del PEGH (DGA) para la cuenca del Salar de Atacama. Parte de esta información debe ser recopilada en el futuro a través de un programa de monitoreo que incluya algunas variables claves.

Las limitaciones del estudio guardan relación, entre otras, con la disponibilidad de datos en los aforos presentes en la cuenca, en donde, ante eventos de mayor precipitación, las estaciones no logran capturar el valor real de caudales. Esto limita al momento de poder comparar el caudal modelado versus el caudal real.

Respecto al cambio de motor modelo hidrogeológico y posterior acople entre los modelos hidrológico superficial e hidrogeológico subterráneo, se debe considerar que:

1. Se toma como base el modelo numérico de flujo construido, calibrado y validado por CORFO-Amphos21 (2021). Este modelo fue desarrollado con la versión USG de MODFLOW, sin embargo, WEAP no es compatible con esta versión. El manejo de MODFLOW con WEAP tiene otras restricciones, de las cuales, para los propósitos de este proyecto, destacan: a) WEAP es compatible únicamente con las versiones 2000, 2005 y NWT de MODFLOW, b) WEAP reparte caudales en el modelo MODFLOW de forma proporcional al tamaño de las celdas enlazadas y c) WEAP considera que los parámetros son constantes para los paquetes de evaporación y drenes de MODFLOW. Debido a estas restricciones, se compararon los resultados al replicar el modelo desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021) con las versiones 2005 y NWT de MODFLOW, controladas desde MODFLOW y controladas desde WEAP. Estos cuatro casos mostraron niveles y balances similares al modelo original. La principal diferencia entre las versiones está asociada a que MODFLOW-NWT y MODFLOW-USG tienen implementada una reducción de bombeos en celdas secas, característica que no está implementada en MODFLOW-2005, generando una subestimación de los niveles en esta última versión. Respecto al manejo de MODFLOW desde WEAP, adicional a la diferencia por reducción de bombeo, se observaron leves diferencias

en niveles y balances por la forma en que WEAP reparte los caudales y a que no se puede imponer variabilidad estacional en la altura de drenes ni en parámetros de evaporación. Los resultados de las versiones MODFLOW manejadas por WEAP mostraron ser satisfactorios para considerar un acople WEAP-MODFLOW integrado, siendo la versión MODFLOW-NWT de preferencia para este acople.

2. Al acoplar el modelo hidrológico superficial con la versión MODFLOW-NWT, los resultados mostraron ser consistentes con los niveles medidos. Sin embargo, se requirió de un reajuste de la conductividad hidráulica en la zona sur y este del modelo. La validación del modelo WEAP-MODFLOW integrado mostró estadísticos similares a los obtenidos originalmente por CORFO-Amphos21 (2021), lo que muestra que no hay una degradación de la calidad del modelo. El modelo WEAP-MODFLOW integrado es una herramienta que permitirá estudiar proyecciones climáticas dependientes de forzantes climáticas, en lugar de imponer caudales de recarga sin relación con variabilidad climática. De todos modos, esta herramienta es perfectible en la medida que se lleven a cabo monitoreos en zonas con poca densidad de puntos para comparar el modelo, como lo es el sector norte del modelo numérico.
3. El modelo de hidrología superficial y subterránea (WEAP-MODFLOW) fue construido con herramientas que logran explicar los distintos datos medidos en la cuenca, pero no dejan de ser una simplificación de un modelo conceptual. Entre las simplificaciones más importantes se encuentran: 1) la limitada resolución espacial para la caracterización de coberturas y uso de suelos, 2) la limitada representación de ecosistemas sensibles, 3) la resolución espacial de la grilla del modelo tridimensional de flujo y 4) la definición de niveles equivalentes de salmuera (densidad constante) para la modelación de flujo subterráneo, cuando en realidad el sistema posee densidad variable. Estas simplificaciones deben tenerse en cuenta el utilizar la herramienta y esta debe ser considerada para simular procesos a una escala regional, en términos de tendencias generales para los caudales y niveles piezométricos simulados. De este modo, los niveles no deben interpretarse a escala local ni con precisión centimétrica, por lo que esta herramienta no debería usarse para la evaluación de la implementación operacional de umbrales tanto del Plan de Contingencia (PC) o del Plan de Alerta Temprana (PAT).

Para el estudio de la dinámica de la interfaz salina (flujos con densidad variable) se presentan los resultados de la implementación del modelo de simulación SEAWAT utilizado por CORFO-Amphos21 (2021) destacándose una representación similar en los perfiles bidimensionales seleccionados para caracterizar estos procesos en la cuenca. Estos modelos corresponden a una simplificación bidimensional de un funcionamiento tridimensional, cuyos resultados deben tomarse de modo referencial. Adicionalmente, el código utilizado permite la representación de la curva de evapotranspiración como un único segmento y no se incorporó la simulación de procesos de precipitación/disolución (transporte reactivo). Estos perfiles permiten evaluar, de forma general, tendencias en los niveles, concentraciones y desplazamientos de la interfaz salina simulados. De este modo, estos valores no deben ser utilizados para evaluar efectos específicos en los sistemas de protección ambiental o sistemas lagunares (funcionamiento de los sistemas lagunares, el cual es tridimensional y obedece a una relación con cuerpos de agua superficiales y

subterráneos, cambios en la ubicación de las lagunas, desaparición de estas, entre otros), los cuales requieren de herramientas más complejas y construidas para ello.

Por otra parte, se presentan los resultados de la primera experiencia de representar a nivel regional las variaciones en densidad variable de agua producto de los cambios en salinidad en el acuífero de la cuenca del Salar de Atacama. Esta experiencia se desarrolló utilizando el paquete SWI2 de MODFLOW. Los resultados de replicar el modelo desarrollado por CORFO-Amphos21 (2021) muestran que SWI2 tiene la capacidad de representar la tendencia en la evolución de niveles y de ubicación de la interfaz salina. Los resultados obtenidos con SWI2 muestran similitudes con los perfiles y ubicación de drenes estimados por CORFO-Amphos21 (2021). Adicionalmente, los resultados son consistentes en mostrar una disminución en los niveles y altura de la interfaz en la zona de extracciones, junto a un retroceso de la cuña salina hacia el núcleo posterior al inicio de las extracciones. El paquete SWI2 de MODFLOW muestra ser una alternativa atractiva para acoplar el modelo de flujo de agua a un modelo de densidad variable, ambos tridimensionales, para estudiar el comportamiento de la cuenca del Salar de Atacama. Sin embargo, es necesario invertir mayores esfuerzos para entender el funcionamiento del paquete SWI2 y obtener balances satisfactorios. Se realizan una serie de recomendaciones al respecto.

A través de los resultados obtenidos, y considerando las limitaciones destacadas, se sugiere el uso del modelo WEAP-MODFLOW acoplado como herramienta de base para el desarrollo del PEGH que desarrolla la DGA en la cuenca del Salar de Atacama. Se sugiere por otra parte representar la dinámica de la interfaz salina en perfiles bidimensionales representados por el modelo SEAWAT a través del trabajo de CORFO-Amhos21 (2021).

Finalmente se ha presentado en este informe la potencialidad de acoplar a un modelo de base física módulos explícitos que representen decisiones que toman actores en función de variables biofísicas que pueden observar (monitorear) en una cuenca. En específico se ha implementado un modelo conceptual piloto en base a agentes que contiene un módulo físico que representa de manera simplificada los flujos de agua a nivel subterráneo en una cuenca endorreica y un modelo social que representa el proceso de toma de decisiones asociado a la institucionalidad ambiental existente en Chile. Este es uno de los distintos procesos de toma de decisiones que pueden ser incorporados en un modelo de agentes para una cuenca como la del Salar de Atacama. Los otros procesos corresponden a, por ejemplo, decisiones tomadas por distintos usuarios del agua (e.g., empresas mineras o regantes), y otros aspectos de la institucionalidad (e.g., asignación y fiscalización de derechos de agua). En su actual implementación, el modelo es capaz de capturar y mostrar la retroalimentación entre la toma de decisiones y el ambiente biofísico (i.e., como las decisiones afectan variables del ambiente y como estas variables cambian la toma de decisiones).

El desarrollo de modelos es una actividad en constante evolución que va avanzando en la medida que se genera nuevo conocimiento acerca del estado y cambio en variables biofísicas y socio económicas y del funcionamiento de los sistemas interconectados en un sistema integrado como es una cuenca hidrológica. Se sugieren en este proyecto recomendaciones respecto del tipo de información por incorporar en etapas futuras y

posibles modelos y su interconexión que permitan apoyar la gestión y enfrentar los futuros desafíos relacionados a los recursos hídricos y la salmuera en una cuenca como la del Salar de Atacama. Se sugiere en este sentido seguir desarrollando este tipo de herramientas como, por ejemplo, los modelos físicos integrados o los modelos en base a agentes. Estas herramientas pueden incorporarse para los futuros desarrollos de los PEGH de la DGA. De esta manera se puede interactuar con distintos actores para poder incorporar sus percepciones respecto del proceso de toma de decisiones y por otra parte acoplar los módulos sociales con la versión finalizada del modelo físico integrado.

Referencias

ACERA, (2020). ACERA Estadísticas. https://acera.cl/estadisticas/

Acevedo, E., Ortiz, M., Franck, N., & Sanguineti, P. (2007). Relaciones hídricas de Prosopis tamarugo Phil. Uso de isótopos estables. Universidad de Chile. Serie Ciencias Agronómicas No 14.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 298(0).

AMAKÁIK. 2017. Estudio de un modelo conceptual ecológico para la cuenca del Salar de Atacama. Informe 1: Análisis crítico de antecedentes ambientales registrados para la Cuenca del Salar de Atacama.

Amulén - Centro de Cambio Global UC (2019). Pobres de Agua: Radiografía del agua rural en Chile.

An, L. (2012). Modeling human decisions in coupled human and natural systems: Review of agent-based models. Ecological Modelling, 229, 25-36. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.07.010

An, L., Grimm, V., & Turner II, B. L. (2020). Editorial: Meeting Grand Challenges in Agent-Based Models. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 23(1), 13. https://doi.org/10.18564/jasss.4012

Antúnez, B., & Felmer, E. (2009). Boletín del Nodo de Riego en el Secano, Región de O´Higgins. Litueche, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Boletín INIA N° 190, 120p.

Arcadis. (2016). Diagnóstico Plan Estratégico Para La Gestión De Los Recursos Hídricos, Región De Antofagasta

Argus. (2019). Lithium hydroxide demand to overtake carbonate: AABC. Argus, 1–7. https://www.argusmedia.com/en/news/1836977-lithium-hydroxide-demand-to-overtake-carbonate-aabc

AUSTRALIA UNLIMITED (2018). The Lithium-Ion Battery Value Chain: New Economy Opportunities For Australia.

Axelrod, R. M. (Ed.). (1976). Structure of decision: The cognitive maps of political elites. Princeton University Press.

Bakker, M. (2003). A Dupuit formulation for modeling seawater intrusion in regional aquifer systems. Water Resources Research, 39(5). https://doi.org/10.1029/2002WR00171

Bakker, M., Schaars, F., Hughes, J.D., Langevin, C.D., Dausman, A.M., 2013. Documentation of the seawater intrusion (SWI2) package for MODFLOW: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A46, 47 p., https://pubs.usgs.gov/tm/6a46/.

Baldassarre, G. D., Sivapalan, M., Rusca, M., Cudennec, C., Garcia, M., Kreibich, H., Blöschl, G., (2019). Socio-hydrology: Scientific Challenges in Addressing a Societal Grand Challenge. Water Resources Research, 0(ja). https://doi.org/10.1029/2018WR023901

Balke, T., & Gilbert, N. (2014). How Do Agents Make Decisions? A Survey. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 17(4), 13. https://doi.org/10.18564/jasss.2687

Bambach, N., Morales-Moraga, D., MEZA, F. 2019. Capítulo 5 Tendencias y Proyecciones de Cambio Climático, en "Cambio climático en Chile: Ciencia, Mitigación y Adaptación". Centro UC de Cambio Global. ISBN 978-956-14-2422-7

Banco Central, (2018). Cuentas Nacionales de Chile 2013-2018.

Banta, E. R., (2000). MODFLOW-2000: The US Geological Survey Modular Ground-water Model--documentation of Packages for Simulating Evapotranspiration with a Segmented Function (ETS1) and Drains with Return Flow (DRT1) (No. 466). US Department of the Interior, US Geological Survey.

Barthel, R., & Banzhaf, S. (2016). Groundwater and Surface Water Interaction at the Regional-scale – A Review with Focus on Regional Integrated Models. Water Resources Management, 30(1), 1-32. https://doi.org/10.1007/s11269-015-1163-z

Batagelj, V., Mrvar, A., & Zaveršnik, M. (1999). Partitioning Approach to Visualization of Large Graphs. En J. Kratochvíyl (Ed.), Graph Drawing (pp. 90-97). Springer Berlin Heidelberg

Becken, S. (2014). Water equity – contrasting tourism water use with that of the local community. Water Resources and Industry, 7–8 (2014), pp. 9-22, 10.1016/j.wri.2014.09.002

Bedekar, V., Morway, E.D., Langevin, C.D., and Tonkin, M., (2016), MT3D-USGS version 1: A U.S. Geological Survey release of MT3DMS updated with new and expanded transport capabilities for use with MODFLOW: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A53, 69.

Biblioteca del Congreso Nacional (BCN), (2017). Reportes Comunales. Disponible en: https://reportescomunales.bcn.cl/2017/index.php/Categor%C3%ADa:Comunas

Biblioteca Nacional de Chile. Licán Antai. Memoria Chilena. Disponible en http://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-722.html. Accedido en 8/6/2020.

Boisier, J. P., Alvarez-Garreton, C., Cepeda, J., Osses, A., Vasquez, N., & Rondanelli, R. (2018). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for hydroclimatic research in Chile. EGU General Assembly Conference Abstracts, 19739.

Bolados, P. (2014). Los conflictos etnoambientales de "pampa colorada" y "el tatio" en el salar de atacama, norte de chile. procesos étnicos en un contexto minero y turístico transnacional. Estudios Atacameños (48) (2014), pp. 229-248.

Brown, E., Dudley, N., Lindhe, A., Muhtaman, D., Stweart, C., & Synnott, T. (2013). Common guidance for the identification of High Conservation Values, HCV Resources Network.

Bousquet, F., & Le Page, C., (2004). Multi-agent simulations and ecosystem management: A review. Ecological Modelling, 176(3-4), 313-332. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.01.011

Boutt, D. F., Hynek, S. A., Munk, L. A., & Corenthal, L. G., (2016). Rapid recharge of fresh water to the halite-hosted brine aquifer of Salar de Atacama, Chile. Hydrological Processes, 30(25), 4720-4740.Cade-Idepe Consultores en Ingeniería (2014). Diagnóstico y Clasificación de Los Cursos y Cuerpos de Agua Según Objetivos de Calidad. Realizado para DGA.

Budds, J. (2009). The 1981 Water code: the impacts of private tradable water rights on peasant and indigenous communities in northen Chile. W.L. Alexander (Ed.), Lost in the Long Transition: Struggles for Social Justice in Neoliberal Chile, Lexington Books, Lanham (2009), pp. 41-60

Calderón, G., Garrido, M., & Acevedo, E. (2015). Prosopis tamarugo Phil.: a native tree from the Atacama Desert groundwater table depth thresholds for conservation. Revista chilena de historia natural, 88(1), 1-8.

Castañeda, G., & Guerrero, O. A. (2019). The importance of social and government learning in ex ante policy evaluation. Journal of Policy Modeling, 41(2), 273-293. https://doi.org/10.1016/j.jpolmod.2019.01.001

Castilla-Rho, J. C., Mariethoz, G., Rojas, R., Andersen, M. S., & Kelly, B. F. J., (2015). An agent-

based platform for simulating complex human–aquifer interactions in managed groundwater systems. Environmental Modelling & Software, 73, 305-323. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.08.018.

Castilla-Rho, Juan Carlos. (2017). Groundwater Modeling with Stakeholders: Finding the Complexity that Matters. Groundwater, 55(5), 620-625. https://doi.org/10.1111/gwat.12569

Castilla-Rho, Juan Carlos, Rojas, R., Andersen, M. S., Holley, C., & Mariethoz, G. (2017). Social tipping points in global groundwater management. Nature Human Behaviour, 1(9), 640-649. https://doi.org/10.1038/s41562-017-0181-7

CENSO, (2012). Resultados CENSO 2012.

CENSO, (2017). Resultados CENSO 2017 www.censo2017.cl/.

Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile (CCG-UC), & Stockholm Environment Institute (SEI). (2009). Guía Metodológica – Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP. Recuperado de http://www.weap21.org/downloads/Guia_modelacion_WEAP_Espanol.pdf

Centro de Ecología Aplicada (CEA). (2015). Diagnóstico y gestión ambiental integrada de humedales altoandinos.

Centro de Ecología Aplicada (CEA). (2017). Anexo IV. 2 Modelo de respuesta vegetacional. En Modelo biofísico para la evaluación de la respuesta vegetacional como función de la disponibilidad hídrica en sector sur del Salar de Atacama—Sector Tilopozo. Preparado para Minera Escondida Ltda. Antofagasta.

Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (2014). Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel Nacional.

Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), (2014). Memoria de Gestión Pro EcoServ San Pedro de Atacama

Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), (2018). Aspectos esenciales de la hidrología y gestión del agua: Comunidad Atacameña de Peine.

Ceola, S., Montanari, A., Krueger, T., Dyer, F., Kreibich, H., Westerberg, I., … Di Baldassarre, G., (2016). Adaptation of water resources systems to changing society and environment: A statement by the International Association of Hydrological Sciences. Hydrological Sciences Journal, 61(16), 2803-2817. https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1230674

Chatsko, M. (2020). Lithium Demand for Electric Vehicles Could Grow 599 % by 2025. 1–15. https://www.fool.com/investing/2020/03/24/lithium-demand-for-electric-vehicles-could-grow-59.aspx

CIREN, (2014). Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel Nacional.

CMZ-Agro Energía, (2018). Anexo 4.4 EIA Continuidad operacional Compañía Minera Zaldívar. Modelo Ecosistémico .

CMZ-GCF Ingenieros, (2018). Modelo del sistema hídrico de la subcuenca sur del salar de Atacama. EIA Continuidad operacional Compañía Minera Zaldívar.

CMZ-Steffen, Robertson and Kirsten, Inc, (1993). EIA Proyecto Zaldívar.

CNR-Amphos21, (2017). Estudio Básico Diagnóstico para desarrollar Plan de Gestión de Riego en la Región de Antofagasta.

CNR (2000). Diagnóstico y propuesta de fomento a la agricultura regada en la II región. Elaborado por Consorcio GEOFUN-PROCIVIL

CNR-Arrau Ingeniería EIRL, (2014). Estudio de Prefactibilidad Mejoramiento Sistema de Riego En Río San Pedro, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta. Informe Final.

CNR-Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. AC Ingenieros Consultores Ltda. (2003). Diagnóstico actual del riego y drenaje en Chile y su proyección. Informe Final. Diagnóstico del riego y drenaje en la II Región.

Cochilco, (2013). Compilación de informes sobre: Mercado del Litio, El Potencial del Litio en Salares del Norte de Chile. Comisión Chilena del Cobre, Subsecretaría de Minería, Santiago, Chile.

Cochilco, (2018). Mercado Internacional del Litio y su potencial en Chile. DEPP 28.

Cochilco, (2019). Informe Inversión en la minería chilena - Cartera de proyectos 2019 - 2028. DEPP 11.

Comisión Nacional de Energía (CNE), (2020). ANUARIO ESTADÍSTICO DE ENERGÍA 2019.

Comité de Agua Potable Rural de San Pedro de Atacama (CAPRA), (2015). Memoria Agua Potable Rural San Pedro de Atacama

Comité de Agua Potable Rural de San Pedro de Atacama (CAPRA), (2016). Memoria Agua Potable Rural San Pedro de Atacama

Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018). Modelo Hidrogeológico Consolidado Cuenca Salar de Atacama

Compañía Minera RioChilex-EDRA, (1999). Evaluación hidrogeológica acuífero sector Norte del Salar de Atacama. Informe Final. Modelación realizada por Waterloo Hydrogeological Latinoamerica:

Compañía RioChilex. Evaluación hidrogeológica acuífero sector Norte Salar de Atacama, Informe final. (1999).

CONAMA, (2003). Proyecto de estudio y Monitoreo del Recurso Hídrico de la Cuenca del Salar de Atacama, Antofagasta, Chile. Estudio solicitado por CONAMA (Comisión Nacional de Medio Ambiente) a las empresas: SQM (Sociedad Química y Minera de Chile), Minera Escondida Ltda. (Minera Escondida), CMZ (Compañía Minera Zaldívar) y SCL (Sociedad Chilena del Litio).

Corenthal, L. G., Boutt, D. F., Hynek, S. A., & Munk, L. A. (2016). Regional groundwater flow and accumulation of a massive evaporite deposit at the margin of the Chilean Altiplano. Geophysical Research Letters, 43(15), 8017-8025.

Comité de Minería No Metálica-Amphos21 (2018). Modelo Hidrogeológico Consolidado Cuenca Salar de Atacama.

CORFO. (2016). Resolución (A) N° 214 de 2016.

CORFO. (2018). Bases De Conciliación Proceso Arbitral CORFO | SQM Salar de Atacama (p. 20).

CORFO-AMAKÁIK, (2017a). Estudio de un Modelo Conceptual Ecológico para la Cuenca del Salar de Atacama. Informe 1: Análisis Crítico de Antecedentes Ambientales Registrados Para la Cuenca del Salar de Atacama.

CORFO-AMAKÁIK, (2017b). Estudio de un Modelo Conceptual Ecológico Para la Cuenca del Salar de Atacama. Informe 2 : definición, selección y justificación de componentes principales y/o variables influyentes a considerar en la formulación del Modelo Conceptual Ecológico de la Cuenca del Salar de Atacama.

CORFO-AMAKÁIK, (2018a). Informe 3: Modelo Conceptual Ecológico (MCE) de la Cuenca del Salar de Atacama.

CORFO-AMAKÁIK, (2018b). Informe 4: Principales aspectos de informes 1,2 y 3 e identificación de brechas para modelación en una futura etapa y propuesta.

CORFO-Amphos21. (2021). Actualización Modelo Hidrogeológicode la Cuenca del Salar de

Atacama.
CORFO-Gestión Ambiental Consultores (GAC) (2017). Estudio para el análisis y preparación de un plan de trabajo en relación a las distintas RCA sobre el Salar de Atacama. Informe Final.
Cornellà, O., Salas, J., Aravena, R., Guzmán, E., Guimerà, J., Tore, C., ... & Fock, A. (2009). Hidrogeologia de los sistemas lagunares del margen E del Salar de Atacama. Santiago, 22, S6_018.
Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI), (2014). Proyecto Áreas de Desarrollo Indígena del Norte de Chile. Informe Final.
Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI)-Ingeland, (2016). Proyecto Georeferenciación comunidades indígenas Zona Norte. Informe Final.
Corporación Nacional Forestal (CONAF), (2008). Actualización Plan de Manejo Participativo Reserva Nacional Los Flamencos.
CSIC, (2017). Cuarta actualización del modelo hidrogeológico del Salar de Atacama. SQM Salar S.A
DataWhell y CORFO, (2019). Estadísticas de economía, comercio, industria, empleo, ingresos e innovación, vivienda y desarrollo, demografía, salud, tasas de mortalidad y cívica de San Pedro de Atacama.
Davis (1964). The chemistry of saline waters by RA Krieger. Discussion. Ground Water, 2(1), 51.
Decuyper, M., Chávez, R. O., Copini, P., & Sass-Klaassen, U. (2016). A multi-scale approach to assess the effect of groundwater extraction on Prosopis tamarugo in the Atacama Desert. Journal of Arid Environments, 131, 25-34.
Dehghanipour, A. H., Zahabiyoun, B., Schoups, G., & Babazadeh, H. (2019). A WEAP-MODFLOW surface water-groundwater model for the irrigated Miyandoab plain, Urmia lake basin, Iran: Multi-objective calibration and quantification of historical drought impacts. Agricultural Water Management, 223, 105704. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.10570
Delliou, A.-L. L., Rodriguez, F., & Andrieu, H. (2009). Modélisation intégrée des flux d'eau dans la ville—Impacts des réseaux d'assainissement sur les écoulements souterrains. La Houille Blanche, 5, 152-158. https://doi.org/10.1051/lhb/2009068De los Ríos-Escalante, P. R. (2010). Crustacean Zooplankton Communities in Chilean Inland Waters. Crustaceana Monographs, 12, 109.
Demergasso, C., Escudero, L., Casamayor, E. O., Chong, G., Balague, V., & Pedros-Alio, C. (2008). Novelty and spatio-temporal heterogeneity in the bacterial diversity of hypersaline Lake Tebenquiche (Salar de Atacama). Extremophiles, 12, 491–504.
Denzau, A. T., & North, D. C. (1994). Shared Mental Models: Ideologies and Institutions. Kyklos, 47(1), 3-31. https://doi.org/10.1111/j.1467-6435.1994.tb02246.x
Departamento de Administración de Recursos Hídricos (DARH). (2014). Redefinición de la calificación red hidrográfica a nivel Nacional. Elaborado por el Centro de Información de Recursos Naturales.
DICTUC, (1998). Modelación de las reservas del Salar de Atacama para su incorporación en un plan de manejo de la mina. Estudio hidrológico, versión actualizada.
DICTUC, (2004). Modelo Hidrogeológico del Acuífero de Salmuera del Núcleo del Salar de Atacama. Descripción del modelo y simulaciones.
DICTUC, (2005). Hidrogeología de la II región y asesoría para la revisión de informes de estudios de evaluación de recursos hídricos.

Dirección de Planeamiento (DIRPLAN), (2011). Guía para la elaboración de Planes. Disponible en: http://www.dirplan.cl/centrodedocumentacion/Documents/Metodologia/Guia_Elaboracion_Planes_marzo_2011.pdf

Dirección General de Aguas (DGA), (1977). Balance hidrológico tentativo de la Cuenca del Salar de Atacama.

Dirección General de Aguas (DGA), (1978a). Banco Nacional de Aguas.

Dirección General de Aguas (DGA), (1978b). Clasificación de cuencas hidrográficas de Chile / Andrés Benítez Girón; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología; Humberto Peña T., inspector fiscal.

Dirección General de Aguas (DGA), (1986a). Evaporación desde salares: metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación en las regiones I y II. Publicación Interna, SDEH 86/4.

Dirección General de Aguas (DGA), (1986b). Balance Hidrológico Nacional.

Dirección General de Aguas (DGA), (1991). Catastro general de usuarios de aguas de los cauces afluentes al Salar de Atacama, Informe Final, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA), (1999). Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama, II región, Minuta Técnica N° 60, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA)- Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC (2009). Levantamiento Hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, regiones XV, I, II Y III. Etapa II.

Dirección General de Aguas (DGA)-GCF Ingenieros (2010). Actualización de la Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Derechos de Aprovechamiento en las Subcuencas Afluentes al Salar de Atacama. II Región.

Dirección General de Aguas (DGA), (2011). Estimación de Recarga en Cuencas Altiplánicas Seleccionadas, Informe Técnico, S.D.T. N° 334, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA), (2012a). Estimación de recarga en cuencas altiplánicas, Región de Atacama, Informe Técnico, S.D.T. N° 334, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA), (2012b). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Atacama, Informe Técnico, S.D.T. N° 324, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA)-Arrau Ingeniería EIRL, (2012). Diagnóstico plan estratégico para la gestión de los recursos hídricos, Región de Antofagasta, Informe Final, S.I.T. N° 291, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA)-Centro Interdisciplinario De Cambio Global UC, (2013). Actualización del Balance Hídrico Nacional Considerando Cambio Climático:

Diagnóstico, S.I.T. N° 313, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA), (2013). Análisis de la oferta hídrica del salar de Atacama. SDT N° 339. División de estudios y planificación, DGA

Dirección General de Aguas (DGA)-GCF, (2010). Actualización de la Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Derechos de Aprovechamiento en las Subcuencas Afluentes al Salar de Atacama. Región II., Informe Final, S.I.T. N° 210, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA)-ICASS, (2014). Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama, Informe Final, SIT N° 137, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA), (2016). Sistematización de información de los recursos hídricos del Salar de Atacama para un futuro plan de gestión, Informe Técnico, SDT N° 392, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA)-Arcadis, (2016). Diagnóstico Plan Estratégico Para La Gestión De Los Recursos Hídricos, Región De Antofagasta, Informe Final, S.I.T. N° 379, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA), (2017), Actualización del Balance Hídrico Nacional, SIT N° 417, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Resumen Ejecutivo, S.I.T. N° 445, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA)-Fundación para la Transferencia Tecnológica y Pontificia Universidad Católica de Chile, (2018). Aplicación De La Metodología De Actualización Del Balance Hídrico Nacional en Las Cuencas De Las Macrozonas Norte Y Centro, SIT N° 435. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación, Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA)-Laboratorio de Análisis Territorial (LAT), (2018). Diagnóstico Nacional de Organizaciones de Usuarios. S.I.T. N°422. Santiago, Chile.

Dirección General de Aguas (DGA)-UNTEC-PUC (2018). Actualización del Balance Hídrico Nacional, Parte II: Aplicación de la metodología de actualización del balance hídrico nacional en las cuencas de las macrozonas norte y centro.

Dirección General de Aguas (DGA). (2019). Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA. Recuperado de https://dga.mop.gob.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx.

Dirección General de Aguas (DGA)-DICTUC-SEI, (2019). Desarrollo De Herramienta Para El Análisis De Gestión En El Marco Del Plan Nacional De Recursos Hídricos. Realizado para DGA.

Dirección General de Aguas (DGA)-DICTUC, (2019). Migración De Modelos Hidrogeológicos Desarrollados En Visual-MODFLOW y Groundwater Vistas Hacia Su Estado Nativo De Código MODFLOW, Informe Entrega 1, S.I.T. N° 447, Ministerio de Obras Públicas,

Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile.
Dirección General de Aguas (DGA), (2020). Bases cartográficas del SIGIRH, del MOP-DGA.
Dirección General de Aguas (DGA BNASIGIRH) (2020). Servicio Hidrometeorológico Nacional. http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes
Dirección General de Aguas (DGA). (2020a). Plan Estratégico de Gestión Hídrica En La Cuenca Del Río Maipo. Dirección General de Aguas [Ejecutado Por ICASS, En Desarrollo]; 2020;
Dirección General de Aguas (DGA). (2020b). Plan Estratégico de Gestión Hídrica En La Cuenca Del Río Maule. Dirección General de Aguas [Ejecutado Por UTP Everis-Hidrogestión, En Desarrollo]; 2020.
Dirección General de Aguas (DGA). (2020c). Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca Del Río Aconcagua. Dirección General de Aguas [Desarrollado Por UTP Hídrica Eridanus]; 2020.
Dirección General de Aguas (DGA). (2020d). Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca Del Río Elqui. Dirección General de Aguas [Desarrollado Por UTP Hídrica Eridanus]; 2020.
Dirección General de Aguas (DGA). (2020e). Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca Del Río Choapa. Dirección General de Aguas [Desarrollado Por UTP Hídrica Eridanus]; 2020.
Dirección General de Aguas (DGA). (2020f). Plan Estratégico de Gestión Hídrica Cuenca Del Río Aconcagua. Dirección General de Aguas [Desarrollado Por UTP Hídrica Eridanus]; 2020.
Dorador, C., Meneses, D., Urtuvia, V., Demergasso, C., Vila, I., Witzel, K. P., & Imhoff, J. F. (2009). Diversity of bacteroidetes in high-altitude saline evaporitic basins in northern Chile. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 114, 1–11.
Dorador, C., Fink, P., Hengst, M., Icaza, G., Villalobos, A. S., Vejar, D., & Harrod, C., (2018). Microbial community composition and trophic role along a marked salinity gradient in Laguna Puilar, Salar de Atacama, Chile. Antonie van Leeuwenhoek, 111(8), 1361-1374.
Droubi, A., Al-Sibai, M., Abdallah, A., Zahra, S., Obeissi, M., Wolfer, J., Huber, M., Hennings, V., & Schelkes, K. (2008). A Decision Support System (DSS) for Water Resources Management, – Design and Results from a Pilot Study in Syria. Climatic Changes and Water Resources in the Middle East and North Africa, 199-225. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85047-2_16
Durán J. (2012). Modelación numérica y su contribución al estudio del comportamiento hidrogeológico del sector sw del acuífero del Salar de Atacama. Universidad de Chile.
Elena Lopez-Gunn, (2014). Rethinking integrated water resources management: Towards water and food security through adaptive management. En B. A. Willaarts (Ed.), Water for Food Security and Well-being in Latin America and the Caribbean: Social and Environmental Implications for a Globalized Economy (1.a ed., pp. 385-417). https://doi.org/10.4324/9781315883137
Elmes, M., (2015). Amenaza debido a eventos de precipitación máxima entre los 21° y 34° latitud Sur de Chile Continental: Análisis de umbrales hidrometeorológicos, gatillantes de remoción en masa por flujos en la Cuenca del Río Copiapó.
Epstein, J. M., & Axtell, R. (1996). Growing artificial societies: Social science from the bottom up. Brookings Institution Press.
Exploraciones San Pedro S.A. (EPSA)-Gestionare Consultores, (2018). Plan de Alerta Temprana para el seguimiento de la extracción de agua subterránea en el norte del

Salar de Atacama.
Farías, M. E., Contreras, M., Rasuk, M. C., Kurth, D., Flores, M. R., Poiré, D. G., … Visscher, P. T. (2014). Characterization of bacterial diversity associated with microbial mats, gypsum evaporites and carbonate microbialites in thalassic wetlands: Tebenquiche and La Brava, Salar de Atacama, Chile. Extremophiles, 18(2), 311–329.
Farías, M. E., Rasuk, M. C., Gallagher, K. L., Contreras, M., Kurth, D., Fernandez, A. B., ... & Visscher, P. T., (2017). Prokaryotic diversity and biogeochemical characteristics of benthic microbial ecosystems at La Brava, a hypersaline lake at Salar de Atacama, Chile. PloS one, 12(11).
Farías, M., (2018). Extremófilos y origen de la vida en Atacama. Realizado para el Centro de Ecología Aplicada (CEA).
Flexer, V., Baspineiro, C. F., & Galli, C. I. (2018). Lithium recovery from brines: A vital raw material for green energies with a potential environmental impact in its mining and processing. Science of The Total Environment, 639, 1188-1204.
Frezze & Cherry (1979). Groundwater: Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall.
Fuente, A. D. L., & Ninóo, Y. (2010). Temporal and spatial features of the thermohydrodynamics of shallow salty lagoons in northern Chile. Limnology and oceanography, 55(1), 279-288.
Fundación Amulén, (2019). Pobres de agua. Radiografía del agua rural de Chile: Visualización de un problema oculto.
Gajardo, R. (1994). La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica. Editorial Universitaria, Santiago, Chile, 33.
Gajardo, G., & Redón, S. (2019). Andean hypersaline lakes in the Atacama Desert, northern Chile: Between lithium exploitation and unique biodiversity conservation. Conservation Science and Practice, 1(9), e94.
Gallardo, M.C. Socio-Ecological Inequality and Water Crisis: Views of Indigenous Communities in the Alto Loa Area. Environ. Justice 2016, 9, 9–14.
GCF Ingenieros Limitada (2010). Actualización de la Evaluación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Derechos de Aprovechamiento en las Subcuencas Afluentes al Salar de Atacama. Región II. DGA.
Giabbanelli, P. J., Gray, S. A., & Aminpour, P. (2017). Combining fuzzy cognitive maps with agent-based modeling: Frameworks and pitfalls of a powerful hybrid modeling approach to understand human-environment interactions. Environmental Modelling & Software, 95, 320-325. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.040
Gilbert, N., Ahrweiler, P., Barbrook-Johnson, P., Narasimhan, K. P., & Wilkinson, H. (2018). Computational Modelling of Public Policy: Reflections on Practice. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 21(1), 14. https://doi.org/10.18564/jasss.3669Gobierno de Chile, (2019). Plan Región Antofagasta 2018-2022.
Gobierno Regional de Antofagasta (GORE Antofagasta), (2009). Estrategia Regional de Desarrollo 2009-2020.
Gobierno Regional de Antofagasta (GORE Antofagasta), (2012). Estrategia Regional de Innovación para el período 2012-2020.
Golder Associates. (2017). Anexo IV.1 Modelo Hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.
González, L. (2011). Gestión del territorio: un método para la intervención territorial. Facultad

de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 93p.
Graham, D. N., Chmakov, S., Sapozhnikov, A., & Gregersen, J. B. (2006). "OpenMI Coupling of MODFLOW and MIKE 11" En: MODFLOW and More 2006, Managing Ground Water Systems. Conference Proceedings. May 21-24. V2, 727-731.
Gray, S. A., Gray, S., Cox, L. J., & Henly-Shepard, S. (2013). Mental Modeler: A Fuzzy-Logic Cognitive Mapping Modeling Tool for Adaptive Environmental Management. 2013 46th Hawaii International Conference on System Sciences, 965-973. https://doi.org/10.1109/HICSS.2013.399
Gray, S., Chan, A., Clark, D., & Jordan, R. (2012). Modeling the integration of stakeholder knowledge in social–ecological decision-making: Benefits and limitations to knowledge diversity. Ecological Modelling, 229, 88-96. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.09.011
Grimm, V. (2005). Pattern-Oriented Modeling of Agent-Based Complex Systems: Lessons from Ecology. Science, 310(5750), 987-991. https://doi.org/10.1126/science.1116681
Groeneveld, J., Müller, B., Buchmann, C. M., Dressler, G., Guo, C., Hase, N., Hoffmann, F., John, F., Klassert, C., Lauf, T., Liebelt, V., Nolzen, H., Pannicke, N., Schulze, J., Weise, H., & Schwarz, N. (2017). Theoretical foundations of human decision-making in agent-based land use models – A review. Environmental Modelling & Software, 87, 39-48. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.10.008
Gundermann, Hans, & Göbel, Barbara. (2018). Comunidades indígenas, empresas del litio y sus relaciones en el Salar de Atacama. Chungará (Arica), 50(3), 471-486. https://dx.doi.org/10.4067/S0717-73562018005001602
GWP, (2000). Integrated Water Resources Management. Technical Advisory Committee (TAC).
Hadded, R., Nouiri, I., Alshihabi, O., Maßmann, J., Huber, M., Laghouane, A., Yahiaoui, H., & Tarhouni, J. (2013). A Decision Support System to Manage the Groundwater of the Zeuss Koutine Aquifer Using the WEAP-MODFLOW Framework. Water Resources Management, 27(7), 1981-2000. https://doi.org/10.1007/s11269-013-0266-7
Haer, T., Botzen, W. J. W., de Moel, H., & Aerts, J. C. J. H. (2017). Integrating Household Risk Mitigation Behavior in Flood Risk Analysis: An Agent-Based Model Approach: Integrating Household Risk Mitigation. Risk Analysis, 37(10), 1977-1992. https://doi.org/10.1111/risa.12740
Harbaugh, A., Banta, E., Hill, M., & McDonald, M., (2000). MODFLOW-2000, The US Geological Survey Modular Ground-Water Model-User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. In Open-file Report 00-92. wipp.energy.gov.
Harbaugh, A.W., (2005), MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model -- the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/
Houston, John, (2006a). Evaporation in the Atacama Desert: An empirical study of spatio-temporal variations and their causes. International Journal of Hydrology 330.
Houston, John, (2006b). Variability of precipitation in the Atacama Desert: its causes and hydrological impact. International Journal of Climatology 26.
Hurrell, J., Visbeck, M., & Pirani, P. (2011). WCRP Coupled Model Intercomparison Project-Phase 5-CMIP5. Clivar Exchanges, 16(56).
Hydrotechnica (1988). Evaluation of brine reserves in the Salar de Atacama. Salar de Atacama. Phase 3B. Hydrological Investigations. Volume I. Report Text. 5.1076/R7. Minsal

Ltda. Santiago de Chile
Ilustre Municipalidad de San Pedro de Atacama-Mapocho Consultores, (2017). Actualización Plan de Desarrollo Comunal de San Pedro de Atacama 2017-2021.
Instituto Nacional de Estadísticas (INE), (2002). Resultados Generales Censo de Población y Vivienda Chile 2002. Santiago de Chile.
Instituto Nacional de Estadísticas, (2007). VII Censo Agropecuario y Forestal.
Instituto Nacional de Estadísticas, (2018). Encuesta Mensual de Alojamiento Turístico. Actividades de alojamiento para estancias cortas año 2017.
Instituto Nacional de Estadísticas (INE), (2016). Encuesta Mensual de Alojamiento Turístico. Actividades de alojamiento para estancias cortas año 2015.
Instituto Nacional de Estadísticas (INE), (2017). Resultados Generales Censo de Población y Vivienda Chile 2017. Santiago de Chile.
Instituto Nacional de Estadísticas, (2020). Encuesta Mensual de Alojamiento Turístico Actividades de alojamiento para estancias cortas.
Jennings, N. R., Sycara, K., & Wooldridge, M. (1998). A Roadmap of Agent Research and Development. 32.
Jiménez, D. (2018). Lithium Market Outlook (Issue August). Foro del Litio.
Johnson, J., (2009). Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, Regiones XV, I, II y III. Realizado para DGA.
Johnson-Laird, P. N. (2010). Mental models and human reasoning. Proceedings of the National Academy of Sciences, 107(43), 18243-18250. https://doi.org/10.1073/pnas.1012933107
Kaiser, K. E., Flores, A. N., & Hillis, V. (2020). Identifying emergent agent types and effective practices for portability, scalability, and intercomparison in water resource agent-based models. Environmental Modelling & Software, 127, 104671. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104671
Kampf, S.K., (2002). Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. MS Thesis, University of Nevada, Reno, p. 130.
Kampf, S. K., Tyler, S. W., Ortiz, C. A., Muñoz, J. F., & Adkins, P. L., (2005). Evaporation and land surface energy budget at the Salar de Atacama, Northern Chile. Journal of Hydrology, 310(1-4), 236-252.
Kampf, Stephanie; Tyler, Scott, (2006). Spatial characterization of land surface energy fluxes and uncertainty estimation at the Salar de Atacama, northern Chile.
Kendall, M.G., (1975). Rank correlation methods, 4th ed. London: Charles Griffin
Kim, N. W., Chung, I. M., Won, Y. S., & Arnold, J. G. (2008). Development and application of the integrated SWAT–MODFLOW model. Journal of Hydrology, 356(1), 1-16. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.024
Köppen, W. P. (1936). Das geographische System der Klimate: mit 14 Textfiguren. Borntraeger.
Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. International Journal of Man-Machine Studies, 24(1), 65-75. https://doi.org/10.1016/S0020-7373(86)80040-2
Liang, X., and Z. Xie, (2001): A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models, Advances in Water Resources, 24(9-10), 1173-1193.
Liu, W., Agusdinata, D. B., & Myint, S. W. (2019). Spatiotemporal patterns of lithium mining and

environmental degradation in the Atacama Salt Flat, Chile. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 80, 145-156

Lu, S., Frith, J., Storage, E., & Analyst, S. (2019). Will the Real Lithium Demand Please Stand Up ? Challenging the 1Mt-by-2025 Orthodoxy. Bloomberg NEF, 1–5.

Marazuela, M. A., Vázquez-Suñè, E., Custodio, E., Palma, T., Garcia-Gil, A., & Ayora, C., (2018). 3D mapping, hydrodynamics and modelling of the freshwater-brine mixing zone in salt flats similar to the Salar de Atacama (Chile). Journal of Hydrology, 561, 223-235.

Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T., (2019). Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. Science of The Total Environment, 651, 668-683.

Marazuela, M. A., Vázquez-Suñé, E., Ayora, C., García-Gil, A., & Palma, T., (2019). The effect of brine pumping on the natural hydrodynamics of the Salar de Atacama: The damping capacity of salt flats. Science of The Total Environment, 654, 1118-1131.

Mardones, L., (1985). Estudio de evaporación en el Salar de Atacama

Mardones L., (1986). Características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama. Consultado en: El litio un nuevo recurso para Chile (Lagos, 1986). Universidad de Chile. Departamento Ingeniería de Minas.

Mardones, L., (1997). Investigación de Recursos Hidráulicos en el Norte Grande (CHI / 69 / 535)

Marquet, P. A., (1998). Los ecosistemas del desierto de Atacama y área andina adyacente en el norte de Chile.

Mehryar, S., Sliuzas, R., Schwarz, N., Sharifi, A., & van Maarseveen, M. (2019). From individual Fuzzy Cognitive Maps to Agent Based Models: Modeling multi-factorial and multi-stakeholder decision-making for water scarcity. Journal of Environmental Management, 250, 109482. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109482

Middlemis, H., Merrick, N. P., Ross, J. B., & Rozlapa, K. L. (2002). Groundwater modelling guidelines for Australia: An overview of the need for and use of the guidelines. International Groundwater Conference, Balancing the Groundwater Budget. Darwin, NT, Australia.

Millenium Ecosystem Assessment, (2005). Human Well-Being and Sustainable Management IN San Pedro DE Atacama-Chile. Santiago.

Miller, J. H., & Page, S. E. (2007). Complex adaptive systems: An introduction to computational models of social life. Princeton University Press.

Minera Escondida Ltda.-Centro de Ecología Aplicada, (2017). Modelo biofísico para la evaluación de la respuesta vegetacional como función de la disponibilidad hídrica en sector sur del Salar de Atacama – Sector Tilopozo.

Minera Escondida Ltda.-Golder, (2016). Plan de Alerta Temprana para el Acuífero. Monturaqui- Negrillar-Tilopozo.

Minera Escondida Ltda.-Golder, (2017). Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Monturaqui.

Minera Escondida Ltda.-Golder, (2018). Adenda EIA Proyecto Monturaqui.

Ministerio de Desarrollo Social (MIDEPLAN), (2017). CASEN 2017: Encuesta de caracterización socioeconómica nacional. Santiago, Chile: MIDEPLAN.

Ministerio del Medio Ambiente, (2010). Fichas de antecedentes de especies.

Ministerio del Medio Ambiente, (2013). Diagnóstico y Evaluación: Estrategia Regional y Plan de Acción para la Conservación y Uso Sustentable de la Diversidad Biológica de la Región de Antofagasta.

Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2019). Volumen 2: Exposición, en "Determinación del riesgo de los impactos del Cambio Climático en las costas de Chile", Documento preparado por: Winckler, P.; Contreras-López, M.;Vicuña, S.; Larraguibel, C.; Mora, J.; Esparza, C.; Salcedo, J.; Gelcich, S.; Fariña, J. M.; Martínez, C.; Agredano, R.; Melo, O.; Bambach, N.; Morales, D., Marinkovic, C.; Pica, A., Santiago, Chile.

Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2020). Inventario Humedales. Archivo digital.

Ministerio del Medio Ambiente, (2020). Plataforma de Búsqueda en Áreas Protegidas. http://bdrnap.mma.gob.cl/buscador-rnap/#/busqueda?p=0

Ministerio de Obras Públicas, (MOP). (2011). Guía de Participación Ciudadana en Proyectos de infraestructura Para Pueblos Indígenas de la Macro Zona Norte

Ministerio de Obras Públicas, (2012). Plan Regional de Infraestructura y Gestión del Recurso Hídrico al 2021, Región de Antofagasta.

Montanari, A., Young, G., Savenije, H. H. G., Hughes, D., Wagener, T., Ren, L. L., … Belyaev, V. (2013). "Panta Rhei—Everything Flows": Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022. Hydrological Sciences Journal, 58(6), 1256-1275. https://doi.org/10.1080/02626667.2013.809088

Molina, F. (2012). Competing rationalities in water conflict: Mining and the indigenous community in Chiu Chiu, El Loa Province, northern Chile. Singapore Journal of Tropical Geography, 33, 93–107. doi:10.1111/j.1467-9493.2012.00451.x

Monteith, (1965). "Evaporation and environment". Symposia of the Society for Experimental Biology. 19: 205–224. PMID 5321565. Obtained from Forest Hydrology and Watershed Management – Hydrologie Forestiere et Amenagement des Bassins Hydrologiques (Proceedings of the Vancouver Symposium, August 1987, Actes du Co11oque de Vancouver, Aout 1987):IAHS-AISH Publ. no. 167, 1987. pp. 319–327.

Moran, B. J., Boutt, D. F., & Munk, L. A. (2019). Stable and Radioisotope Systematics Reveal Fossil Water as Fundamental Characteristic of Arid Orogenic-Scale Groundwater Systems. Water Resources Research, 55(12), 11295-11315.

Morgan, L. K., Bakker, M., & Werner, A. D. (2015). Occurrence of seawater intrusion overshoot. Water Resources Research, 51(4), 1989-1999. https://doi.org/10.1002/2014WR016329

Mpodozis, C; Blanco, N.; Jordan, T.E. y Gradeweg, M.C., (2000). Estratigrafía de la Cuenca Salar de Atacama. Resultados del Pozo exploratorio Toconao-1. Implicaciones regionales.

Müller-Hansen, F., Schlüter, M., Mäs, M., Donges, J. F., Kolb, J. J., Thonicke, K., & Heitzig, J. (2017). Towards representing human behavior and decision making in Earth system models – an overview of techniques and approaches. Earth System Dynamics, 8(4), 977-1007. https://doi.org/10.5194/esd-8-977-2017

National Research Council. (2008). Public Participation in Environmental Assessment and Decision Making. National Academies Press. http://www.nap.edu/catalog/12434

Muñoz J., Ortiz C., Mardones L. y Vidts P. (2004). Funcionamiento Hidrogeológico del acuífero del Núcleo del Salar de Atacama, Chile. Ingeniería Hidráulica en México, vol. XIX, n°3, 69-81.

NORTH, D., 1993. Instituciones, cambio institucional y desempeño económico. Fondo de Cultura Económica: México.

Núñez, H., y Veloso, A., (2001). Distribución geográfica de las especies de lagartos de la Región de Antofagasta, Chile. Boletín del Museo Nacional de Historia Natural, 50, 109-120.

Núñez, R. A. I. (2016). APLICACION DEL ARTICULO 25 QUINQUIES EN EL MARCO DE LA EJECUCION DE PROYECTOS MINEROS [Universidad de Chile]. http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144191

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA) - Programa Orígenes (CONADI, (2011). Agricultura Indígena Chilena. Información social y productiva de la agricultura según etnia.

Orphanopoulos, D., (1998). Informe Hidrogeológico. Evaluación de la Disponibilidad de Aguas Superficiales y Subterráneas. Realizado para DGA.

Ortiz, C., Aravena, R., Briones, E., Suárez, F., Tore, C., & Muñoz, J. F. (2014). Sources of surface water for the Soncor ecosystem, Salar de Atacama basin, northern Chile. Hydrological Sciences Journal, 59(2), 336-350.

Oyanadel, R. C., Clevers, J. G. P. W., Decuyper, M., de Bruin, S., & Herold, M. (2016). 50 years of water extraction in the Pampa del Tamarugal basin: Can Prosopis tamarugo trees survive in the hyper-arid Atacama Desert (Northern Chile)?. Journal of Arid Environments, 124, 292-303.

Özesmi, U., & Özesmi, S. L. (2004). Ecological models based on people's knowledge: A multi-step fuzzy cognitive mapping approach. Ecological Modelling, 176(1), 43-64. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2003.10.027

Pande, S., Ertsen, M., & Sivapalan, M. (2014). Endogenous technological and population change under increasing water scarcity. Hydrology and Earth System Sciences, 18(8), 3239-3258. https://doi.org/10.5194/hess-18-3239-2014

Pande, Saket, & Sivapalan, M. (2017). Progress in socio-hydrology: A meta-analysis of challenges and opportunities: Progress in socio-hydrology. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 4(4), e1193. https://doi.org/10.1002/wat2.1193

Pappa, A., Dokou, Z., & Karatzas, G. (2017). Saltwater intrusion management using the SWI2 model: Application in the coastal aquifer of Hersonissos, Crete, Greece. DESALINATION AND WATER TREATMENT, 99, 49-58. https://doi.org/10.5004/dwt.2017.21550

Pascale, S., Carvalho, L. M. V., Adams, D. K., Castro, C. L., & Cavalcanti, I. F. A. (2019). Current and future variations of the monsoons of the Americas in a warming climate. Current Climate Change Reports. Springer.. https://doi.org/10.1007/s40641-019-00135-w

Pica-Téllez, A.; Garreaud, R.; Meza, F.; Bustos, S.; Falvey, M.; Ibarra, M.; Duarte, K.; Ormazábal, R.; Dittborn, R. & Silva, I.; (2020). Informe Proyecto ARClim: Atlas de Riesgos Climáticos para Chile. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Centro de Cambio Global UC y Meteodata para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago.

Pope, A. J., & Gimblett, R. (2015). Linking Bayesian and agent-based models to simulate complex social-ecological systems in semi-arid regions. Frontiers in Environmental Science, 3. https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00055

Prieto, M., Bauer, Carl J., Lansing, Stephen, Marston, Sallie, & Robbins, Paul, (2014). Privatizing water and articulating indigeneity: The Chilean water reforms and the Atacameño people (Likan Antai). ProQuest Dissertations Publishing.

Prieto M. (2015): Bringing water markets down to Chile's Atacama Desert, Water International, DOI: 10.1080/02508060.2015.1107400

Prieto, M. (2016). Practicing costumbres and the decommodification of nature: The Chilean water markets and the Atacameño people. Geoforum, 77, 28-39.

Purkey, D. R., Joyce, B., Vicuna, S., Hanemann, M. W., Dale, L. L., Yates, D., & Dracup, J. A.

(2008). Robust analysis of future climate change impacts on water for agriculture and other sectors: A case study in the Sacramento Valley. Climatic Change, 87(1), 109-122. https://doi.org/10.1007/s10584-007-9375-8

Reed, M. S. (2008). Stakeholder participation for environmental management: A literature review. Biological Conservation, 141(10), 2417-2431. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.07.014

Riestra F. 2007. Establecimiento de caudales ecológicos mínimos en Chile. En: Castro M. & Fernández L. (Eds.). Gestión sostenible de Humedales (p. 187-195). CYTED Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Programa Internacional de Interculturalidad, Gráfica LOM, Santiago de Chile. 409 pp.

Rissmann, C., Leybourne, M., Benn, C., & Christenson, B. (2015). The origin of solutes within the groundwaters of a high Andean aquifer. Chemical Geology, 396, 164-181.

Rockwood-GCF Ingenieros (2009). Adenda I: EIA Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama.

Rockwood Lithium-SGA, (2013). EIA Planta de Sulfato de Cobre Pentahidratado.

Rockwood Lithium-SGA, (2015). Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama.

Rodríguez, E. (ed.), 2005. Flamencos altoandinos Phoenicopterus andinus (Philippi, 1854), Phoenicopterus jamesi (Sclater, 1886) y Phoenicopterus chilensis (Molina, 1782), en el Norte de Chile: Estado actual y plan de conservación. Corporación Nacional Forestal, CONAF. Antofagasta, Chile.

Salas, J., Aravena, R., Guzmán, E., Cornellà, O., Guimerà, J., Tore, C., ... & Henríquez, A. (2009). Modelo de evolución hidroquímica e isotópica en el sistema de recarga del Salar de Atacama a través de su margen E. Santiago, 22, S6_017.

Salazar C., Rojas L., Lillo A. y Aguirre E., (1999). Análisis de requerimientos hídricos de vegas y bofedales en el norte de Chile. Revista Vertiente, Volumen 7, p. 19-25.

Sanzana, P., Gironas, J., Braud, I., Hitschfeld, N., Vargas, X., Vicuna, S., … Herrera, R., (2018). Herramientas hidroinformaticas y consideraciones para modelar procesos superficiales y subterráneos acoplados mediante WEAP-MODFLOW. Retrieved from https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02023789/

Sanzana, P., Gironás, J., Braud, I., Muñoz, J. F., Vicuña, S., Reyes-Paecke, S., ... & Hitschfeld, N., (2019). Impact of Urban Growth and High Residential Irrigation on Streamflow and Groundwater Levels in a Peri-Urban Semiarid Catchment. JAWRA Journal of the American Water Resources Association.

Sanzana, P., Moncada, A., Vicuña, S., Purkey, D., Suárez, F., Muñoz, J. F., & Gironás, J. (2021). Consideraciones Metodológicas para la Modelación Integrada Superficial y Subterránea en Planes de Gestión Hídrica a partir de proyectos realizados en Chile.

Schlüter, M., Baeza, A., Dressler, G., Frank, K., Groeneveld, J., Jager, W., Janssen, M. A., McAllister, R. R. J., Müller, B., Orach, K., Schwarz, N., & Wijermans, N. (2017). A framework for mapping and comparing behavioural theories in models of social-ecological systems. Ecological Economics, 131, 21-35. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.008

Schorr, B. bettina (2018). Oportunidades desiguales: empresas y Estado en conflictos sobre la minería en Chile. Estudios Atacameños, 57, 239–255. https://doi-org.pucdechile.idm.oclc.org/10.4067/S0718-10432018005000601

Schulze, J., Müller, B., Groeneveld, J., & Grimm, V. (2017). Agent-Based Modelling of Social-Ecological Systems: Achievements, Challenges, and a Way Forward. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 20(2), 8. https://doi.org/10.18564/jasss.3423

Sepúlveda Rivera, Isabel, Molina Otárola, Raúl, Delgado-Serrano, María del Mar, & Guerrero Ginel, José Emilio, (2015). Aguas, riego y cultivos: Cambios y permanencias en los Ayllus de San Pedro de Atacama. Estudios atacameños, (51), 185-206.

Serra, M., (2007). Estudio Etnobotanico Y Jurídico De Hierbas Nativas De La Comuna De San Pedro De Atacama.

Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). (2012). Guía para el uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA. Extraido de https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/migration_files/guias/Guia_uso_modelo_aguas_subterraneas_seia.pdf.

Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), (2020). Servicio de Evaluación Ambiental. https://www.sea.gob.cl/

Servicio Nacional de Aduanas, (2019). Anuario Estadístico 2018.

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), (2019). Anuario de la Minería de Chile 2018. Servicio Nacional de Geología y Minería, 269 p. Santiago, Chile.

Servicio Nacional de Turismo, (2002). Resolución 775 exenta.

Servicio Nacional de Turismo (SERNATUR), (2014a). Plan de Acción Región de Antofagasta Sector Turismo 2014-2018.

Servicio Nacional de Turismo (SERNATUR), (2016) Manual de Destinos, elementos para la gestión de destinos turísticos.

Shoemaker, L., Dai, T., Koenig, J., & Hantush, M. (2005). US EPA TMDL Model Evaluation and Research Needs.

Sieber, J., Swartz, C., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP User guide. In Stockholm Environment Institute.

Simon, H. A. (1956). Rational choice and the structure of the environment. Psychological Review, 63(2), 129-138. https://doi.org/10.1037/h0042769

SignumBOX Inteligencia de Mercados, 2019. Actualización Mercado Litio. Preparado por SignumBOX Inteligencia de Mercados para CORFO.

Sivapalan, M., & Blöschl, G., (2015). Time scale interactions and the coevolution of humans and water: TIME SCALE INTERACTIONS AND COEVOLUTION OF HUMANS AND WATER. Water Resources Research, 51(9), 6988-7022. https://doi.org/10.1002/2015WR017896

Sivapalan, M., Savenije, H. H. G., & Blöschl, G., (2012). Socio-hydrology: A new science of people and water: INVITED COMMENTARY. Hydrological Processes, 26(8), 1270-1276. https://doi.org/10.1002/hyp.8426

SLM NX Uno de Peine-CPH Consultores y Asociados, (2017). Adenda III Anexo 5. Estudio Hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelo Conceptual. Rev.0. EIA Planta de Producción de Sales de Potasio.

Sociedad Legal Minera NX UNO de Peine, (2009). EIA Planta de Producción de Sales de Potasio, SLM NX Uno de Peine.

Solución en Gestión Ambiental, (2015). Estudio Hidrogeológico y modelo numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

Spoerer Rodrik, K., (2016). Nueva mirada al derecho de aprovechamiento de aguas en Chile, a la luz de los principios del derecho medio ambiental (Doctoral dissertation,

Universidad de Chile).
SQM, (1996). EIA Producción de Sulfato de Potasio Ácido Bórico con ampliación de la capacidad productiva de Cloruro de Potasio.
SQM. (2020). Procesos de producción - SQM. https://www.sqm.com/acerca-de-sqm/recursos-naturales/proceso-de-produccion/
SQM-CSIC, (2017). Cuarta Actualización del modelo hidrogeológico del Salar de Atacama.
SQM-CSIC, (2018). Expediente Sancionatorio SQM Salar de Atacama. Informe de investigación Activación Contingencia L1_5 y reglilla L1_G4.
SQM-CSIC, (2018). Informe de investigación Producto de la Activación del Plan de Contingencia en los puntos L1-5 y reglilla L1-G4.
SQM-CSIC, (2019). Quinta Actualización del Modelo Regional de Flujo del Salar de Atacama.
SQM Salar S.A.-Igsa Consultores, Pramar Ambiental Consultores e Ingeniería DICTUC, (2004-2006). EIA Cambios y mejoras en la operación minera en Salar de Atacama.
Srinivasan, V. (2015). Reimagining the past – use of counterfactual trajectories in socio-hydrological modelling: The case of Chennai, India. Hydrology and Earth System Sciences, 19(2), 785-801. https://doi.org/10.5194/hess-19-785-2015
Staudinger, M., Stoelzle, M., Cochand, F., Seibert, J., Weiler, M., & Hunkeler, D. (2019). Your work is my boundary condition!: Challenges and approaches for a closer collaboration between hydrologists and hydrogeologists. Journal of Hydrology, 571, 235-243. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.01.058
Stöckle, C., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. Eur. J. Agron. 18, 289–307.
Straton, A. T., Heckbert, Sc., Ward, J. R., & Smajgl, A. (2009). Effectiveness of a market-based instrument for the allocation of water in a tropical river environment. Water Resources, 36(6), 743-751. https://doi.org/10.1134/S009780780906013X
Stromberg, J. C. (2013). Root patterns and hydrogeomorphic niches of riparian plants in the American Southwest. Journal of Arid Environments, 94, 1-9.
Sudzuki, F. 1969. Absorción foliar d humedad atmosférica en Tamarugo. Boletín Técnico
Tapia, J., González, R., Townley, B., Oliveros, V., Álvarez, F., Aguilar, G., ... & Calderón, M. (2018). Geology and geochemistry of the Atacama Desert. Antonie van Leeuwenhoek, 111(8), 1273-1291.
TEC Background Papers No. 4, 65pp., www.gwpforum.org/gwp/library/tacno4.pdf.
Tellam, J. H., J. W. Lloyd, and M. Walters (1986), The morphology of a saline groundwater body: Its investigation, description and possible explanation, J. Hydrol., 83(1–2), 1–21.
Tesam S. A. (2005). Estudio de Impacto Ambiental Modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el salar de Atacama. SQM Salar S.A.
Tucker CJ., (1979). Red and Photographic Infrared linear Combinations for Monitoring Vegetation. Remote Sensing of Environment, p.127 - 150.
UGN-DGA (2019). Cordillera de Los Andes: Una Torre Permanente de Agua.
United States Environmental Protection Agency (EPA). (2020). Introduction to Watershed Planning. Extraido de http://www.epa.gov/watertrain.
USGS, (2018). U.S. Geological Survey (USGS) Earth Resources Observation and Science (EROS) Center
USGS, (2019). Mineral Commodity Summaries 2019. United States Geological Survey. Recuperado de: https://www.usgs.gov/centers/nmic/lithium-statistics-and-information.

Vardavas, R., Katkar, P., Parker, A., Aliyev, G., Graf, M., & Kumar, K. (2019). RAND's Interdisciplinary Behavioral and Social Science Agent-Based Model of Income Tax Evasion: Technical Report. RAND Corporation. https://doi.org/10.7249/WR1322

Villablanca, R., & Ibarra, J., (2013). Estrategia Regional y Plan de Acción para la Conservación y Uso Sustentable de la Diversidad Biológica de la Región de Antofagasta. Diagnóstico y Evaluación (2002-2013). Realizado para Secretaría Regional Ministerial. Región de Antofagasta. Ministerio del Medio Ambiente.

Voinov, A., & Bousquet, F., (2010). Modelling with stakeholders☆. Environmental Modelling & Software, 25(11), 1268-1281. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.007

Voinov, A., Jenni, K., Gray, S., Kolagani, N., Glynn, P. D., Bommel, P., Smajgl, A., (2018). Tools and methods in participatory modeling: Selecting the right tool for the job. Environmental Modelling & Software, 109, 232-255.

Voinov, A., Kolagani, N., McCall, M. K., Glynn, P. D., Kragt, M. E., Ostermann, F. O., … Ramu, P., (2016). Modelling with stakeholders – Next generation. Environmental Modelling & Software, 77, 196-220. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.11.016

Wallace, R., Geller, A., Ogawa, V. A., Institute of Medicine, Board on Population Health and Public Health Practice, & Committee on the Assessment of Agent-Based Models to Inform Tobacco Product Regulation. (2015). Assessing the use of agent-based models for tobacco regulation. En Assess. The Use of Agent-Based Mod. For Tob. Regul. (p. 271). National Academies Press; Scopus. https://doi.org/10.17226/19018

Weier, J. and Herring, D. (2000) Measuring Vegetation (NDVI & EVI). NASA Earth Observatory, Washington DC.

World Bank Group, & EGPS. (2017). The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. In The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. https://doi.org/10.1596/28312

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A., (2005). WEAP21—A demand-, priority-, and preference-driven water planning model: part 1: model characteristics. Water International, 30(4), 487-500.

Yates, D., Purkey, D., Sieber, J., Huber-Lee, A., & Galbraith, H. (2005). WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. Water International, 30(4), 501-512. https://doi.org/10.1080/02508060508691894

Yergeau, S. E. (2010). "Development and application of a coupled SWMM-MODFLOW model for an urban wetland". PhD diss., University of New Jersey-New Brunswick.

Zhao, Y.; Feng, D., Yua, L., Wang, X., Chen, Y., Hernández, H.J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G., Radke, J. & Gong, P. 2016. Detailed dynamic land cover mapping of Chile: accuracy improvement by integrating multi-seasonal land cover data. Remote Sensing of Environment 183, 170–185.

Zúñiga, L., Campos, V., Pinochet, H., & Prado, B. (1991). A limnological reconnaissance of Lake Tebenquiche, Salar de Atacama, Chile. Hydrobiologia, 210, 19–24.