



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

**INVESTIGACIÓN DE ACUÍFEROS
DE GRAN VOLUMEN Y
BAJO NIVEL DE RECARGA, FASE II**

INFORME FINAL

S.I.T. Nº 431

REALIZADO POR:

CON POTENCIAL CONSULTORES SPA

Santiago, Marzo 2018

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas

Constructor Civil Sr. Miguel Silva Rodríguez

Inspector Fiscal

Ingeniero Civil Sr. Juan Carlos Salgado González

Inspector Fiscal Subrogante

Sr. Jorge Candia Díaz

CON POTENCIAL CONSULTORES SPA

Jefe de Proyecto

Ingeniero Civil Sr. Alejandro Arenas Herrera

Profesionales

Ingeniero Civil Sr. Juan Torres Cubillos

Ingeniero Civil Sr. Rodrigo Saraiva Hermosilla

Ingeniero Civil Sr. Marco Matamala Castro

Ingeniero Civil Sr. Jonás Valdivieso Bravo

Ingeniero Civil Sr. Diego Soto Rodríguez

Ingeniero Sr. Luis Alberto Arenas Herrera

Geógrafa Sra. Soledad Huerta Miranda

Sr. Rodrigo Arenas Herrera

Sr. Roberto Sánchez Valdés

ÍNDICE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	2
2.1	Objetivo General	2
2.2	Objetivos Específicos	2
2.3	Otros Objetivos Específicos.....	2
3	CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO	3
3.1	Ubicación General	3
3.2	Contexto Geográfico y Geológico de la Pampa del Tamarugal.....	3
3.3	Morfología de la Pampa del Tamarugal	5
3.4	Condiciones Climáticas Generales de la Zona de Estudio	6
3.5	Red de Estaciones Actuales de Monitoreo del Acuífero	6
3.6	Situación General del Acuífero de la Pampa del Tamarugal	8
4	REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	10
4.1	Antecedentes Técnicos Analizados	10
5	ANTECEDENTES PAMPA DEL TAMARUGAL.....	16
5.1	Clima	16
5.2	Hidrología.....	17
5.3	Precipitación	18
5.4	Caudales.....	19
6	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA.....	20
6.1	Introducción.....	20
6.2	Identificación de las Quebradas Aportantes.....	20
6.3	Caudales Medios y Balance Hidrológico	30
6.3.1	Validación del método	36
6.4	Caudales de Crecida	39
6.4.1	Generalidades	39
6.4.2	Red de Estaciones de la DGA Consideradas para el Estudio	40
6.4.3	Análisis de Frecuencia en Estaciones Pluviométricas.....	45
6.4.4	Análisis de Crecidas en la Quebrada de Tarapacá.....	49
6.4.5	Análisis de Caudales de Crecidas en Cuencas de Quebradas Aportantes	61
6.5	Curvas de Variación Estacional	63
6.6	Instalación de Estación Meteorológica	68
6.6.1	Ubicación.....	68

6.6.2	Características:	70
7	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	72
7.1	Caracterización geológica de la zona de estudio	72
7.1.1	Marco Geomorfológico Regional	72
7.1.2	Marco Geológico Local	75
7.2	Campaña de Terreno	83
7.2.1	Introducción	83
7.2.2	Recopilación de Datos desde Piezómetros de la DGA.....	83
7.2.3	Resultados de la Campaña de Medición de Niveles Freáticos	87
7.3	Construcción de Pozos de observación [150 m de Perforación].....	93
7.3.1	Generalidades	93
7.3.2	Construcción de Pozos de observación	95
8	MODELO HIDROGEOLÓGICO	99
8.1	Introducción.....	99
8.2	Análisis Crítico y Mejoras del Modelo.....	100
8.3	Modelo conceptual	102
8.3.1	Método de Modelación.....	102
8.3.2	Dominio del modelo.....	103
8.3.3	Flujos subterráneos de entrada y recarga desde las quebradas.	106
8.3.4	Flujos subterráneos de salida.....	106
8.3.5	Evapotranspiración y evaporación en zonas de salares.	106
8.3.6	Extracciones a través de pozos de bombeo.	111
8.3.7	Piezometría y niveles observados.	115
8.4	Modelo Numérico	115
8.4.1	Construcción del modelo subterráneo.....	115
8.4.2	Dominio espacial del modelo.	116
8.4.3	Dominio temporal.	117
8.4.4	Parámetros elásticos.	118
8.4.5	Evaporación y evapotranspiración.	120
8.4.6	Recarga subterránea desde las quebradas.	122
8.4.7	Condición de nivel conocido, Limite sur.....	123
8.4.8	Pozos de explotación.....	124
8.4.9	Niveles freáticos.....	127
8.5	Calibración del régimen permanente.	130
8.5.1	Resultados de la calibración.....	130
8.5.2	Balance Hídrico.....	132

8.5.3	Curvas equipotenciales.	133
8.6	Calibración del Régimen Transiente.	135
8.7	Brechas de información.	143
8.8	Modelación de Escenarios Futuros.	144
8.9	Análisis de los resultados.	146
9	Capacitación a Funcionarios de la DGA	163
10	CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	164
10.1	Introducción.....	164
10.2	Objetivo.....	164
10.3	Materiales	164
10.4	Características.....	165
10.5	Actividades	165
10.6	Estructura del Directorio SIG	165
11	ACTIVIDADES DESARROLLADAS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	167
11.1	Actividades Desarrolladas	167
11.1.1	Caracterización Hidrogeológica.....	167
11.1.2	Caracterización Hidrológica.....	167
11.1.3	Implementación de Modelo Numérico Hidrogeológico de la Pampa del Tamarugal	168
11.1.4	Elaboración de un SIG	169
11.2	Conclusiones	169
11.3	Recomendaciones	172
11.3.1	Recomendaciones Técnicas.....	172
11.3.2	Recomendaciones Administrativas y de Gestión	173

ANEXOS

Anexo A:	Fichas de Resumen de Estudios
Anexo B:	Registro Fotográfico y Niveles de Pozos en Pampa del Tamarugal
Anexo C:	Registro Fotográfico y Estratigráfico de Sondaje Quebrada Aroma
Anexo D:	Resultados Ensayos Lefranc –Sondajes Quebrada Aroma
Anexo E:	Características de la Estación Meteorológica Satelital
Anexo F:	Determinación Curva Número
Anexo G:	Niveles Observados y Calculados en Función del Tiempo, Modelo Cat
Anexo H:	Curvas Hipsométricas
Anexo I:	Capacitación

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3-1	VISTA GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO – PAMPA DEL TAMARUGAL	4
FIGURA 3-2	ESTACIONES DE MONITOREO RHN/DGA Y RED DE POZOS DE MONITOREO DE NIVELES FREÁTICOS DE LA DGA	7
FIGURA 3-3	CAPTACIONES CON DERECHOS DE AGUA REGISTRADOS EN CPA	9
FIGURA 6-1	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS QUEBRADA AROMA	24
FIGURA 6-2	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS QUEBRADA TARAPACÁ	25
FIGURA 6-3	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS QUEBRADA QUIPISCA.....	26
FIGURA 6-4	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS QUEBRADA SAGASCA	27
FIGURA 6-5	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS QUEBRADA QUISMA	28
FIGURA 6-6	CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS QUEBRADA CHACARILLAS.....	29
FIGURA 6-7	GRADIENTE DE PRECIPITACIÓN ANUAL.....	32
FIGURA 6-8	LÍMITE DEL MODELO Y SUBCUENCAS APORTANTES.	33
FIGURA 6-9	CAUDALES MEDIO MENSUALES. ESTACIÓN QUEBRADA DE TARAPACÁ EN LAONSANA.....	34
FIGURA 6-10	SUBCUENCAS QUEBRADA DE TARAPACÁ. CUENCA PAMPA DEL TAMARUGAL.	37
FIGURA 6-11	CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL PARA CAUDALES MEDIOS MENSUALES.	38
FIGURA 6-12	CONSISTENCIA ESTACIÓN CHUZMIZA	41
FIGURA 6-13	CONSISTENCIA ESTACIÓN MOCHA.....	41
FIGURA 6-14	CONSISTENCIA ESTACIÓN LAGUNILLAS	42
FIGURA 6-15	CONSISTENCIA ESTACIÓN POROMA	42
FIGURA 6-16	PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN ESTACIONES CONSIDERADAS	43
FIGURA 6-17	PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL EN ESTACIONES CONSIDERADAS (CONTINUACIÓN)	43
FIGURA 6-18	CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN ESTACIONES CONSIDERADAS.....	44
FIGURA 6-19	ESQUEMA POLÍGONOS DE THIESSEN TARAPACÁ	46
FIGURA 6-20	ESQUEMA POLÍGONOS DE THIESSEN CUENCA QUEBRADA DE TARAPACÁ EN LAONSANA	47
FIGURA 6-21	ISOYETAS PARA T=2 AÑOS.	48
FIGURA 6-22	CORRELACIÓN PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HRS ANUAL CON CAUDAL MEDIO DIARIO. ESTACIÓN QUEBRADA DE TARAPACÁ EN SIBAYA.	50
FIGURA 6-23	CORRELACIÓN CAUDAL MEDIO DIARIO MÁXIMO ANUAL CON PRECIPITACIÓN EN 24 HRS. ESTACIÓN QUEBRADA DE TARAPACÁ EN SIBAYA.	51
FIGURA 6-24	CORRELACIÓN PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HRS ANUAL CON CAUDAL MEDIO DIARIO. ESTACIÓN QUEBRADA DE TARAPACÁ EN LAONSANA.....	52
FIGURA 6-25	CORRELACIÓN CAUDAL MEDIO DIARIO ANUAL CON PRECIPITACIÓN EN 24 HRS ESTACIÓN QUEBRADA DE TARAPACÁ EN LAONSANA.....	52
FIGURA 6-26	CORRELACIÓN PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HRS ANUAL CON CAUDAL MEDIO DIARIO. ESTACIÓN QUEBRADA DE TARAPACÁ EN MINA SAN JUAN.	52
FIGURA 6-27	CORRELACIÓN CAUDAL MEDIO DIARIO ANUAL CON PRECIPITACIÓN EN 24 HRS. ESTACIÓN QUEBRADA DE TARAPACÁ EN MINA SAN JUAN.	53
FIGURA 6-28	CORRELACIÓN PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HRS ANUAL CON CAUDAL MEDIO DIARIO PARA ESTACIÓN RÍO COSCAYA EN SAITOCO.	53
FIGURA 6-29	CORRELACIÓN CAUDAL MEDIO DIARIO ANUAL CON PRECIPITACIÓN EN 24 HRS PARA ESTACIÓN RÍO COSCAYA EN SAITOCO.	53
FIGURA 6-30	CORRELACIÓN ENTRE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS EN QT SIBAYA Y RC SAITOCO.....	55
FIGURA 6-31	CORRELACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS MENSUALES PARA ESTACIONES QUEBRADA DE TARAPACÁ EN SIBAYA Y EN LAONSANA.	56
FIGURA 6-32	CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL QUEBRADA DE AROMA.	64
FIGURA 6-33	CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL QUEBRADA DE TARAPACÁ.	65
FIGURA 6-34	CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL QUEBRADA DE QUIPISCA.....	65
FIGURA 6-35	CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL QUEBRADA DE SAGASCA.	66
FIGURA 6-36	CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL QUEBRADA DE QUISMA.	66
FIGURA 6-37	CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL QUEBRADA DE CHACARILLAS.....	67
FIGURA 6-38	UBICACIÓN DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA QUEBRADA CAYA.	69
FIGURA 6-39	ESTACIÓN METEOROLÓGICA QUEBRADA CAYA INSTALADA.	71

FIGURA 7-1	CONTEXTO GEOLÓGICO ESTRUCTURAL DE LA REGIÓN. EN ROJO LA ZONA DE ESTUDIO.	74
FIGURA 7-2	MAPA GEOLÓGICO DE LA PAMPA DEL TAMARUGAL EN LA ZONA DE ESTUDIO.	76
FIGURA 7-3	MAPA GEOLÓGICO QUEBRADAS ZONA NORTE	77
FIGURA 7-4	MAPA GEOLÓGICO QUEBRADAS ZONA SUR.....	77
FIGURA 7-5	EMPLEO DE POZÓMETRO PARA LA MEDICIÓN DEL NIVEL DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	86
FIGURA 7-6	CAMPAÑA DE MEDICIÓN DE NIVELES FREÁTICOS (2017).	88
FIGURA 7-7	CAMPAÑA DE MEDICIÓN DE NIVELES FREÁTICOS (2014).	89
FIGURA 7-8	COMPARACIÓN DE LÍNEAS ISOFREÁTICAS MODELO NUMÉRICO 2016 (FASE I) VS PIEZOMETRÍA EN TERRENO 2017 (FASE II).	90
FIGURA 7-9	COMPARACIÓN DE PIEZOMETRÍA 2014 VS 2017.	92
FIGURA 7-10	NUEVOS POZOS DE OBSERVACIÓN EN LA PAMPA DEL TAMARUGAL.	94
FIGURA 7-11	UBICACIÓN DE PERFORACIONES Y PERFIL LONGITUDINAL QUEBRADA AROMA, VISTA EN PLANTA.....	97
FIGURA 7-12	PERFIL LONGITUDINAL PERFORACIONES EN QUEBRADA AROMA.....	98
FIGURA 8-1	DOMINIO DEL MODELO, VISTA EN PLANTA EN INTERFAZ DEL SOFTWARE.	105
FIGURA 8-2	CURVA DE EVAPORACIÓN EN SALARES PROPUESTA POR PRAMAR.....	107
FIGURA 8-3	CURVA DE EVAPORACIÓN EN SALARES (PUC, 2019), SALAR DE ATACAMA.	108
FIGURA 8-4	CURVA DE EVAPORACIÓN EN SALARES DGA-MOP 1986.	109
FIGURA 8-5	PROPORCIÓN DE VITALIDAD VS PROFUNDIDAD, PRAMAR 2008.	110
FIGURA 8-6	TRANSPIRACIÓN DE TAMARUGOS EN FUNCIÓN DE LA EDAD, PRAMAR 2008, BASADO EN ACEVEDO 2007.	111
FIGURA 8-7	DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE DERECHOS DE AGUA SUBTERRÁNEOS CONSUNTIVOS.	112
FIGURA 8-8	GRÁFICO DDAA ACUMULADO FUERA DEL LÍMITE NORTE DEL MODELO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	113
FIGURA 8-9	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE DERECHOS DE AGUA SUBTERRÁNEOS CONSUNTIVOS DGA DENTRO DEL DOMINIO DEL MODELO.	114
FIGURA 8-10	SECCIÓN LONGITUDINAL DEL DOMINIO DEL MODELO, CORTE DIRECCIÓN S-N. (ESCALA H:V=1:20)	117
FIGURA 8-11	SECCIÓN TRANSVERSAL DEL DOMINIO DEL MODELO, CORTE DIRECCIÓN O-E. (ESCALA H:V=1:20)	117
FIGURA 8-12	DOMINIO MODELO FASE I DGA (2016) VS DOMINIO FASE II DGA (2018).	118
FIGURA 8-13	DISTRIBUCIÓN DE LAS ZONAS DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN EL DOMINIO DEL MODELO.	119
FIGURA 8-14	MODELO DE DECAIMIENTO EXPONENCIAL PARA LA EVAPORACIÓN.....	120
FIGURA 8-15	MODELO DE DECAIMIENTO EXPONENCIAL PARA LA EVAPORACIÓN.....	121
FIGURA 8-16	DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL CAUDAL DE EXTRACCIÓN INGRESADO AL MODELO.....	125
FIGURA 8-17	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL PARA POZOS CON DERECHOS DE EXTRACCIÓN CONSUNTIVOS SUPERIOR A 8 [L/S].....	126
FIGURA 8-18	POZOS DE CALIBRACIÓN CNP PARA 1960 Y POZOS DE CALIBRACIÓN/VALIDACIÓN CAT [1960-2017].....	129
FIGURA 8-19	RESULTADOS GRÁFICOS DEL MODELO NUMÉRICO	131
FIGURA 8-20	PIEZOMETRÍA MEDICIONES PARA 1960 (ÁLAMOS Y PERALTA) VERSUS RESULTADO DEL MODELO NUMÉRICO.	134
FIGURA 8-21	PIEZOMETRÍA MEDICIONES CAMPAÑA TERRENO(DGA 2017) VERSUS RESULTADO DEL MODELO NUMÉRICO	136
FIGURA 8-22	RESULTADOS GRÁFICOS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO TRANSIENTE	137
FIGURA 8-23	RESULTADOS GRÁFICOS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO TRANSIENTE [HISTOGRAMA DE RESIDUOS] ...	139
FIGURA 8-24	NIVELES PIEZOMÉTRICOS OBSERVADOS Y CALCULADOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, PARA DISTINTOS POZOS.	141
FIGURA 8-25	NIVELES PIEZOMÉTRICOS OBSERVADOS Y CALCULADOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, PARA DISTINTOS POZOS.	142
FIGURA 8-26	EXTRACCIÓN POR BOMBEO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA LOS 6 ESCENARIOS MODELADOS.....	146
FIGURA 8-27	COMPARACIÓN PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO SITUACIÓN CAT AÑO 2017 VS CFT E1 AÑO 2074.	147
FIGURA 8-28	COMPARACIÓN PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO SITUACIÓN CFT E2 AÑO 2074 VS CFT E4 AÑO 2074.	149
FIGURA 8-29	COMPARACIÓN PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO SITUACIÓN CAT AÑO 1960 VS CFT E3 AÑO 2074.	150
FIGURA 8-30	COMPARACIÓN PROFUNDIDAD DEL NIVEL PIEZOMÉTRICO SITUACIÓN CFT E5 AÑO 2074 VS CFT E6 AÑO 2074.	151
FIGURA 8-31	NIVELES PIEZOMÉTRICOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA 5 DE LOS ESCENARIOS SIMULADOS. POZO EL CARMELO 2 Y POZO LUIS QUISPE.....	153
FIGURA 8-32	NIVELES PIEZOMÉTRICOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA 5 DE LOS ESCENARIOS SIMULADOS. POZO JICA D Y POZO GUILLERMO ARAYA.	155
FIGURA 8-33	NIVELES PIEZOMÉTRICOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA 5 DE LOS ESCENARIOS SIMULADOS. POZO HISPANIA Y POZO JICA 7.....	156
FIGURA 8-34	NIVELES PIEZOMÉTRICOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA 5 DE LOS ESCENARIOS SIMULADOS. POZO BELLAVISTA 74 Y POZO JICA F.	157
FIGURA 8-35	NIVELES PIEZOMÉTRICOS EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA 5 DE LOS ESCENARIOS SIMULADOS. POZO PINTADOS 2..	158

FIGURA 8-36	VARIACIÓN DEL ALMACENAMIENTO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA TODOS LOS ESCENARIOS MODELADOS.	159
FIGURA 8-37	VARIACIÓN DEL ALMACENAMIENTO ACUMULADA (DESEMBALSE ACUMULADO) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA TODOS LOS ESCENARIOS MODELADOS.	160
FIGURA 8-38	ZONAS DE EXPLOTACIÓN Y DE MONITOREO PROPUESTAS.	162

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 5.1	ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS EN LA QUEBRADA DE TARAPACÁ.	18
TABLA 5.2	ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN LA QUEBRADA DE TARAPACÁ.	19
TABLA 6.1	RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS GEOMORFOLÓGICAS DE LAS QUEBRADAS APORTANTES.	22
TABLA 6.2	ESTACIONES UTILIZADAS EN EL ESTUDIO.	40
TABLA 6.3	PRECIPITACIÓN EN 24 HORAS PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO.	45
TABLA 6.4	ÁREAS RELATIVAS DE LOS POLÍGONOS DE THIESSEN.	45
TABLA 6.5	PRECIPITACIÓN REPRESENTATIVA DE LA CUENCA.	46
TABLA 6.6	PRECIPITACIÓN REPRESENTATIVA DE LA CUENCA QUEBRADA DE TARAPACÁ EN LAONSANA.	47
TABLA 6.7	COEFICIENTES DE FRECUENCIA UTILIZADOS.	49
TABLA 6.8	PRECIPITACIÓN REPRESENTATIVA PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO.	49
TABLA 6.9	CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS CORREGIDOS PARA ESTACIÓN QUEBRADA DE TARAPACÁ EN SIBAYA.	54
TABLA 6.10	CAUDALES MÁXIMOS INSTANTÁNEOS TRANSPUESTOS PARA ESTACIÓN QUEBRADA DE TARAPACÁ EN LAONSANA.	56
TABLA 6.11	CAUDALES PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO EN ESTACIÓN QUEBRADA DE TARAPACÁ EN LAONSANA.	57
TABLA 6.12	ÁREA DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO.	57
TABLA 6.13	CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO EN LA CUENCA DE LA QUEBRADA DE TARAPACÁ PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO SEGÚN MÉTODO DE TRANSPOSICIÓN.	58
TABLA 6.14	CAUDAL MÁXIMO INSTANTÁNEO PARA DISTINTOS PERÍODOS DE RETORNO SEGÚN CURVA NÚMERO.	60
TABLA 6.15	PUNTOS DE DRENAJE DE CUENCAS.	61
TABLA 6.16	RESUMEN DE CAUDALES DE CRECIDA PARA DISTINTOS PERIODOS DE RETORNO EN CUENCAS APORTANTES AL ACUÍFERO DE LA PAMPA DEL TAMARUGAL.	62
TABLA 6.17	CAUDALES MEDIOS MENSUALES ESTACIÓN QUEBRADA DE TARAPACÁ EN SIBAYA.	63
TABLA 6.18	UBICACIÓN ESTACIÓN QUEBRADA CAYA.	68
TABLA 7.1	RED PIEZOMÉTRICA VIGENTE REGIÓN DE TARAPACÁ, PROVINCIA DEL TAMARUGAL (WGS84 UTM z19S) / FUENTE: DGA-MOP.	84
TABLA 7.2	SONDAJES PERFORADOS EN LA FASE II DEL ESTUDIO.	96

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO 6-1	FACTORES DE CORRECCIÓN DE CAUDALES.	32
CUADRO 6-2	RESULTADOS CAUDAL MEDIO ANUAL. SUBCUENCA QUEBRADA DE TARAPACÁ.	35
CUADRO 6-3	RESULTADOS MÉTODO TRANSPOSICIÓN DE CUENCAS.	35
CUADRO 6-4	RESULTADOS VALIDACIÓN DEL MÉTODO UTILIZADO.	38
CUADRO 8-1	VALORES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN Y PERIODOS UTILIZADOS EN MODELO.	122
CUADRO 8-2	VALORES DE RECARGA CONSIDERADA CON POZOS DE INYECCIÓN EN MODELO (CNP).	122
CUADRO 8-3	RESUMEN DE CAUDALES DE BOMBEO UTILIZADOS EN EL MODELO.	125
CUADRO 8-4	RESUMEN DE DESCENSOS DE NIVELES FREÁTICOS REGISTRADOS EN EL TIEMPO.	127
CUADRO 8-5	ESTADÍGRAFOS DE CALIBRACIÓN OBTENIDO EN MODELO PERMANENTE (CNP).	132
CUADRO 8-6	BALANCE HÍDRICO FLUJOS MODELO PERMANENTE (CNP) (L/s).	133
CUADRO 8-7	BALANCE HÍDRICO AÑO 2017, FLUJOS MODELO EN RÉGIMEN TRANSIENTE (CAT) (L/s).	135
CUADRO 8-8	ESTADÍGRAFOS DE CALIBRACIÓN OBTENIDO EN MODELO TRANSIENTE (CAT) PARA TODOS LOS TIEMPOS.	138
CUADRO 8-9	RESUMEN DE ESCENARIOS DE MODELACIÓN.	145
CUADRO 8-10	TASA DE DESCENSO DE NIVELES FREÁTICOS EN LOS 6 ESCENARIOS DE MODELACIÓN PARA POZOS ANALIZADOS.	161

1 INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de recursos hídricos en la zona norte de Chile está condicionada por la existencia de un clima árido, siendo el origen de esos recursos las escasas precipitaciones que ocurren en la parte alta de la cordillera de los Andes durante algunos meses del año. Estas precipitaciones recargan los acuíferos, los cuales son el único medio en donde se acumula agua, constituyendo la principal fuente de abastecimiento para la población de la zona. Muchos de estos acuíferos se caracterizan por tener un gran volumen y su escasa recarga se produce en zonas puntuales.

La Pampa del Tamarugal es la cuenca endorreica más grande de Chile, con un área de 17.353 [km²], lo que corresponde al 41% del área de la Región de Tarapacá. Este sistema hídrico se caracteriza por tener un gran volumen de almacenamiento subterráneo, el cual es recargado en zonas muy localizadas durante algunos meses del año. Conceptualmente, es un acuífero del tipo libre, el cual recibe aportes desde quebradas y riachuelos que bajan desde el sector oriental, además de flujos subterráneos provenientes del Salar del Huasco y de otras cuencas vecinas (JICA-DGA, 1995).

Hasta la fecha se han realizado, en numerosos estudios, consideraciones teóricas del mecanismo de recarga de la Pampa del Tamarugal. Sin embargo, la carencia de datos certeros ha llevado a tener una gran incertidumbre respecto a la real magnitud de la recarga en el largo plazo.

Las principales descargas desde el acuífero se producen a través de la evapotranspiración de tamarugos y Algarrobos que se ubican principalmente en la parte suroeste de la Pampa del Tamarugal, por flujo de descarga hacia la zona sur de la Pampa del Tamarugal, en el sector de la Oficina Buenaventura, por la evaporación ocurrida en los salares presentes en el área de estudio y las extracciones producto del bombeo distribuidas a lo largo y ancho de la cuenca. Por otra parte, existen avances importantes en la generación de conocimiento del sector en estudio, particularmente en la caracterización de 2 zonas, el análisis de los recursos hídricos en la quebrada de Aroma (DGA, 2013) y en la quebrada de Tarapacá (DGA, 2015).

En el presente informe se estudia la Pampa del Tamarugal, caracterizando el funcionamiento hidrogeológico de este sistema hídrico, determinando las zonas y mecanismos de recarga y descarga, la relación recarga-volumen, la variación de los niveles freáticos, y la evolución de estos en el largo plazo, bajo distintos escenarios de explotación.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Investigar el acuífero de gran volumen y bajo nivel de recarga de la Pampa del Tamarugal, generando nuevos insumos para robustecer la metodología de sustentabilidad establecida **en el estudio “Investigación de Acuíferos de Gran Volumen y Bajo Nivel de Recarga en la Zona Norte” (DGA, 2016) y generando así un nuevo conocimiento de los recursos hídricos disponibles, y sobre los mecanismos de funcionamiento de este sistema hídrico.**

2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos se identifican los siguientes:

- a) Identificar de quebradas aportantes y abanicos aluviales.
- b) Realizar análisis de crecidas de quebradas aportantes.
- c) Estimar la recarga promedio y durante eventos de crecida.
- d) Implementar los resultados en un Sistema de Información Geográfica.
- e) Instalación de estación hidrometeorológica y perforación de piezómetro de monitoreo del nivel de aguas subterráneas.
- f) Actualización del modelo numérico en Visual Modflow.
- g) Capacitación sobre modelo numérico a funcionarios DGA del Nivel Central y de la Región de Tarapacá.

2.3 Otros Objetivos Específicos

- a) Definir el comportamiento hidrogeológico de la cuenca.
- b) Definir la geometría del acuífero.

3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1 Ubicación General

El área de estudio corresponde a la Pampa del Tamarugal, ubicada en la Región de Tarapacá, y se considera el análisis de todas las subcuencas aportantes, tales como las quebradas de Aroma, Tarapacá, Quipisca, Chacarillas, Sagasca y Quisma.

La Figura 3-1 entrega una vista general de la Pampa del Tamarugal y de las cuencas aportantes.

La Pampa del Tamarugal propiamente tal se identifica con el rasgo fisiográfico denominado depresión intermedia. Tiene aproximadamente 220 [km] de largo en el sentido longitudinal y de 40 a 60 [km] de ancho variable.

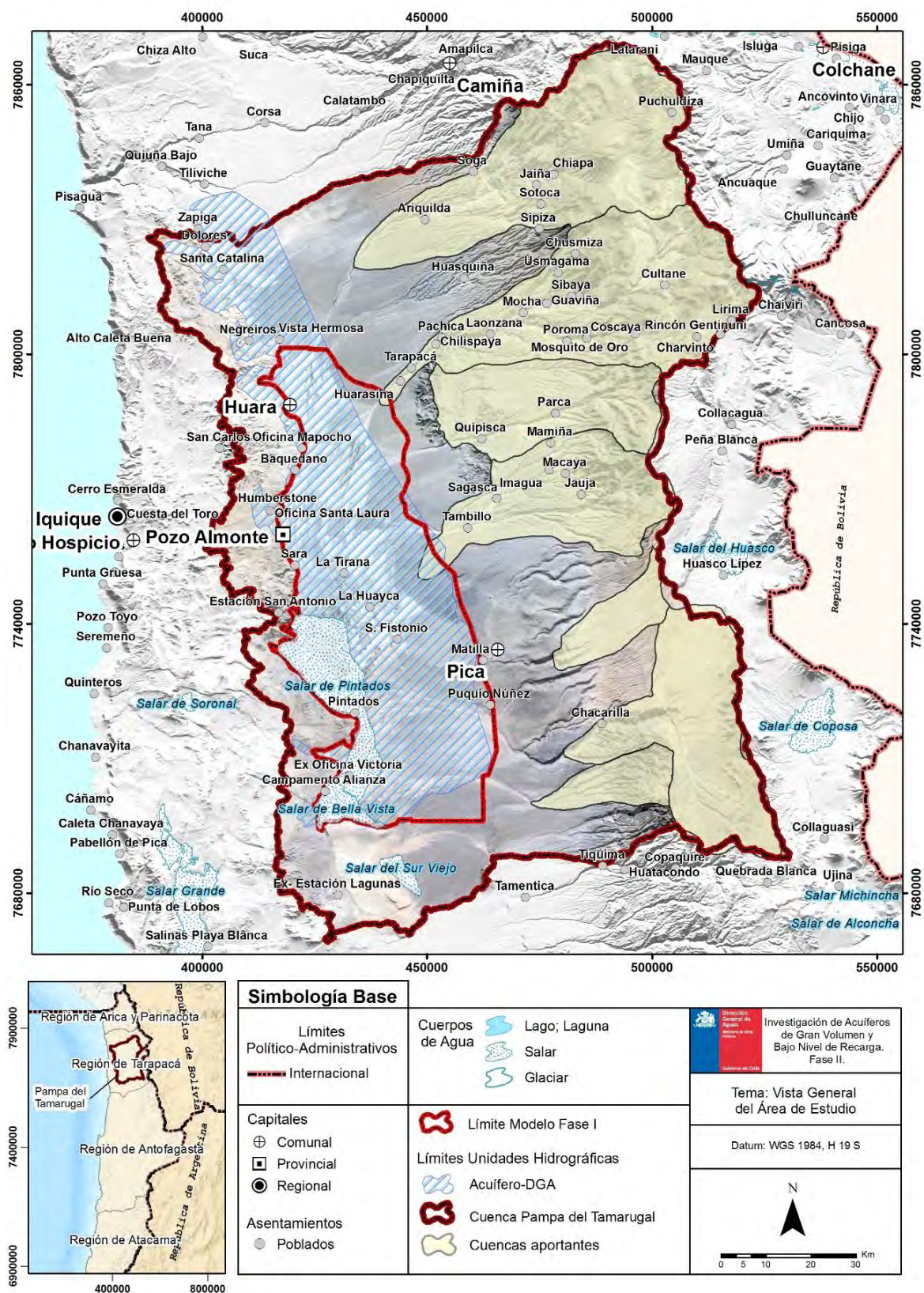
De acuerdo a la investigación preliminar del área de estudio, el sector de la cuenca de la Pampa del Tamarugal asociado al dominio del modelo hidrogeológico definido en DGA (2016), recibe los aportes de 6 subcuencas, las que, listadas en orden de norte a sur, corresponden a:

- Quebrada de Aroma
- Quebrada de Tarapacá
- Quebrada de Quipisca
- Quebradas de Juan Morales, Sagasca y El Tambillo
- Quebrada de Quisma
- Quebrada de Chacarillas

3.2 Contexto Geográfico y Geológico de la Pampa del Tamarugal

En términos generales, la Pampa del Tamarugal corresponde geológicamente a una gran fosa tectónica del complejo basal (paleozoica o mesozoica), producida por fallas longitudinales antiguas y rellena en parte en su piso por las rocas terciarias de la formación Altos de Pica y posteriormente con materiales andinos del Cuaternario. Se explica con más detalle la geomorfología en el apartado respectivo.

Figura 3-1 Vista General del Área de Estudio – Pampa del Tamarugal



Fuente: Elaboración propia

El área de estudio presenta principalmente tres zonas de oeste a este: (1) la depresión intermedia, con una altitud media de 1.000 a 1.200 [m.s.n.m.], donde se encuentra la Pampa del Tamarugal; (2) la cordillera del medio con una altura media de 4.000 [m.s.n.m.], que divide el drenaje superficial entre la depresión intermedia y el Salar de Huasco, y (3) el altiplano, con una altura de 3.500 a 4.500 [m.s.n.m.] y cuencas endorreicas que forman salares, como el de Huasco y el de Coposa (Se presentan más detalles en el apartado de descripción geológica, ver Figura 3-1).

Las rocas del complejo geológico-estructural están separadas por una discontinuidad que las divide en dos grandes grupos o sistemas: un basamento impermeable compuesto por rocas del Mesozoico y los materiales terciarios-cuaternarios que son los de interés hidrogeológico puesto que almacenan agua y permiten la existencia de flujos subterráneos. Esta formación se compone de una secuencia de depositaciones sedimentarias y volcánicas concordantes de fines de la Era Terciaria.

La actividad tectónica ha generado una serie de fallas de orientación norte-sur, las que delimitan el acuífero en estudio. En la parte alta (oriental), el Horst de Huasco genera una separación de los acuíferos y delimita la zona aportante con aquella que drena hacia el salar de Huasco. En la parte occidental, el Horst de Pica delimita el acuífero de Pica-Matilla y limita el caudal de agua subterránea pasante hacia la Pampa del Tamarugal.

3.3 Morfología de la Pampa del Tamarugal

Morfológicamente, la Pampa del Tamarugal se presenta como una meseta de muy suave declive hacia el sur, de aproximadamente 0,4% de pendiente media, y una pendiente transversal del orden de 0,7% medida a la altura de la desembocadura de la quebrada de Juan Morales (JICA 95).

La Pampa del Tamarugal, como base de equilibrio del sistema acuífero, se genera al norte en una loma casi imperceptible frente a la localidad de Negreiros, que actúa como la línea divisoria entre la cuenca de Tana, al norte, y otra hacia el sur, que se identifica con el cono de deyección de las quebradas Soga y Aroma.

Asimismo, en el sur, la divisoria de aguas entre esta cuenca y la del Loa no está bien definida, a tal punto que hay autores que establecen que la quebrada de Guatacondo y otras menores que le siguen al sur pertenecen a la cuenca del Loa.

3.4 Condiciones Climáticas Generales de la Zona de Estudio

En términos generales, la Región de Tarapacá se caracteriza por presentar un clima desértico, dentro de los cual se pueden distinguir 4 subtipos (JICA 1995): costero nuboso, interior, marginal de altura y estepa de altura. Dado que el enfoque del presente estudio es en la Pampa del Tamarugal, la zona queda caracterizada fundamentalmente por las últimas tres clases de clima mencionadas.

3.5 Red de Estaciones Actuales de Monitoreo del Acuífero

De acuerdo a la base de datos georreferenciada de la DGA, la zona en estudio cuenta con una amplia red de monitoreo RHN/DGA-MOP, la cual consta de estaciones para medición de las siguientes variables:

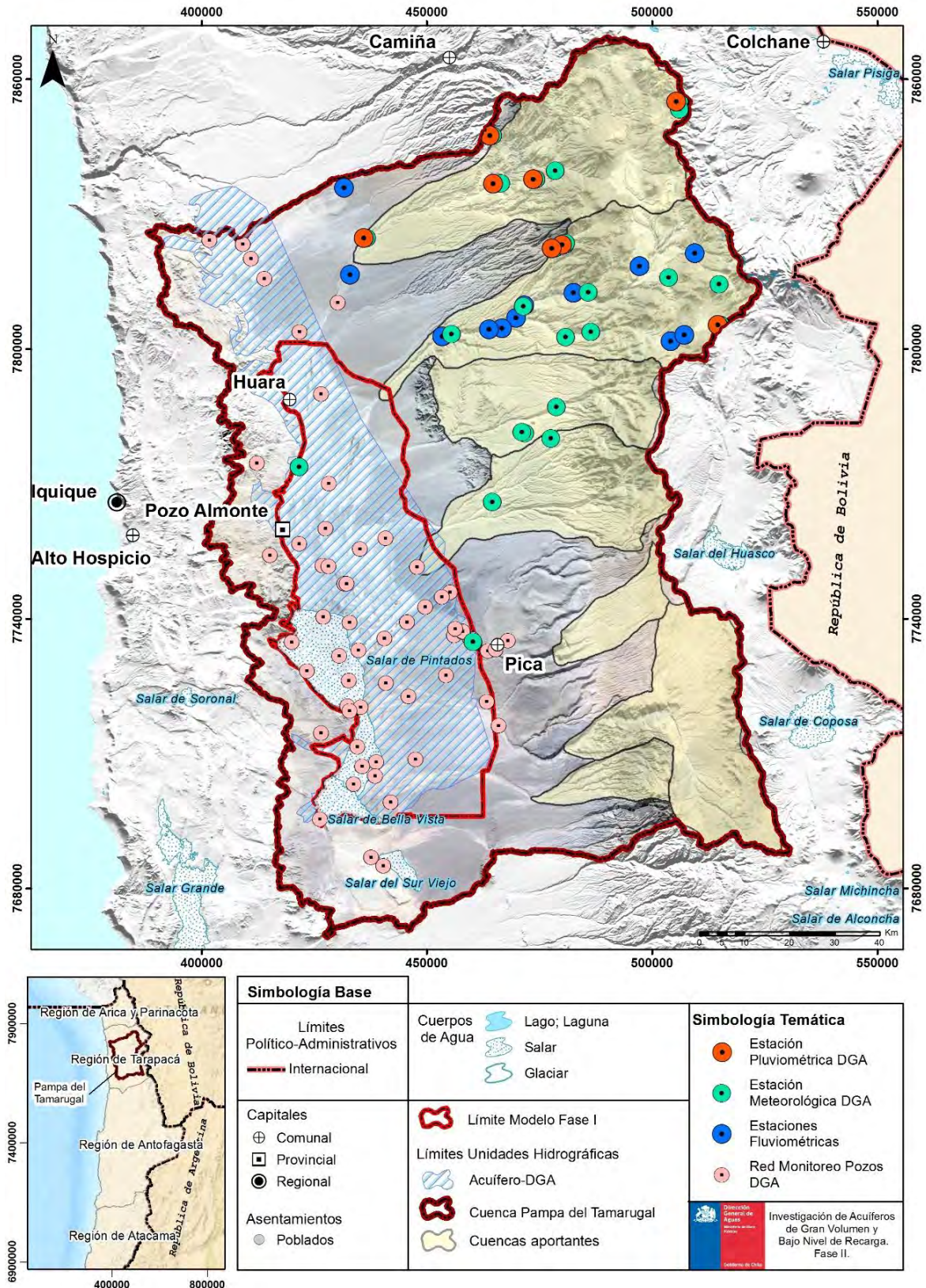
- Calidad química del agua
- Fluviometría
- Meteorología
- Niveles de agua subterránea (pozos y piezómetros)
- Pluviometría

La Figura 3-2 muestra en detalle la red hidrometeorológica mencionada (estaciones pluviométricas, fluviométricas y monitoreo de niveles de pozos), la cual ha sido consultada y revisada como base de información para el desarrollo del presente estudio.

- Existe un total de 21 estaciones meteorológicas vigentes, de las cuales 7 pertenecen a la DGA.
- La zona cuenta con 5 estaciones fluviométricas vigentes, de las cuales 3 pertenecen a la DGA y 2 a la CMCC.
- Se cuenta con 69 pozos de monitoreo de niveles vigentes, aunque solo 37 pertenecen a la DGA. Los otros pertenecen a las empresas Aguas del Altiplano, SQM, HMC y CCMC.
- Existen 56 estaciones de calidad de aguas vigentes, pertenecientes a la DGA, CMCC, SQM y HMC.

La estación meteorológica con registro más largo corresponde a Poroma (quebrada de Tarapacá, desde 1986) y la estación fluviométrica con mayor registro corresponde a Puchurca (quebrada de Tarapacá, desde 1928).

Figura 3-2 Estaciones de Monitoreo RHN/DGA-MOP y Red de Pozos de Monitoreo de Niveles Freáticos de la DGA



3.6 Situación General del Acuífero de la Pampa del Tamarugal

A grandes rasgos, el acuífero de la Pampa del Tamarugal es un embalse subterráneo de grandes proporciones, constituido por clastos cuaternarios que rellenan la fosa y por los intersticios que ellos dejan entre sí. Representa una fuente estratégica para el abastecimiento de agua potable para diversas ciudades y localidades habitadas (Iquique, Alto Hospicio, La Huaica, Pozo Almonte, La Tirana, Huara y Pisagua), como también para la dotación de aguas para riego y para usos mineros. Así lo confirma la distribución de los **derechos de agua otorgados establecida en el informe “Actualización de la Oferta y la Demanda de Recursos Hídricos Subterráneos del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común Pampa del Tamarugal” (SDT Nº 311, 2011)**, que los distribuye, según uso, de la siguiente manera:

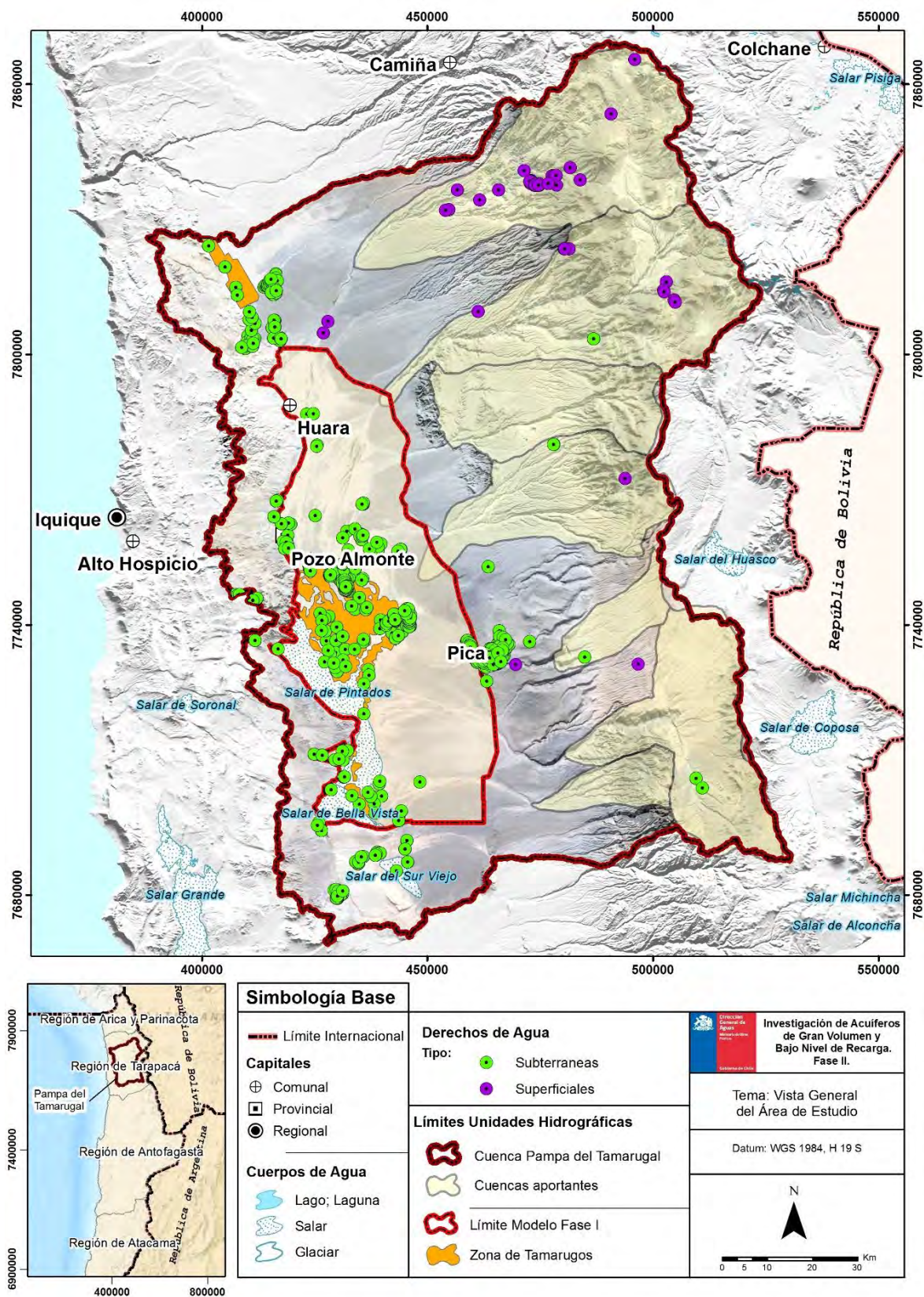
- Derechos otorgados de aguas subterráneas para producción de agua potable: 50%
- Derechos otorgados de agua para riego: 25%
- Derechos otorgados de agua para la minería: 25%

La Figura 3-3 muestra todas las captaciones oficialmente registradas en el área de estudio, con derechos de agua constituidos por la DGA a diciembre de 2018 (CPA, DGA). Las de color morado corresponden a las captaciones asociadas a DAA superficiales, ubicadas en las cuencas aportantes a la Pampa del Tamarugal. En verde, se presentan las captaciones subterráneas.

Si bien el volumen embalsado en el acuífero de la Pampa del Tamarugal es de gran cuantía, se ha determinado que la inercia volumétrica del acuífero no podrá soportar en el largo plazo el desbalance actual proyectado entre la demanda y la recarga, aun cuando el acuífero ha sido declarado, en términos administrativos, Área de Restricción desde 2009. Actualmente hay un descenso sostenido del acuífero, estimado en 11 cm al año (DGA 2014).

En cuanto a las precipitaciones, siendo estas muy escasas o nulas durante el año en el sector de la Pampa del Tamarugal, no representan una fuente real de recarga del acuífero. La recarga se produce por infiltración a lo largo del cauce de las quebradas, en zonas de alta conductividad, donde hay acumulación de material granular no consolidado, antes de los abanicos fluviales, esto ocurre en todas las quebradas aportantes, pero se denominan aportantes sólo a unas cuantas, ya que el aporte del resto es tan pequeño que se asume despreciable.

Figura 3-3 Captaciones con Derechos de Agua registrados en CPA



Fuente: Elaboración propia.

4 REVISIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

4.1 Antecedentes Técnicos Analizados

Se realizó una recopilación, análisis y comprensión de gran parte de la información disponible a la fecha, referida al sistema hidrogeológico del sector en estudio, la que se refleja, fundamentalmente, en los siguientes aspectos:

- Información geofísica / geológica / geotécnica.
- Información hidrológica / hidrogeológica.
- Información geomorfológica.
- Situación de derechos de agua.
- Revisión y análisis de registros niveles estáticos en pozos.
- Revisión de informes de sondajes y estratigrafías disponibles.

El resultado de dicha revisión entrega:

- La determinación de la extensión y características sedimentológicas y geomorfológicas de los depósitos detríticos que constituyen el acuífero. Esto implica trazar el contacto entre las unidades líticas y los depósitos sedimentarios permeables (contacto roca-relleno).
- La definición de los tipos litológicos relevantes y las estructuras existentes, de preferencia aquellas que puedan controlar la geometría del acuífero.
- La determinación de la red hidrográfica y la divisoria de aguas de la cuenca en estudio.
- La ubicación las captaciones existentes y la definición de áreas homogéneas desde una perspectiva hidrogeológica (zonas de recarga, de recuperaciones, etc.).
- El análisis de la información de sondajes en el área. Estructuración de las columnas estratigráficas respectivas y definición de las unidades permeables que estos datos permiten identificar.
- Una relación entre los patrones de consumo con los derechos de agua en ejercicio que afectan al acuífero en estudio.
- El reconocimiento del estado del instrumental dispuesto en terreno y la definición de las acciones de mantención que sean necesarias.

La documentación estudiada corresponde a principales estudios, mapas, expedientes, datos y estadísticas existentes que puedan ser de utilidad para la caracterización de los

parámetros mencionados de la zona de estudio y planificación y desarrollo del estudio. Para dichos efectos, se consideran todos los antecedentes emitidos por los servicios gubernamentales relacionados y universidades u otras entidades competentes.

Cabe destacar que, tanto para la fase de investigación inicial como para las etapas de planificación, conclusión de los trabajos y obtención del producto final, se considera como documentación base los antecedentes indicados en el siguiente listado de referencias bibliográficas:

- [1]** DGA (2016). Investigación de Acuíferos de Gran Volumen y Bajo Nivel de Recarga en la Zona Norte.
- [2]** DGA-MOP, Con Potencial Consultores (2014). Investigación y Análisis de los Mecanismos de Recarga de la Pampa del Tamarugal.
- [3]** DGA-MOP, Con Potencial Consultores (2017). Levantamiento Topográfico de la Red Fluviométrica DGA-Tarapacá y Propuesta Diseño Nuevas Estaciones, Región de Tarapacá.
- [4]** DGA-MOP, AMPHOS 21 (2013). Análisis de los Recursos Hídricos de la Quebrada de Aroma. Región de Tarapacá. SIT N°328. Informe Final.
- [5]** DGA, Geohidrología (2012). Diagnóstico Plan Maestro de Recursos Hídricos, Región de Tarapacá.
- [6]** DGA-MOP, Con Potencial Consultores (2014). Levantamiento de Información Geofísica de la Región de Tarapacá. SIT N°325. Informe Final.
- [7]** Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH) (2013). Recursos Hídricos Tarapacá Diagnóstico y Sistematización de la Información.
- [8]** CORFO (1976). Inventario de Recursos Naturales por Método de Percepción del Satélite Landsat 1 Región - Tarapacá, Instituto de Investigación de Recursos Naturales
- [9]** DGA (1987). Balance Hídrico de Chile.
- [10]** DGA/IRH (1983). Evaluación de los Recursos de Aguas Superficiales de la Provincia de Iquique.
- [11]** DGA-MOP / ICC –Conic Ingenieros Consultores Ltda. (1982). Estudio de las Precipitaciones de la Región de Tarapacá
- [12]** DGA-MOP, Geohidrología Consultores LTDA (2013). Plan Maestro de Recursos Hídricos, Región de Tarapacá. SIT N°333. Informe Final.

-
- [13]** DGA-MOP, GHD Consultores (2012). Levantamiento de Información Hidrogeológica para la Modelación del Acuífero de Pica, Cuenca de la Pampa del Tamarugal, Región de Tarapacá. Informe Final. SIT N°294.
- [14]** DGA/GCF (2010). Precordilleranas de Vertiente Pacífica en el Norte de Chile XV, I, II y III Regiones. SIT N° 221.
- [15]** DGA-MOP, JICA Agencia de Cooperación Internacional del Japón (1995). Estudio sobre el Desarrollo de los Recursos de Agua en la Parte Norte de Chile.
- [16]** COSTA, J.E. et al (2006). Use of Radars to Monitor Stream Discharge by Noncontact Methods. Water Resources. Vol. 42.
- [17]** Nester, P. (2008). Basin and Paleoclimate Evolution Of The Pampa del Tamargual Forearc Valley, Atacama Desert, Northern Chile. PhD Dissertation, Cornell University.
- [18]** DGA-MOP, CONIC BF (2011). Mejoramiento de la Red Fluviométrica para el Control de Crecidas. SIT N°253. Informe Final.
- [19]** DGA-MOP Red Hidrométrica (en línea).
- [20]** Centro de Investigación y Desarrollo en Recursos Hídricos (CIDERH). [en línea]
- [21]** Instituto Nacional de Normalización INN (2012). Aplicación de Normas Chilenas de Información Geográfica.
- [22]** Ministerio de Obras Públicas MOP (2011). Guía Básica para la Confección de Cartografía Temática. Versión 2.0.2011.
- [23]** CORFO, Alamos y Peralta Consultores Ltda. (1984). Medición y Análisis de los Recursos Hídricos de la Pampa del Tamarugal, Pica - Matilla, Rio Piga y Collacagua.
- [24]** CORFO. Anteproyecto Regadío Pica-Matilla: Informe Sobre la Factibilidad de Incrementar el Área de Riego en la Zona Pica - Matilla
- [25]** Batista-Rodríguez José et al. (2007). Diseño y Desarrollo de un Sistema de Información Geográfica para la Gestión de la Información Geológica y Geofísica de Cuba Nororiental. En Revista "Minería y Geología". Vol.3 Num. 3. Cuba.
- [26]** Bruggen, J. (1916). Informe sobre el Agua Subterránea en la Región de Pica.
- [27]** CORFO. Depto. de Recursos Hidráulicos. Castillo, O. (1967). Plan de Investigación de Recursos de Agua Subterránea en la Región Precordillerana de los Altos de Pica.
- [28]** Universidad de Chile Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza. Cuevas, A. (2011). Tesis Diagnóstico de la Demanda de Agua e

Identificación de Conflictos Socio-Ambientales, para Propuesta de Criterios de Gestión Sustentable de los Recursos Hídricos de la Comuna de Pica.

- [29]** Dingman, R. & Galli, C. (1965). Geology and Ground-Water Resources of the Pica Area, Tarapacá Province, Chile. U.S. Government. Geraldo, E. (1972).
- [30]** DGA (1982). Catastro Usuarios Provincia de Iquique. Tomo I (Pica, Matilla, Quebrada Tarapacá) + Anexos Tomo I + Planos.
- [31]** DGA (1982). Catastro Usuarios Provincia de Iquique. Tomo I (Pica, Matilla, Quebrada Tarapacá) + Anexos Tomo I + Planos.
- [32]** DGA (1998): Evaluación de Recursos Hídricos en el Sector de Pica, Hoya de la Pampa del Tamarugal, I Región.
- [33]** DGA (2004): Mapa Hidrogeológico de Chile.
- [34]** DGA-Intendencia I Región-SERPLAC. Montero, P. (1969). Estudio de Regadío para la Zona de Pica. CORFO.
- [35]** DGA (2007-2009): 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.
- [36]** Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. DICTUC (2008): 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.
- [37]** Dingman, R., Galli, C. (1965): Geology and Groundwater Resources of the Pica Area. Geological Survey Bulletin 1189, USGS.
- [38]** Instituto de Investigaciones Geológicas. Galli y Dingman (1962): Carta Geológica de Chile, Cuadrángulos Pica, Alca, Matilla y Chacarilla, con un Estudio sobre los Recursos de Agua Subterránea.
- [39]** Grilli, A.; Aguirre, E.; Durán, M.; Townsend, F. & González, A. (1999). Origen de las Aguas Subterráneas del Sector Pica-Salar del Huasco, Provincia de Iquique, I Región de Tarapacá. XIII Congreso de Ingeniería Sanitaria y Ambiental AIDIS-CHILE.
- [40]** CORFO. Ground Water Studies in Tarapacá Province (Estudios Sobre Aguas Subterráneas en Chile).
- [41]** Karzulovic, J. & García, F. (1979). Evaluación de Recursos Hídricos Provincia de Iquique. I Región de Tarapacá. DGA-Intendencia I Región-SERPLAC.
- [42]** Karzulovic J. & García, F. (1978). Evaluación de los Recursos Hídricos de la Provincia de Iquique. Antecedentes Básicos. DGA-Intendencia I Región-SERPLAC.

-
- [43] Karzulovic, J. (1980). Informe Hidrogeológico del Sondaje Profundo de Chacarilla Cuenca Artesiana de Pica. Provincia de Iquique.
- [44] Niemeyer, H. (1980). Hoyas Hidrográficas de Chile, I Región. DGA. Taylor, G. (1947).
- [45] CORFO. Depto. de Recursos Hidráulicos. Orellana, J. (1970). Utilización de Pozos CORFO en Área Pica - Matilla.
- [46] Pacific Consultant International; JICA; DGA (1995). El Estudio sobre el Desarrollo de los Recursos de Agua en la parte Norte de Chile;
- [47] Rojas, R., Dassargues, A. (2007): Groundwater Flow Modelling of the Regional Aquifer of the Pampa del Tamarugal, Northern Chile. Vol. 15, p. 537-551.
- [48] SERNAGEOMIN (2003): Mapa Geológico de Chile, Base Geológica Escala 1:1.000.000. Publicación Geológica Digital No. 4, Versión 1.0.
- [49] Salazar, C.; Roja, L. & Pollastri, A. (1998). Evaluación de Recursos Hídricos en el Sector de Pica, Hoya de la Pampa del Tamarugal. I región, Chile. DGA - CCEN.
- [50] Salazar, C.; Roja, L. & Pollastri, A. (1999). Evaluación de Recursos Hídricos en el Sector de Pica Hoya de la Pampa del Tamarugal, I región Chile. VI Jornadas de CONAPHY-Chile.
- [51] Suzuki, O. & Aravena, R. (1984). Hidrología Isotópica y el Recurso del Área Esmeralda - Pica - Matilla. Comisión Chilena de Energía Nuclear.
- [52] Suzuki y Aravena (1985): Hidrología Isotópica y El Recurso Agua del Sector Esmeralda – Pica – Matilla.
- [53] Troger y Gerstner (2004): Estudio de Investigación de la Situación Hidrogeológica en la Formación Altos de Pica.
- [54] DGA/DARH (2005). Minuta técnica "Determinación de la Disponibilidad de Recursos Hídricos para Constituir Nuevo Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterránea en el Sector del Acuífero de la Pampa del Tamarugal".
- [55] DGA/DARH (2005). Minuta N°5 2005, "Delimitación Administrativa del Acuífero Pampa del Tamarugal: Antecedentes para la Declaración de Área de Restricción (Incluye una Consideración Especial de la Zona Esmeralda-Mantilla)".
- [56] DGA/DARH (2009). Informe Técnico N0607 "Declaración Área de Restricción Sector Hidrogeológico Pampa del Tamarugal".
- [57] Instituto Geográfico Militar IGM, Tomo VII (1984). Geografía de Chile.
- [58] CORFO (1976). Investigación de los Recursos Hidráulicos en el Norte Grande.

-
- [59]** DARH, DGA (2008). Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos.
- [60]** MANUAL Decreto Supremo N° 203, de 2013, del Ministerio de Obras Públicas, Aprueba Reglamento sobre Normas de Exploración y Explotación de Aguas Subterráneas (Publicado en Diario Oficial 07/03/14).

Asimismo, se contemplan actividades paralelas que contribuyen a la recopilación de antecedentes y planificación del estudio, tales como:

- Visitas a terreno: determinación de la infraestructura hidráulica existente, revisión de instrumental, reconocimiento de cuencas y zonas de recarga, mediciones de niveles en pozos.
- Reunión entre el equipo técnico y el mandante a nivel Central y en Región: aprobación de trabajos de terreno, cuenta técnica, demostración de avances, temas administrativos, etc.

En el Anexo A se adjuntan las Fichas de Resumen de los estudios más relevantes.

5 ANTECEDENTES PAMPA DEL TAMARUGAL

5.1 Clima

Los regímenes climáticos ofrecen variaciones importantes según se consideren zonas transversales gradualmente de mayor altitud, asimismo se presentan diferencias sensibles según perfiles longitudinales.

Desde la línea costera hasta aproximadamente el relieve de los 1.000 m.s.n.m. en la Cordillera de la Costa, el clima es de desierto franco con una temperatura media anual en el rango de los 18°C con pequeñas oscilaciones. En forma normal se producen neblinas matinales con alto contenido de humedad.

Al este de la zona ya descrita y hasta los 2.500 m.s.n.m., se mantiene el clima de desierto franco. Las temperaturas resultan todavía benignas, pero aumentan gradualmente las oscilaciones diarias y en menor grado las estacionales. La humedad relativa en un rango de promedio anual entre 40-45% favorece una elevada tasa de evaporación promedio de 2.400 mm anuales para la parte baja de la cuenca y de 3.000 mm anuales para la parte alta.

Desde los 2.500 a los 3.500 m.s.n.m. se desarrolla un clima de desierto marginal de altura. Se mantiene la sequedad del aire, el promedio térmico es de unos 14°C en los meses cálidos de enero-febrero y de más o menos 9°C en los meses fríos de junio-julio. Se producen oscilaciones térmicas fuertes entre el día y la noche.

Al este de la cota 3.500 m, existen condiciones climáticas propias de una estepa fría de altura. Las temperaturas son bajas todo el año, con promedios anuales de menos de 5°C e incluso en partes, según el sector que se considere, inferiores a 0°C. Las fluctuaciones térmicas del día a la noche son extraordinarias y es habitual que se produzcan, en los meses fríos de junio-julio-agosto, congelamientos de larga duración de las aguas de superficie de vegas y lagunas altiplánicas (IGM, 1984).

5.2 Hidrología

Las condiciones de aridez de la zona de estudio originan recursos hidrológicos con regímenes intermitentes característicos de un ambiente desértico. Esta intermitencia de los cursos superficiales es producto de las abundantes lluvias de verano que ocurren durante el llamado “Invierno Altiplánico”.

Las características hidrológicas son determinadas por tres sistemas hidrográficos: sistema de cuencas exorreicas, endorreicas y arreicas.

La Cuenca de la Pampa del Tamarugal presenta drenaje endorreico. En la hoya de la pampa confluyen hacia la depresión intermedia una serie de quebradas con flujos intermitentes provenientes de la precordillera y el altiplano, incluyendo las Quebradas de Tarapacá, Aroma, Quipisca (Parca), Juan de Morales (Sagasca), Quisma y Chacarillas (DGA, 2014).

Es interesante indicar que sólo aquellas quebradas que drenan sectores altos de la hoya de la Pampa del Tamarugal, poseen una bien definida red de flujo que se extiende sobre la Pampa del Tamarugal. Estas subcuencas de Norte a Sur corresponden a las Quebradas de Aroma, Tarapacá, Quipisca o Juan de Morales y Chacarillas. En todas ellas es posible identificar escurrimientos de aguas en sus cursos superiores, que, aunque de pequeña magnitud (5 a 15 l/s) son de régimen permanente. En relación a la calidad de las aguas, las vertientes presentan una baja conductividad, siendo del tipo carbonatado-sódicas, con pH neutro a básico, en torno al rango 7-8 (DGA, 2014).

5.3 Precipitación

El área de precipitaciones significativas está definida por la zona oriental ubicada por sobre los 2.500 m.s.n.m. Usualmente se observan grandes variaciones de los montos anuales de registros de larga data y frecuentes periodos de varios años seguidos con registros totales comparativamente secos. A su vez, no son raros los años en que ocurren, durante un determinado ciclo de precipitaciones, totales anuales apreciablemente diferentes en áreas que deberían mostrar registros más o menos equivalentes. Por otra parte, es corriente que se produzcan lluvias muy intensas y copiosas, con frecuencia de 5 a 10 años, las cuales originan aluviones de gran magnitud a modo de corrientes de barro que suelen alcanzar hasta la misma Pampa del Tamarugal (DGA, 2014).

En la zona existen 36 estaciones pluviométricas a cargo de la DGA, de las cuales 7 se encuentran dentro de la Quebrada de Tarapacá (ver Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Estaciones Pluviométricas en la Quebrada de Tarapacá.

Código BNA	Nombre	UTM WGS 84 H19		Altitud [m.s.n.m.]	Inicio registro	Año Suspensión
		Este [m]	Norte [m]			
01730007-5	Q. Tarapacá En Sibaya	484.985	7.812.491	2.830	1900	No aplica
01730015-6	Pampa Lirima Dcp	514.870	7.814.459	5.100	1978	2006
01730016-4	Pampa Lirima	515.241	7.805.390	4.076	1977	2010
01730017-2	Poroma	480.835	7.802.651	2.880	1968	No aplica
01730018-0	Lagunillas (Pampa Lirima)	517.064	7.795.860	4.020	1982	No aplica
01730019-9	Mocha	471.401	7.809.524	2.150	1988	No aplica
01730020-2	Chuzmiza	480.783	7.823.553	3.400	1989	No aplica

Fuente: Elaboración propia

5.4 Caudales

Sólo en algunas de las quebradas existentes en la Pampa del Tamarugal es posible identificar escurrimientos de aguas en sus cursos superiores, que, aunque de pequeña magnitud (5-15 l/s) son de régimen permanente.

En la zona de la Quebrada de Tarapacá se encuentran 10 estaciones fluviométricas a cargo de la DGA (ver Tabla 5.2).

Tabla 5.2 Estaciones Fluviométricas en la Quebrada de Tarapacá.

Código BNA	Nombre	UTM WGS 84 H19		Altitud	Inicio Registro	Año Suspensión
		Este [m]	Norte [m]	[m.s.n.m.]		
01730009-1	Quebrada Aroma en Palca	509.607	7.821.686	4.146	1929	2002
01730004-0	Quebrada Tarapacá en Mulli-Mulli	497.351	7.818.860	3.975	1931	2002
01730008-3	Quebrada Tarapacá en Puchurca	466.842	7.805.059	1.910	1928	2002
01730002-4	Rio Tarapacá en Mina San Juan	469.950	7.807.308	2.123	1992	2010
01730012-1	Q. Tarapacá en Laonsana	463.963	7.804.715	1.847	1900	No aplica
01730007-5	Q. Tarapacá en Sibaya	484.985	7.812.491	2.830	1900	No aplica
01730006-7	Quebrada Tarapacá en Mocha	471.807	7.810.109	2.251	1970	No aplica
01730005-9	Quebrada Tarapacá en Pachica	453.583	7.803.246	1.760	1970	No aplica
01730001-6	Rio Coscaya en Pampa Lirima	504.274	7.802.169	3.540	1975	No aplica
01730003-2	Rio Coscaya en Saitoco	507.358	7.803.521	3.545	1985	No aplica

Fuente: Elaboración propia

6 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

6.1 Introducción

El presente capítulo tiene como objetivo informar el análisis hidrológico realizado en el sector de estudio, el que posteriormente fue utilizado en el modelo hidrogeológico.

Se presentan a continuación los principales aspectos y resultados referidos al cálculo hidrológico de caudales medios, de curvas de variación estacional y de caudales de crecidas asociados a las quebradas aportantes a la cuenca de la Pampa del Tamarugal. Estas quebradas corresponden, de norte a sur, a las quebradas de Aroma, Tarapacá, Quipisca, Juan Morales, Quisma y Chacarillas.

6.2 Identificación de las Quebradas Aportantes

En el presente apartado se delimitarán las cuencas correspondientes a las quebradas aportantes al modelo, esta delimitación queda sujeta a la red de drenaje obtenida utilizando la herramienta ArcGIS utilizando como base un modelo de elevación digital DEM con una resolución de 1 Arco/seg. Lo anterior permite obtener la red de drenaje de la zona de estudio y en función a esos resultados se selecciona un punto de control que intersecte la delimitación propuesta por la DGA. Se aclara que las cuencas delimitadas difieren en algunas zonas con las propuestas por la DGA, debido a que los puntos de drenaje de las cuencas no coinciden en todos los casos.

A cada una de las cuencas obtenidas se les determina un set de parámetros hidrológicos y geomorfológicos los cuales son descritos a continuación.

Parámetros Generales de la cuenca

Corresponde a información mínima, entre ellas el área (A) y el perímetro (P) de la cuenca, permite tener una idea general de la naturaleza y el comportamiento de una cuenca.

- **Longitud del cauce principal (L):** Corresponde a la distancia horizontal del cauce principal desde el punto de drenaje hasta la intersección de este con el límite de la cuenca.
- **Ancho de la cuenca (W):** Corresponde a la relación entre el área y la longitud de la cuenca. $W = A/L$
- **Desnivel Altitudinal (DA):** Es el valor de la diferencia entre la cota más alta de la cuenca y la más baja. $DA = H_{\{max\}} - H_{\{min\}}$

Parámetros que caracterizan la forma de la cuenca

La forma de una cuenca es determinante en su comportamiento hidrológico, comparar sus factores de forma nos permite deducir, que tanta similitud existe entre una cuenca y otra, sometida al mismo evento de precipitación, estos parámetros buscan cuantificar las características morfológicas por medio de índices o coeficientes. Se calcula el índice de compacidad y el coeficiente de Horton.

- **Índice de compacidad (K):** Corresponde a la relación entre el perímetro y el perímetro de un círculo que contenga la misma área de la cuenca hidrográfica.

$$K = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

La razón para usar la relación del área equivalente a la ocupada por un círculo es porque una cuenca circular tiene mayores posibilidades de producir avenidas superiores dada su simetría.

- **Factor de Forma Adimensional de Horton (Rf):** Se ha utilizado como indicador de la forma del hidrograma unitario, se obtiene aplicando la siguiente ecuación.

$$R_f = \frac{A}{L_b^2}$$

Parámetros que caracterizan el relieve de la cuenca

Se calculan algunos de los parámetros que caracterizan el relieve y se enumeran a continuación, además se adjunta en el Anexo H, las curvas hipsométricas correspondientes a las quebradas aportantes.

- **Curva Hipsométrica:** Corresponde a la curva de superficie acumulada en función de la altura. Además de entregar información altimétrica, permiten deducir las edades de las cuencas.
- **Altura media de la cuenca (H):** Es la elevación promediada de la cuenca.
- **Pendiente media de la cuenca ($S_{\{cuenca\}}$):** Se calcula como la media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales de la cuenca en las que la línea de máxima pendiente se mantiene constante.

$$S_{\{cuenca\}} = 100 \frac{\sum L_i * E}{A}$$

En donde:

L_i corresponde a la longitud de cada una de las curvas de nivel

E corresponde a la equidistancia de las curvas de nivel.

- **Pendiente media del cauce principal (S):** Corresponde al cociente entre el desnivel altimétrico y el largo del cauce principal.

$$S = \frac{DA}{L}$$

En la Tabla 6.1 se presentan un resumen con los resultados de los parámetros geomorfológicos de las cuencas en estudio. En este caso los resultados son más bien descriptivos y permiten identificar que cuencas poseen mayor similitud.

Tabla 6.1 Resumen de Características Geomorfológicas de las quebradas Aportantes.

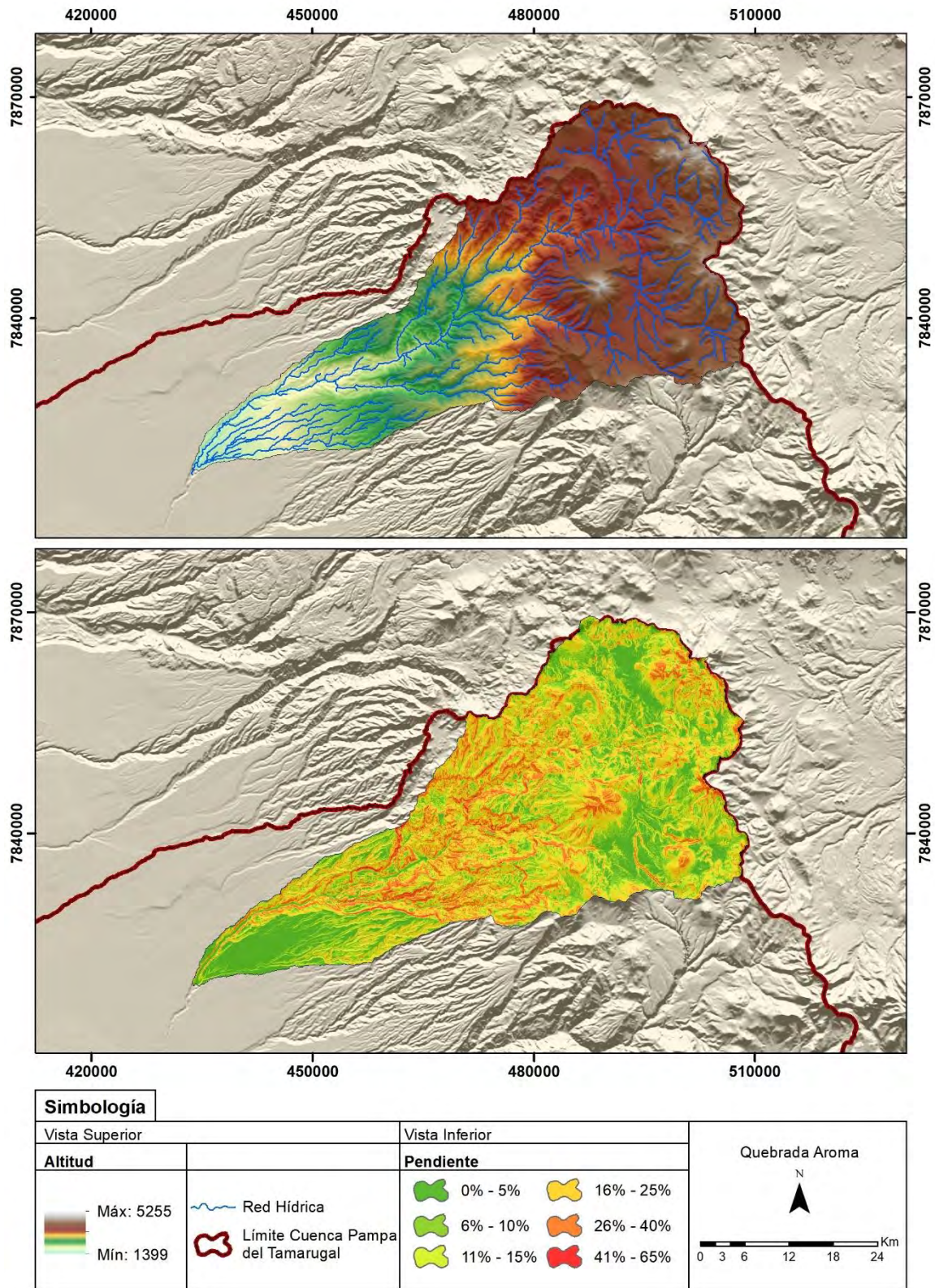
Quebrada						
Parámetro	Aroma	Tarapacá	Quipisca	Sagasca	Quisma	Chacarillas
Área [Km²]	1716	1717	868	891	218	1196
Perímetro [Km]	239	252	171	157	81	218
Longitud de Cuenca [Km]	77	85	47	50	31	54
Longitud Cauce principal [Km]	120.5	117.7	68.2	73	39.9	78
Ancho [Km]	14.2	14.6	12.7	12.2	5.5	15.3
Índice de Compacidad [-]	1.63	1.71	1.63	1.49	1.56	1.78
Factor de Forma de Horton [-]	0.29	0.24	0.40	0.36	0.23	0.41
Cota máxima [m.s.n.m.]	5255	5777	5204	5237	4270	5238
Cota mínima [m.s.n.m.]	1399	1231	1523	1289	1730	1748
Desnivel [m]	3856	4546	3680	3948	2540	3490

Quebrada						
Parámetro	Aroma	Tarapacá	Quipisca	Sagasca	Quisma	Chacarillas
Altura media [m.s.n.m.]	3445.7	3598.9	2984.7	3047.5	3218.1	3828.9
Pendiente media Cauce [%]	3.2	3.9	5.4	5.4	6.4	4.5
Pendiente media de la cuenca [%]	14.3	14.9	12.3	14.8	9.2	6.6
Orden de la cuenca Strahler	5	5	5	5	4	5

Fuente: Elaboración propia

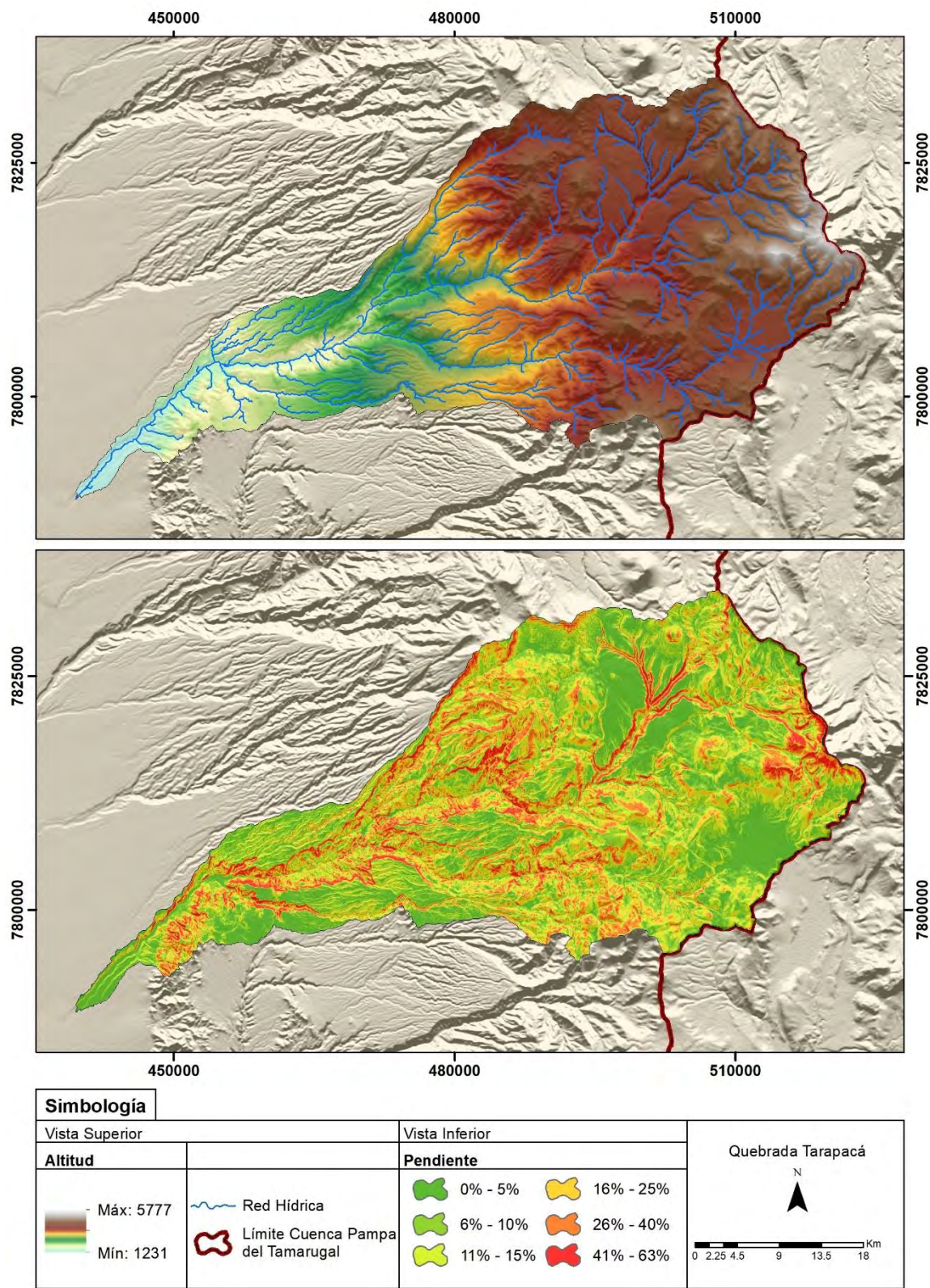
Finalmente, desde la Figura 6-1 hasta Figura 6-6, para cada una de las quebradas aportantes se presentan dos imágenes en cada Figura. En la imagen superior se muestra la distribución altimétrica y la red de drenaje correspondiente a la cuenca, mientras que la imagen inferior muestra la distribución espacial de las pendientes del terreno. La red de drenes permite obtener el orden de Strahler de la cuenca y la cobertura correspondiente a la distribución espacial de las pendientes, permite obtener la pendiente media de la cuenca.

Figura 6-1 Características Geomorfológicas Quebrada Aroma



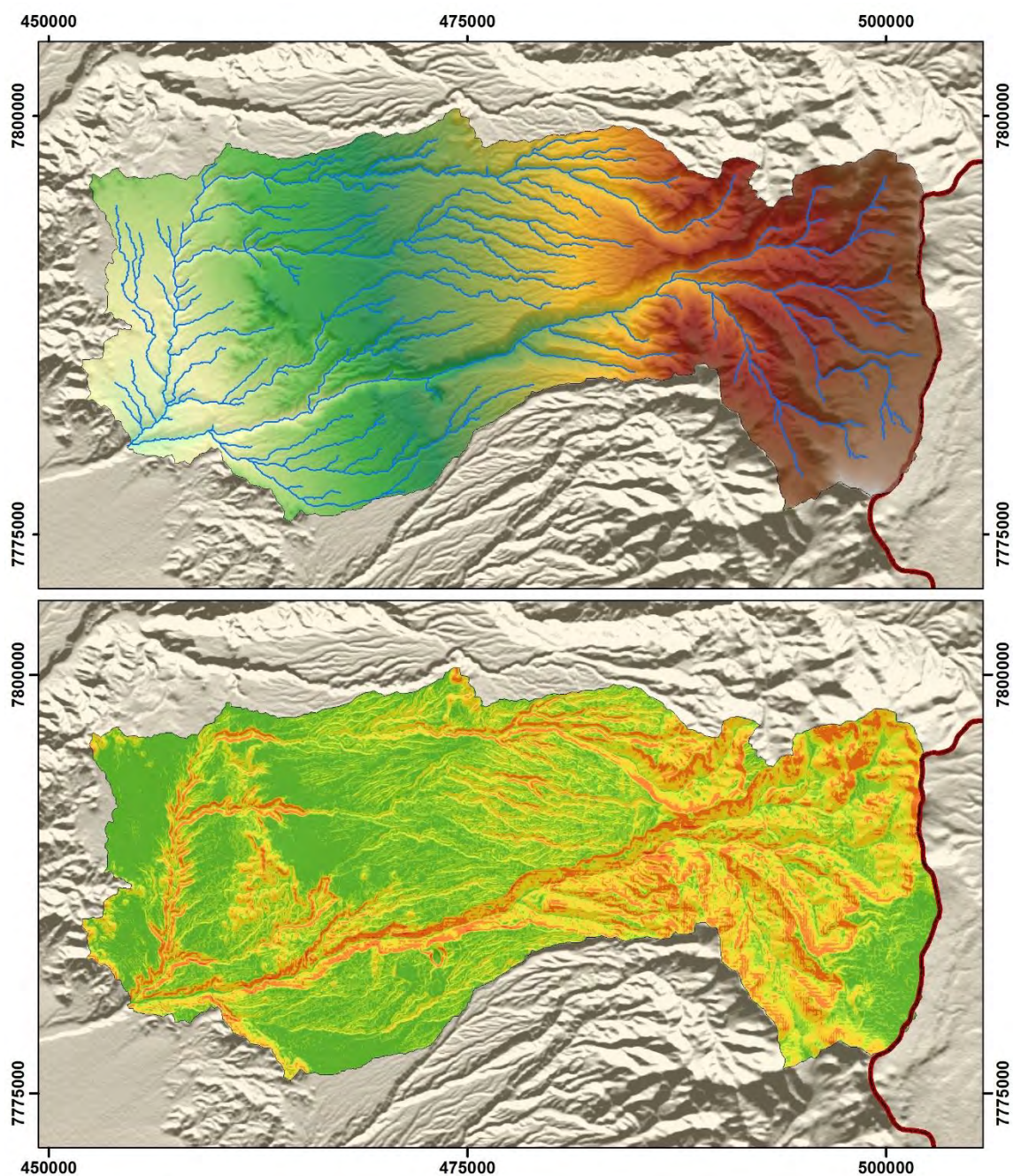
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-2 **Características Geomorfológicas Quebrada Tarapacá**

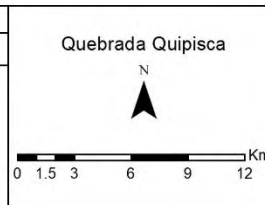


Fuente: Elaboración propia

Figura 6-3 Características Geomorfológicas Quebrada Quipisca

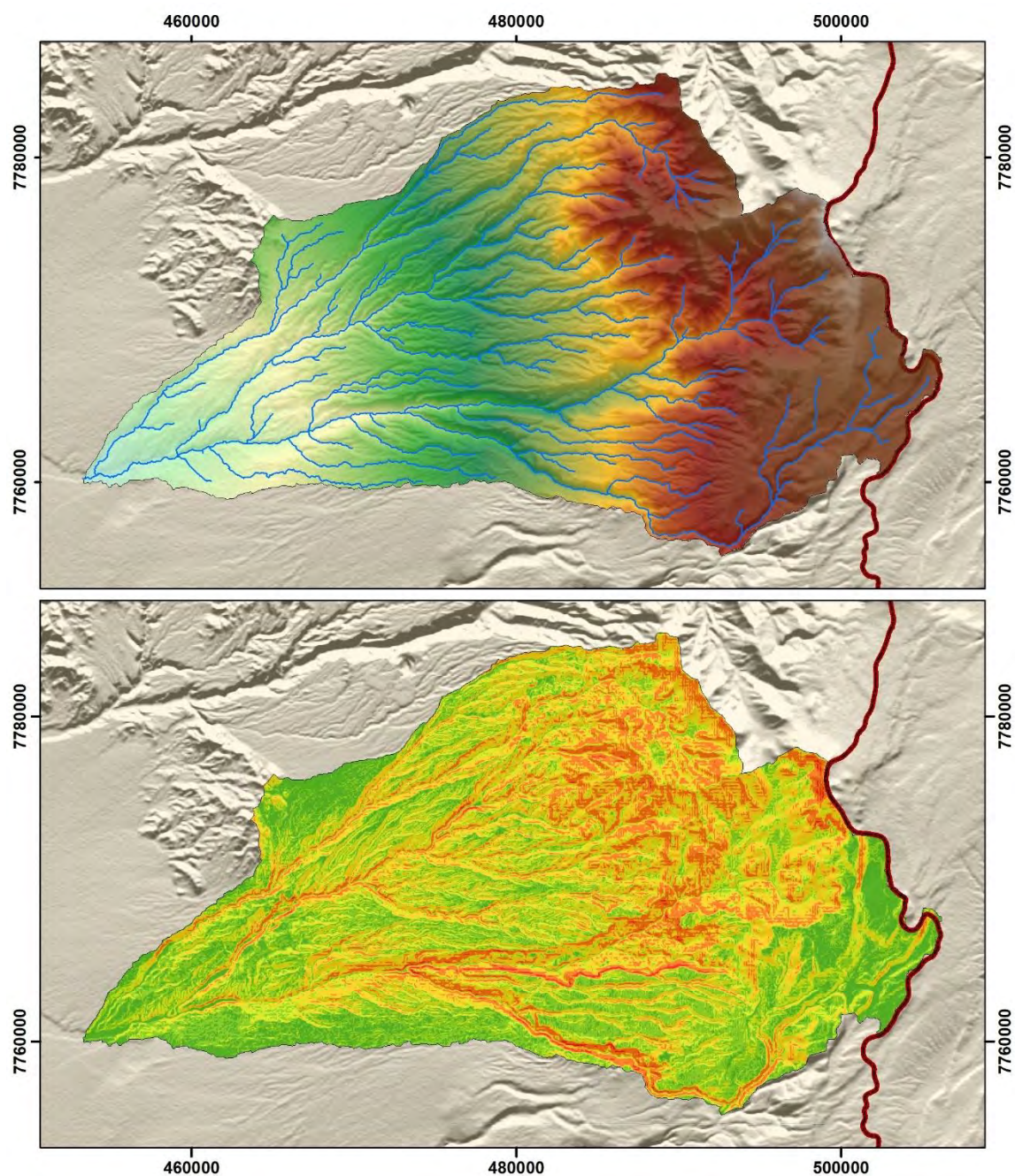


Simbología			
Vista Superior		Vista Inferior	
Altitud		Pendiente	
 Máx: 5204 Min: 1523			

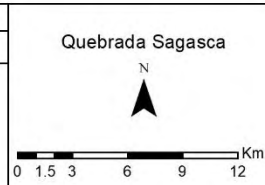


Fuente: Elaboración propia

Figura 6-4 Características Geomorfológicas Quebrada Sagasca

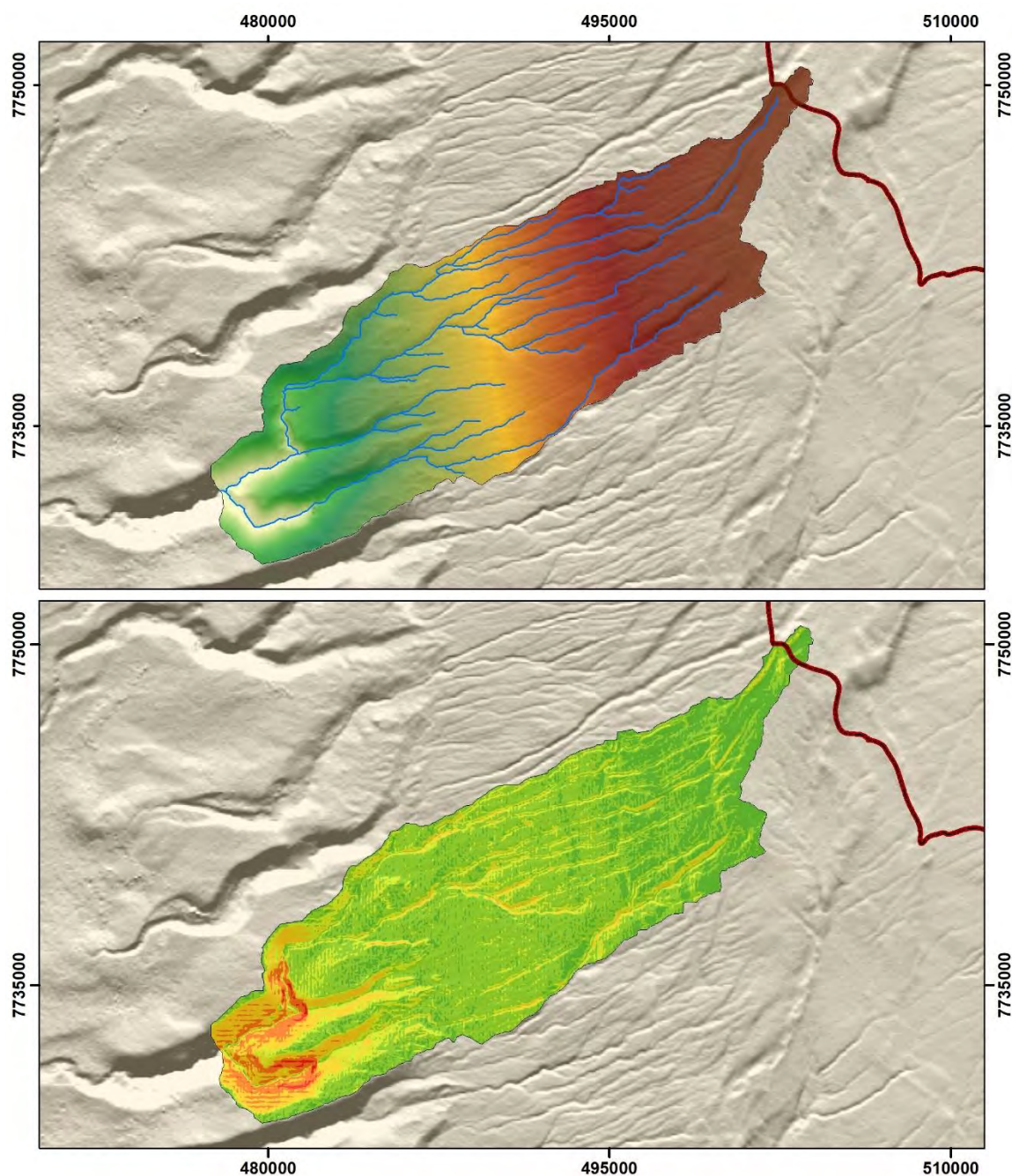


Simbología			
Vista Superior		Vista Inferior	
Altitud		Pendiente	
 Máx: 5237 Min: 1289	Red Hídrica	0% - 5%	16% - 25%
	Límite Cuenca Pampa del Tamarugal	6% - 10%	26% - 40%
		11% - 15%	41% - 60%



Fuente: Elaboración propia

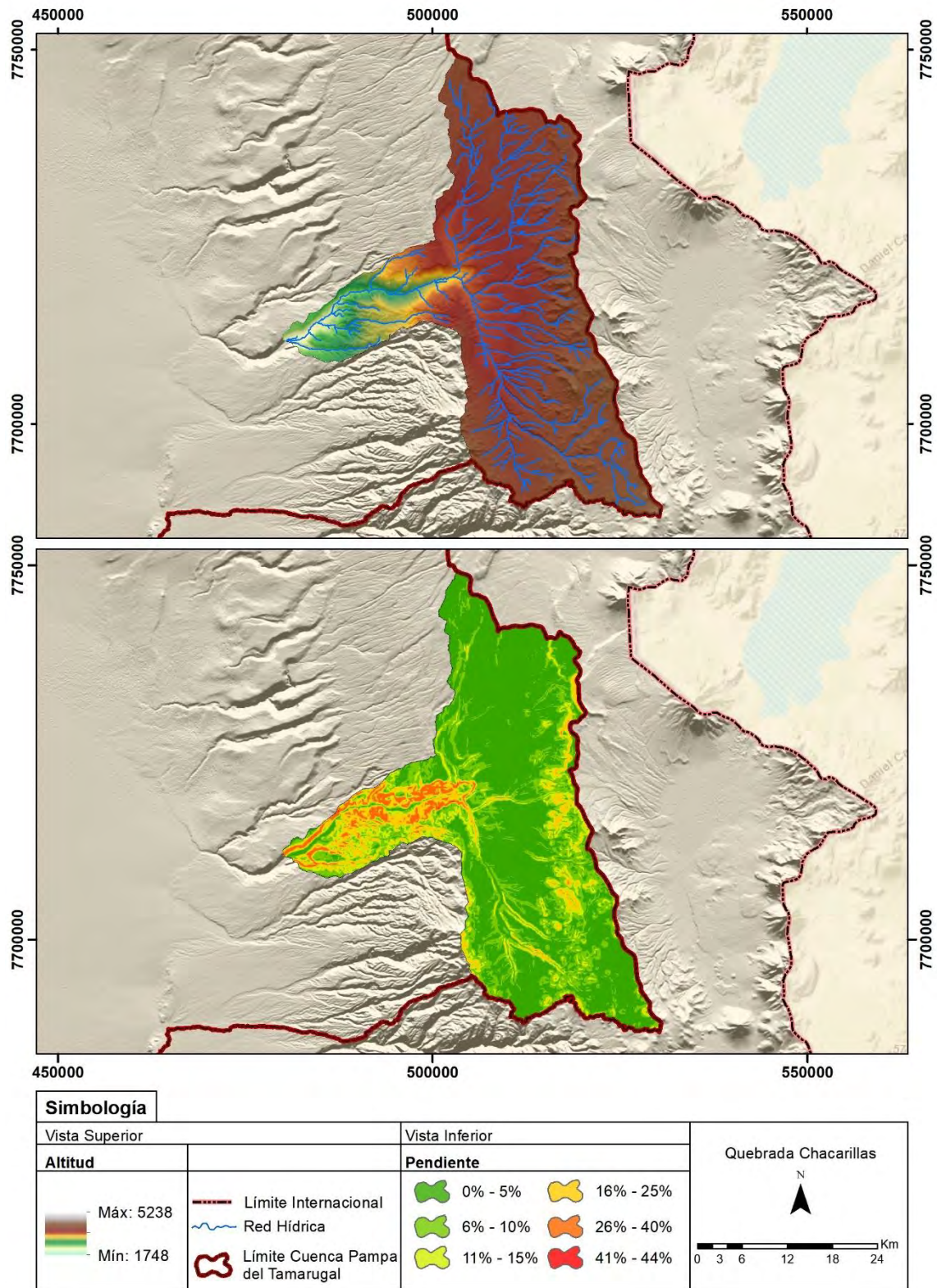
Figura 6-5 Características Geomorfológicas Quebrada Quisma



Simbología			
Vista Superior		Vista Inferior	
Altitud		Pendiente	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 20px; background: linear-gradient(to top, green, yellow, orange, red); border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></div> <div> <p>Máx: 4270</p> <p>Mín: 1730</p> </div> </div>	<div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 10px;"> ~ Red Hídrica </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> ⬮ Límite Cuenca Pampa del Tamarugal </div>	<div style="display: flex; flex-wrap: wrap;"> <div style="width: 50%;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> ⬮ 0% - 5% </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> ⬮ 6% - 10% </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> ⬮ 11% - 15% </div> </div> <div style="width: 50%;"> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> ⬮ 16% - 25% </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> ⬮ 26% - 40% </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> ⬮ 41% - 63% </div> </div> </div>	<div style="text-align: center;"> <p>Quebrada Quisma</p> <p>N</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 80px; border-bottom: 2px solid black; position: relative; margin-right: 5px;"> 0 1 2 4 6 8 </div> <p>Km</p> </div> </div>

Fuente: Elaboración propia

Figura 6-6 Características Geomorfológicas Quebrada Chacarillas



Fuente: Elaboración propia

6.3 Caudales Medios y Balance Hidrológico

Un requisito fundamental de un modelo hidrogeológico es obtener el caudal aportante de las cuencas vecinas sobre el área donde se encuentra el acuífero en estudio, estimado a partir de un balance hidrológico. Este caudal obtenido representa el flujo subterráneo de entrada proveniente de las zonas aledañas. Para realizar esta tarea, en primer lugar, se debe definir según la geografía propia de la zona las subcuencas aportantes, que en este caso corresponden a las subcuencas de la quebrada de Tarapacá, quebrada Aroma, quebrada Quipisca, quebrada Sagasca, quebrada Quisma, quebrada Chacarillas y quebrada La Ramada presentadas en la Figura 6-8.

De las subcuencas ya mencionadas, solo la subcuenca de la quebrada de Tarapacá posee información fluviométrica. En la zona existen 3 estaciones fluviométricas: Quebrada de Tarapacá en Laonsana, Quebrada de Tarapacá en Sibaya y Río Coscaya en Saitoco. La estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana se consideró representativa de esta subcuenca debido a que se encuentra aguas abajo de las demás estaciones y por ende se utilizó como fuente de información de la misma.

Dado que solo la quebrada de Tarapacá y de Aroma cuentan con información fluviométrica, en general la zona cuenta información pluviométrica de poca confiabilidad, concentrada en la zona norte y con aun periodos cortos de registro, para poder obtener el caudal aportante de las demás subcuencas, se aplicó el método de transposición de caudales. Este corresponde a un método indirecto que relaciona los rendimientos específicos de cuencas similares, a través de la siguiente igualdad:

$$\frac{Q_1}{A_1 \cdot P_1} = \frac{Q_2}{A_2 \cdot P_2} \quad \text{Ecuación 6-1}$$

Donde:

Q_x : Representa el caudal de la cuenca "x".

A_x : Representa el área aportante de la cuenca "x".

P_x : Representa la precipitación media sobre la cuenca "x".

El caudal obtenido en la subcuenca Quebrada de Tarapacá (Q_1), se corrigió por medio de un factor de área y por un factor de precipitación, tal como se muestra a continuación:

$$Q_2 = Q_1 \cdot k_A \cdot k_P \quad \text{Ecuación 6-2}$$

El factor de área " k_A " corresponde a la relación entre las áreas aportantes de las subcuencas y el factor " k_p " corresponde a la relación entre las precipitaciones medias sobre las subcuencas. El área de cada una de las subcuencas se determinó por medio de la interfaz ArcGIS, junto con cada una de las curvas hipsométricas correspondientes, con ellas se determinó la precipitación media sobre las subcuencas.

El procedimiento para obtener las precipitaciones medias consistió en dividir cada una de las subcuencas en intervalos equiespaciados y luego definir una cota promedio para cada uno de estos intervalos, posteriormente se definió la precipitación asociada a cada una de estas cotas promedio y se normalizó con respecto al área aportante pluvial, tal como se muestra en la Ecuación 6.3.

$$P_m = \frac{\sum A_i \cdot P_i}{A_p} \quad \text{Ecuación 6-3}$$

Donde:

P_m : Precipitación media sobre la cuenca.

A_i : Área de la sección "i" de la cuenca.

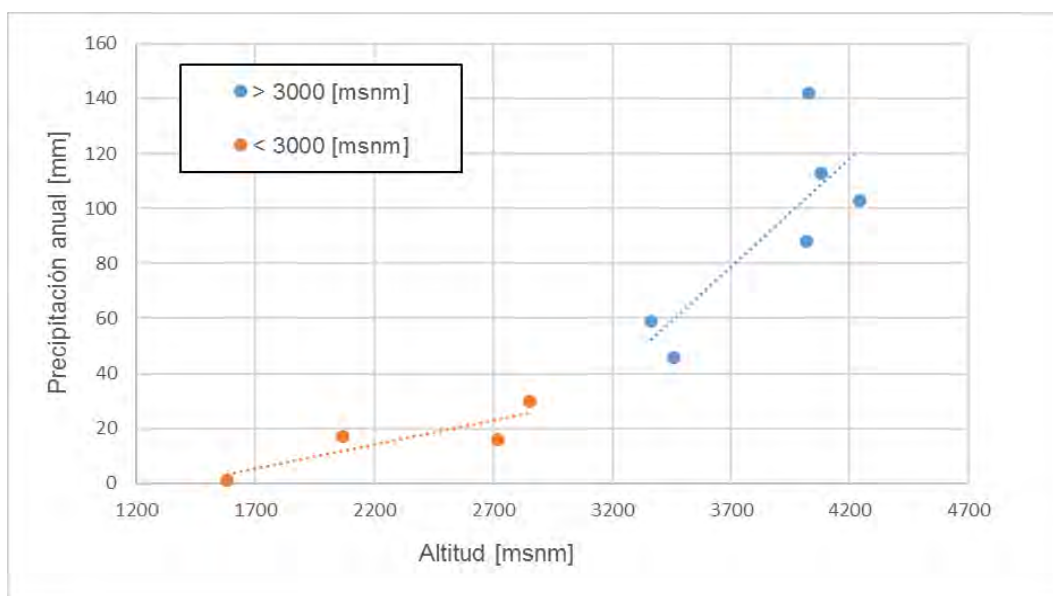
P_i : Precipitación media sobre la sección "i" de la cuenca.

A_p : Área pluvial de la cuenca completa.

Para determinar el área aportante pluvial de una cuenca se requiere conocer la altura promedio a partir de la cual se logran encontrar precipitaciones relevantes, y la altura promedio de la línea de nieves, las que se determinaron a partir de la información presentada en un estudio anterior (DGA, 2014).

En la Figura 6-7 se presentan las curvas empíricas de altura/precipitación que se utilizaron como gradiente de precipitación válido para estimar la precipitación media de la cuenca " P_i " (DGA 2014). Estas curvas se consideran válidas para el resto de las subcuencas en estudio.

Figura 6-7 Gradiente de Precipitación anual.



Fuente: Elaboración propia

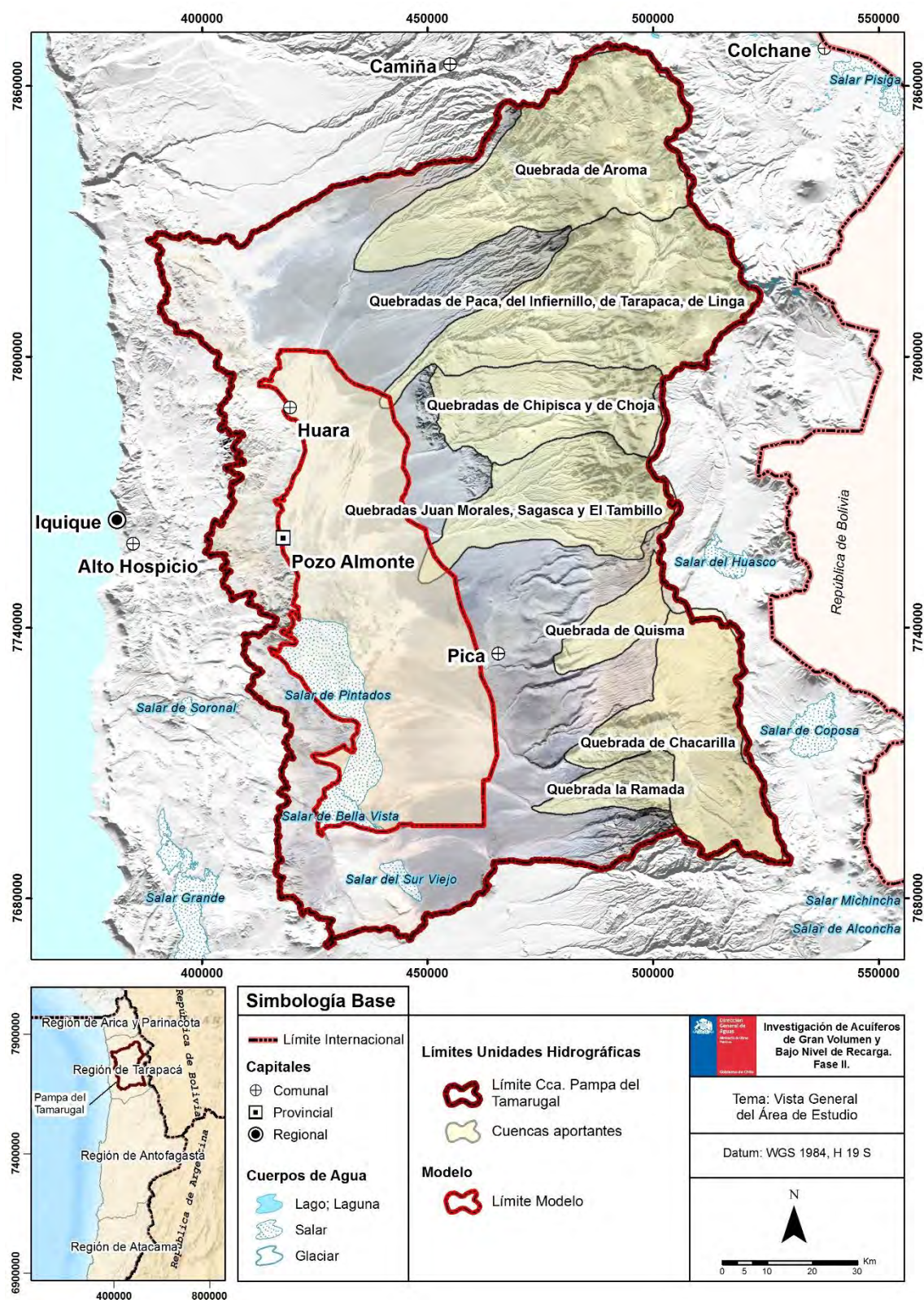
En el Cuadro 6-1 se presenta la información utilizada y los coeficientes calculados para cada una de las subcuencas.

Cuadro 6-1 Factores de corrección de caudales.

	Quebrada de Tarapacá	Quebrada Aroma	Quebrada Quipisca	Quebrada Sagasca	Quebrada Quisma	Quebrada de Chacarillas	Quebrada La Ramada
k_A	1,000	0,983	0,485	0,489	0,173	0,750	0,149
k_P	1,000	0,900	0,545	0,677	0,733	1,057	0,502
Línea de nieves [m.s.n.m.]	5000						
Altura mínima de precipitación [m.s.n.m.]	2000						

Fuente: Elaboración propia

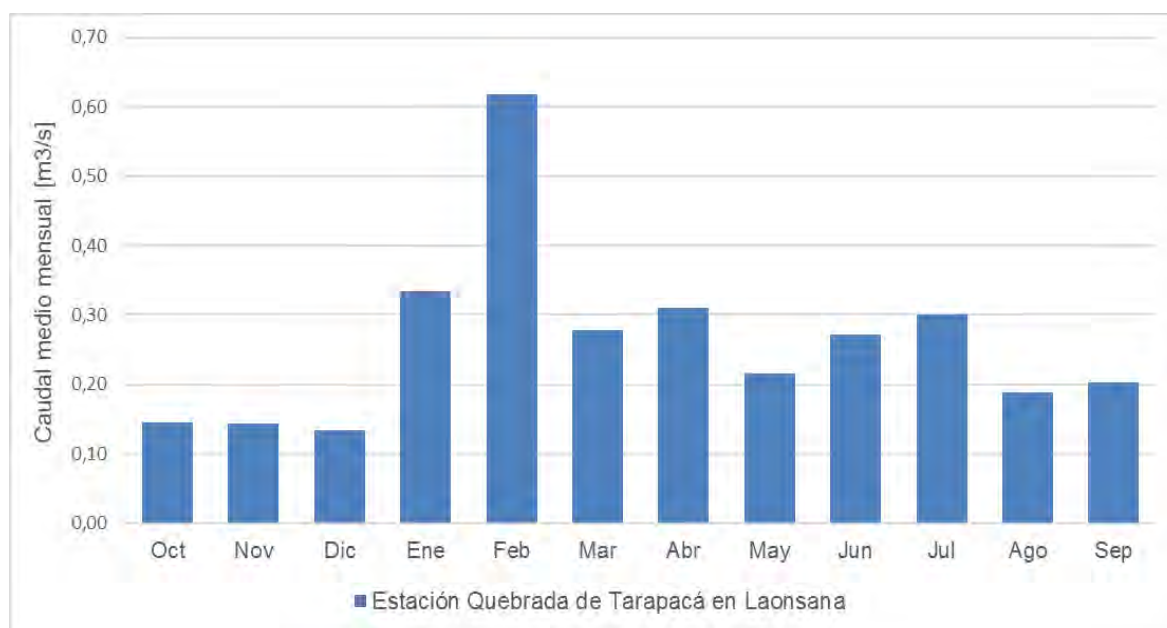
Figura 6-8 Límite del modelo y subcuencas aportantes.



Fuente: Elaboración propia

El modelo hidrogeológico utiliza como variable de entrada los caudales medios anuales aportados por las subcuencas vecinas, es por esto que se determinaron los caudales medios anuales para cada una de las subcuencas. El caudal medio anual aportado por la subcuenca Quebrada de Tarapacá fue obtenido por medio de un análisis estadístico aplicado sobre la estación fluviométrica Quebrada de Tarapacá en Laonsana. En la Figura 6-9 se presenta la curva de caudales medios mensuales. En base a este resultado se demuestra la existencia de un flujo base.

Figura 6-9 Caudales Medio Mensuales. Estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana.



Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro 6-2 se presentan los valores obtenidos para los caudales medios anuales y para el flujo base. El caudal medio anual fue calculado como el promedio de los caudales medio mensuales para aquellos años con información completa, mientras que, el flujo base fue estimado como el promedio simple entre los tres caudales medios mensuales más bajos.

Cuadro 6-2 Resultados caudal medio anual. Subcuenca Quebrada de Tarapacá.

	Caudal medio Anual (m³/s)	Flujo base (m³/s)	QMA sin flujo base (m³/s)
Quebrada de Tarapacá en Laonsana	0,291	0,141	0,150

Fuente: Elaboración propia

El caudal medio anual obtenido para la subcuenca Quebrada de Tarapacá, se utilizó como base para obtener los caudales medio anuales de las demás subcuencas a partir del método de transposición de caudales, tal como se describió previamente. Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 6-3.

Cuadro 6-3 Resultados método transposición de cuencas.

	Quebrada Tarapacá	Quebrada Aroma	Quebrada Quipisca	Quebrada Sagasca	Quebrada Quisma	Quebrada Chacarillas	Quebrada Ramada
Pp total anual [mm]	96,4	90,7	25,9	36,7	63,6	98,2	27,0
Área Efectiva de la Cuenca [km²]	1599,4	1571,5	775,3	781,5	275,9	1200,2	237,7
Caudal medio anual [l/s]	290,9	268,9	37,9	54,1	33,1	222,4	12,1
Recarga estimada [l/s]	125	116	16	24	14	96	5

Fuente: Elaboración propia

La sumatoria del caudal medio anual pasante en el punto de control de salida de las quebradas aportantes se estima en el orden de 920 l/s. De estos 920 l/s como valor superior, se estima que ingresan como recarga a la Pampa del Tamarugal del orden de 360 l/s producto de la recarga y 50 l/s mediante aporte subterráneo desde otras zonas. Por lo tanto, la recarga total estimada es del orden de 415 l/s. La estimación de los caudales de recarga se realiza tomando como referencia el análisis de los mecanismos de recarga de la

quebrada de Tarapacá (DGA 2014), en donde, mediante un cálculo del caudal pasante, según la geometría, el gradiente hidráulico y asumiendo una conductividad hidráulica del orden de 10^{-7} m/s, se estimó que el caudal pasante puede fluctuar entre 100 y 200 l/s. Para efectos de la modelación se asumió que ingresa en promedio 125 l/s por la quebrada de Tarapacá. Como segundo supuesto, se asumió que el comportamiento de la recarga es igual en todas las quebradas aportantes, por lo tanto, la razón entre el caudal medio anual y la recarga, es la misma para todas las quebradas. Lo anterior debido a que el material granular no consolidado corresponde a depósitos del cuaternario.

6.3.1 Validación del método

Finalmente, se verificó la validez del método de transposición de cuencas, para esto, se comparó el comportamiento de las estaciones Quebrada de Tarapacá en Laonsana y Quebrada de Tarapacá en Sibaya, ambas ubicadas dentro de la subcuenca Quebrada de Tarapacá.

Las siete subcuencas analizadas son vecinas y poseen un clima y variación estacional bastante similares entre sí.

Para comprobar la validez del método utilizado, se calculó el factor de transposición para la subcuenca de quebrada de Tarapacá a partir de la siguiente expresión:

$$F = \frac{Q}{AP} \quad \text{Ecuación 6-3}$$

Donde:

Q: Representa el caudal de la cuenca

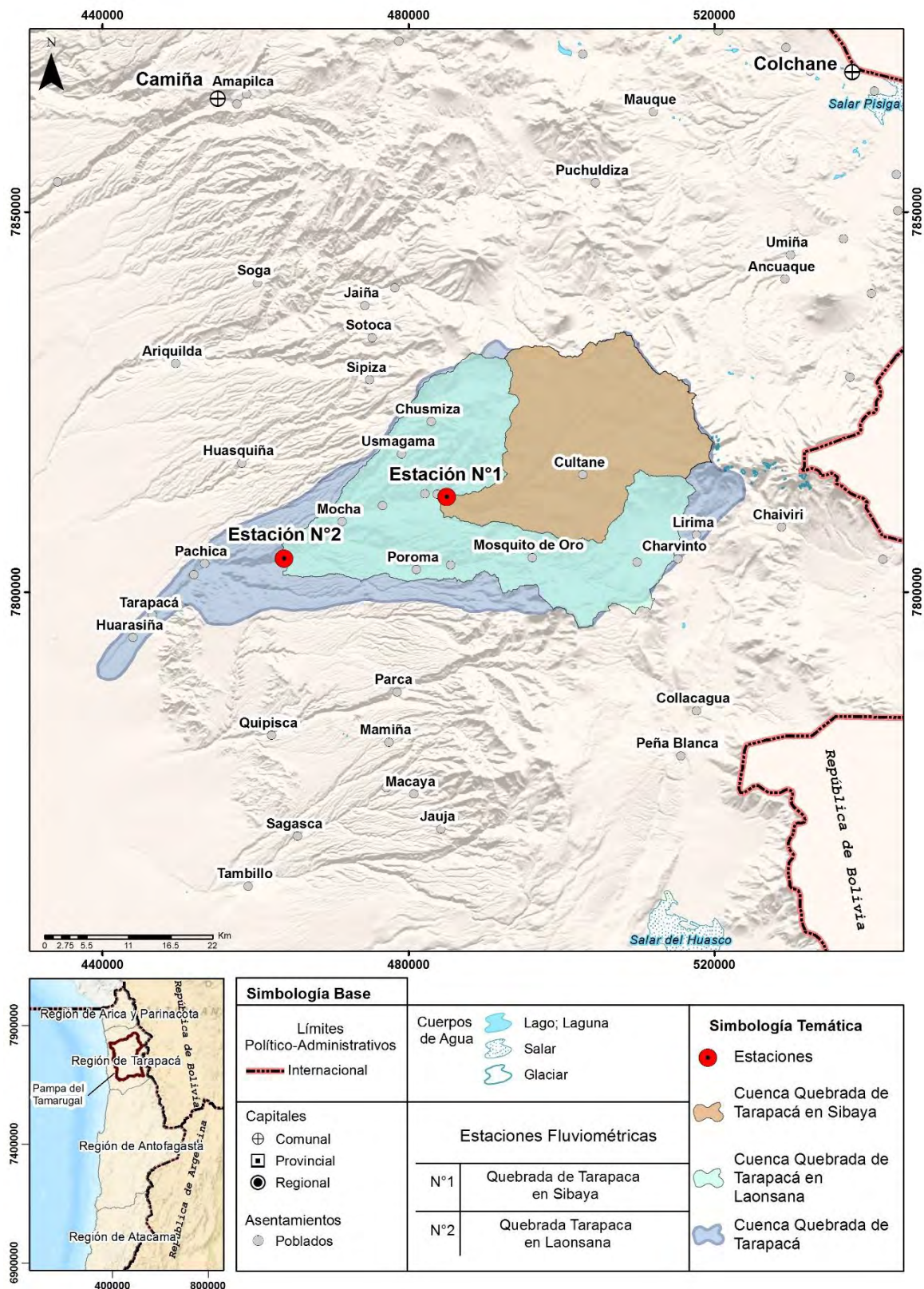
A: Representa el área aportante de la cuenca

P: Representa la precipitación media sobre la cuenca

Este factor de transposición, se comparó con el factor de transposición para una subsubcuenca ubicada dentro de la misma subcuenca y que tiene su punto de control en la estación fluviométrica Quebrada de Tarapacá en Sibaya, como se aprecia en la Figura 6-10.

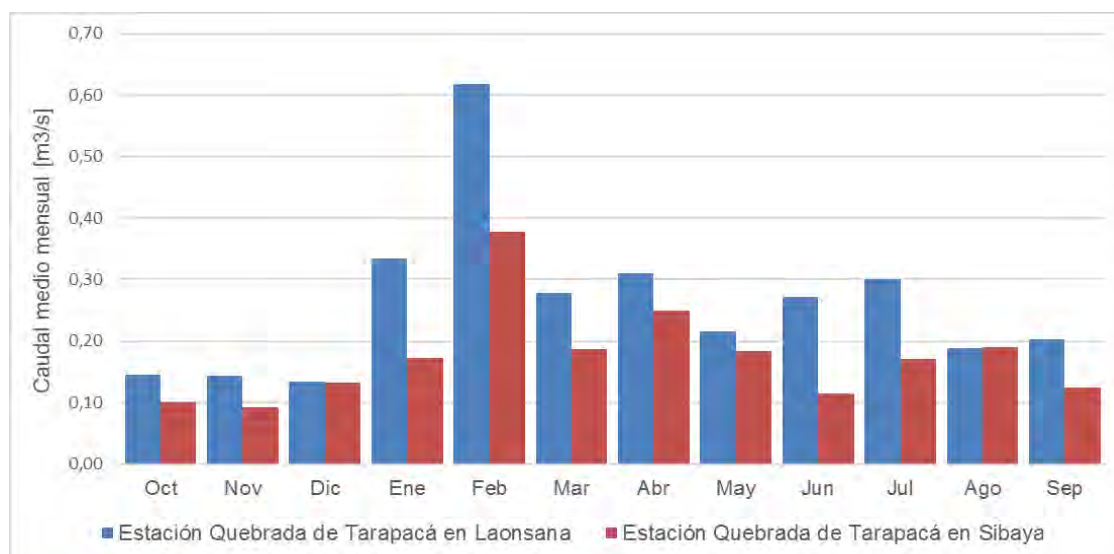
En la Figura 6-11 se muestra la curva de variación estacional elaborada a partir de los caudales medio mensuales para ambas estaciones (Quebrada de Tarapacá en Laonsana y Quebrada de Tarapacá en Sibaya). Se observa la consistencia entre ambas estaciones, la presencia de un flujo base constante en el año y la influencia del invierno altiplánico sobre la hidrología de estas subcuencas.

Figura 6-10 Subcuencas Quebrada de Tarapacá. Cuenca Pampa del Tamarugal.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-11 Curvas de variación estacional para caudales medios mensuales.



Fuente: Elaboración propia

Para comparar correctamente los factores de transposición dada cierta precipitación media, se descontaron los flujos base calculados para ambas estaciones, esto con el objetivo de comparar específicamente los rendimientos dada una tormenta. Al utilizar los caudales medios anuales descontando los flujos bases para ambas subcuencas se obtiene una diferencia porcentual calculada de un 18%, lo cual se consideró aceptable para este método.

Cuadro 6-4 Resultados validación del método utilizado.

	Quebrada de Tarapaca en Laonsana	Quebrada de Tarapacá en Sibaya	
Pp total anual [mm]	96	116	
Área Efectiva de la Cuenca [km²]	1.600	548	
Caudal sin FB medio anual [m³/s]	0,15	0,08	ε
Factor	9,74E-07	1,18E-06	18%

Fuente: Elaboración propia

De esta manera, se consideraron válidos los caudales obtenidos por el método de transposición para las demás subcuencas.

6.4 Caudales de Crecida

6.4.1 Generalidades

Este apartado tiene por finalidad determinar caudales de crecidas asociados a la quebrada de Tarapacá, en particular en el tramo inferior de la quebrada antes del abanico fluvial respectivo. Luego mediante trasposición de caudales, obtener los caudales de crecidas para las seis quebradas aportantes al acuífero de la Pampa del Tamarugal. El presente apartado se encuentra basado en el estudio que borda los mecanismos de recarga de la Pampa del Tamarugal (DGA 2014).

En este capítulo se analiza la validez de los registros de las estaciones fluviométricas disponibles en la zona. Posteriormente, se analizan los registros de las estaciones pluviométricas asociadas, para determinar consistencia y correlación con los registros fluviométricos, y finalmente, se estiman caudales máximos de crecidas a través de métodos indirectos (Curva Número) y se comparan los caudales obtenidos con los presentados en los estudios de referencia. La cuenca considerada para la primera parte, es decir, el cálculo de los caudales de crecida de la quebrada de Tarapacá, se presenta en la Figura 6-10.

Por otro lado, las cuencas de las quebradas aportantes a la Pampa del Tamarugal corresponden a las presentadas en la Figura 3-1. Al considerar los abanicos fluviales como parte de las cuencas, la cuenca aportante a la Pampa del Tamarugal asociada a la quebrada de Tarapacá posee una superficie de 482 km².

6.4.2 Red de Estaciones de la DGA Consideradas para el Estudio

Para la realización de esta sección se utilizaron las estaciones pluviométricas presentadas en la Tabla 6.2. Estas estaciones fueron seleccionadas dentro de la red hidrométrica de la zona debido a su extenso registro y a la calidad de sus datos (DGA, 2014). Junto a lo anterior, se considera su proximidad al sector de estudio. De esta manera, se espera lograr una buena representación de la caracterización pluviométrica de la cuenca. En el caso de las estaciones fluviométricas, el criterio de selección utilizado fue la representatividad dentro de la zona, en este caso, que se encuentre en el cauce de la quebrada de Tarapacá (el área aportante corresponde a una subcuenca de la zona de estudio) y que posea una cantidad de datos suficientes para un análisis estadístico.

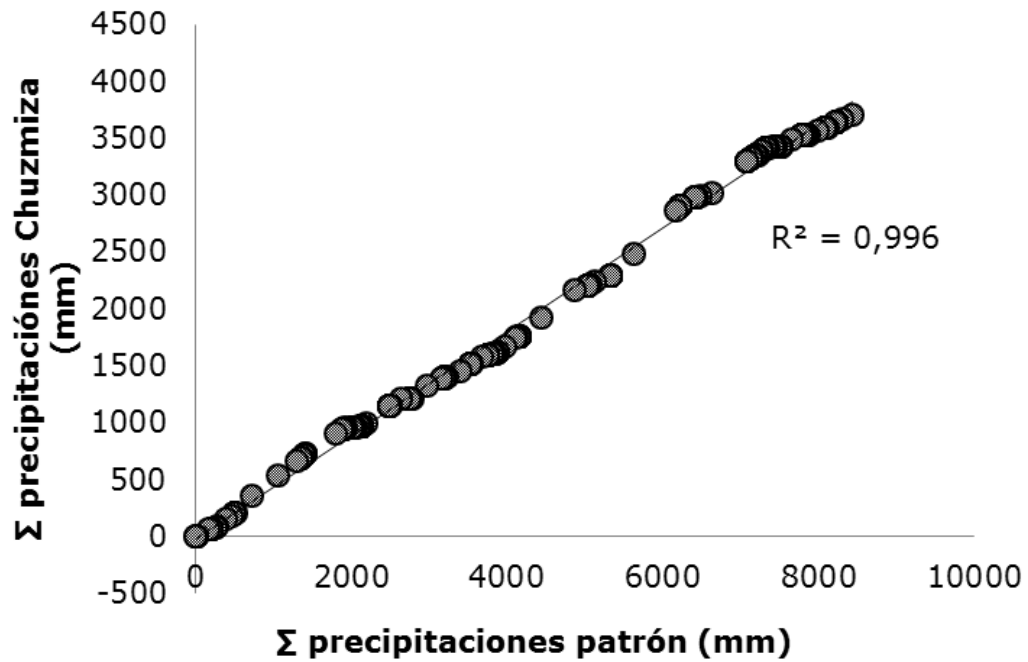
Tabla 6.2 Estaciones Utilizadas en el Estudio.

Código DGA	Nombre Estación	UTM WGS 84 H19		Altitud (msnm)	Tipo	Años Registro
		Este (m)	Norte (m)			
01730007-5	Quebrada Tarapacá en Sibaya	484.985	7.812.491	2.830	Fluviométrica	1994-2014
01730003-2	Río Coscaya en Saitoco	507.358	7.803.521	3.970	Fluviométrica	1985-2014
01730012-1	Quebrada Tarapacá en Laonsana	463.963	7.804.715	1.847	Fluviométrica	2003-2014
01730017-2	Poroma	480.835	7.802.651	2.880	Pluviométrica	1975-2014
01730018-0	Lagunillas (Pampa Lirima)	517.064	7.795.860	4.020	Pluviométrica	1982-2014
01730019-9	Mocha	471.401	7.809.524	2.150	Pluviométrica	1988-2014
01730020-2	Chuzmiza	480.783	7.823.553	3.400	Pluviométrica	1988-2014

Fuente: (DGA, 2014)

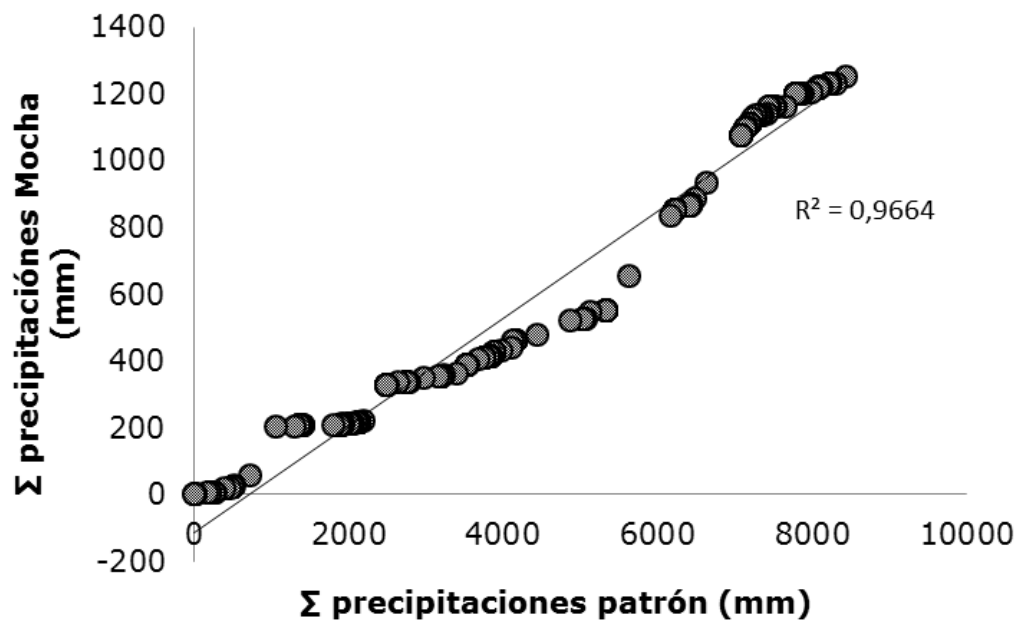
A continuación se presenta un análisis de consistencia de las estaciones pluviométricas utilizadas, mediante el método de curva doble acumulada (Figura 6-12 a Figura 6-15). Se aprecia que la estación Mocha tiene problemas de consistencia para un gran periodo de mediciones, esto probablemente entrega ruido al patrón. Por otro lado, se observa que la estación Poroma, posee dos pendientes y se debiese corregir o identificar a que se debe ese cambio, si es antropológico o climático.

Figura 6-12 Consistencia Estación Chuzmiza



Fuente: (DGA, 2014)

Figura 6-13 Consistencia Estación Mocha



Fuente: (DGA, 2014)

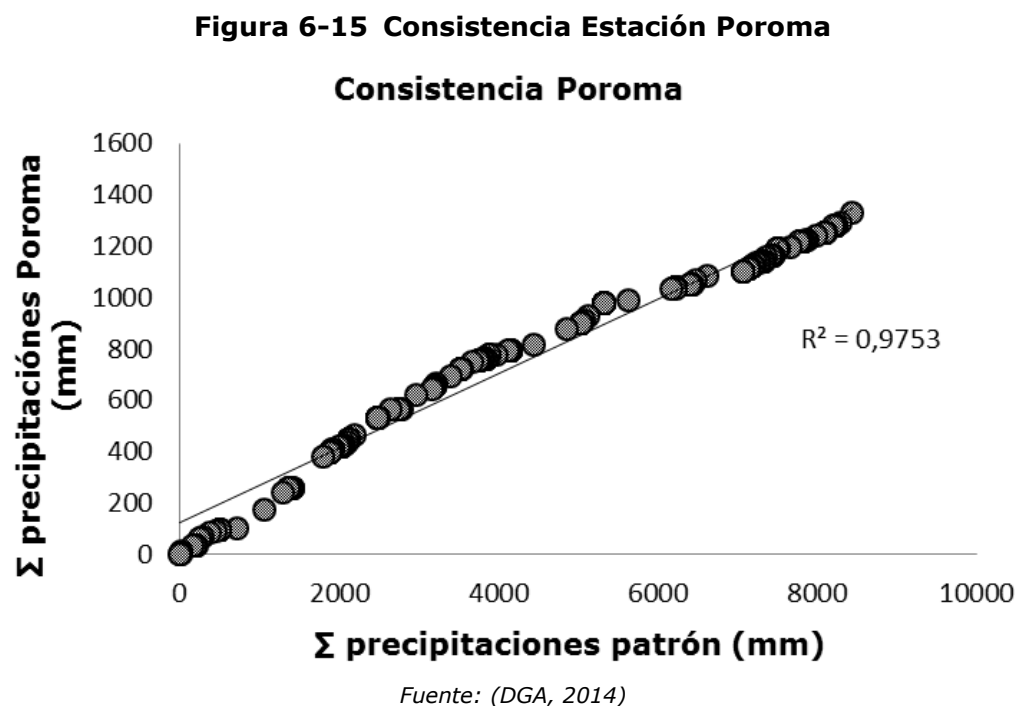
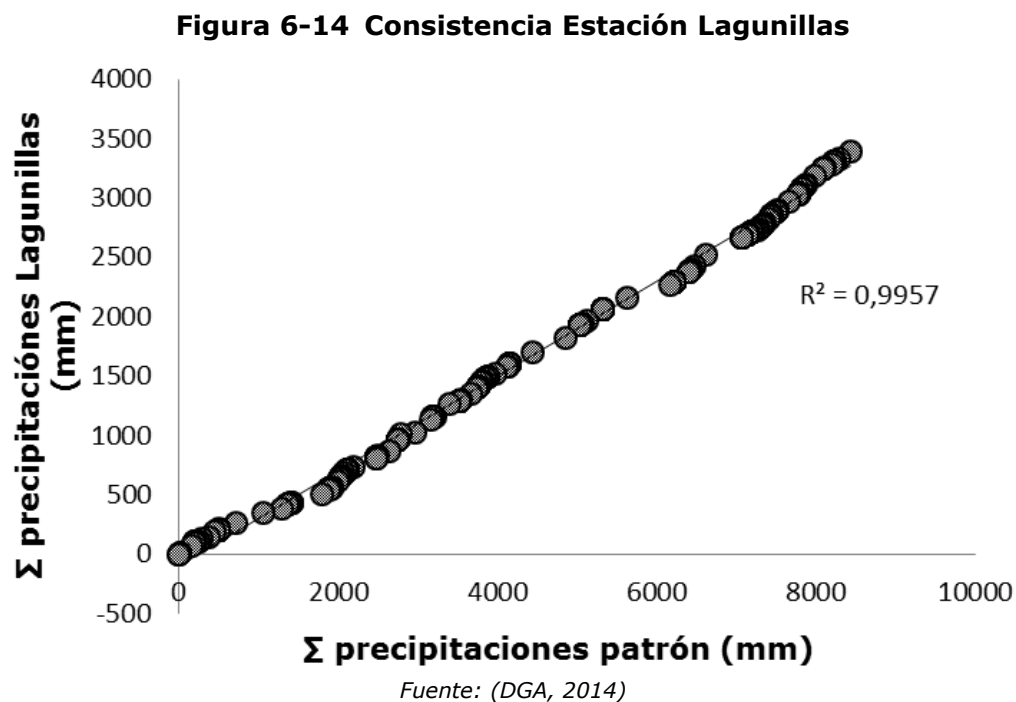
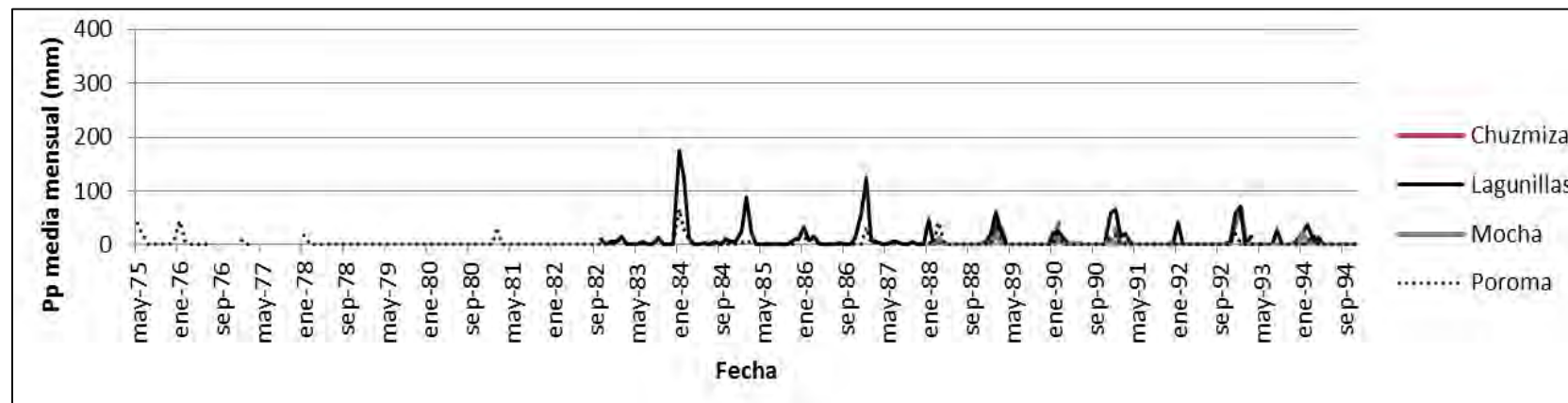


Figura 6-16

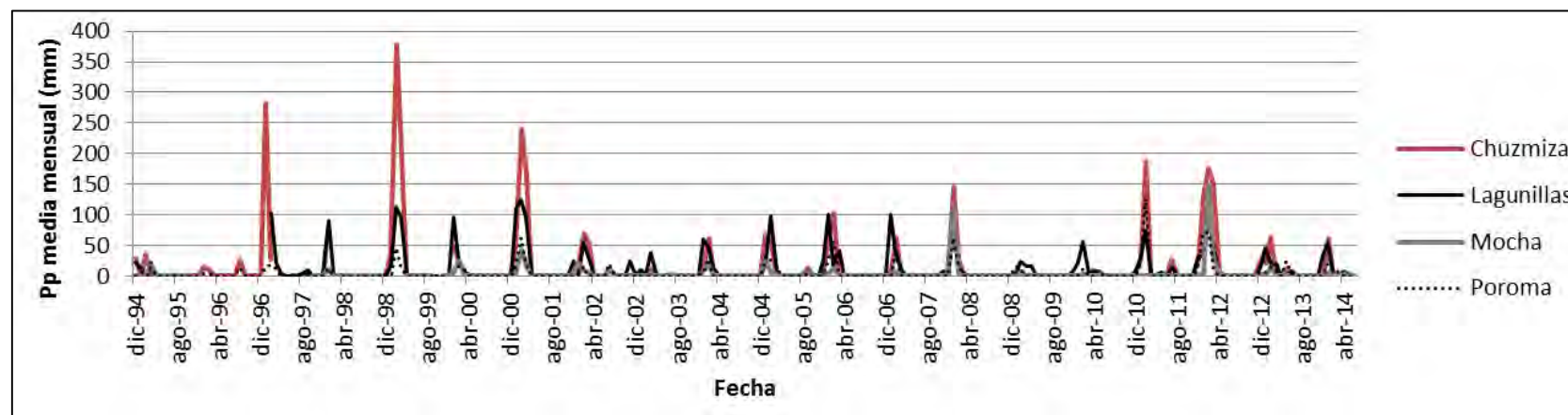
Precipitación Media Mensual en Estaciones Consideradas



Fuente: (DGA, 2014)

Figura 6-17

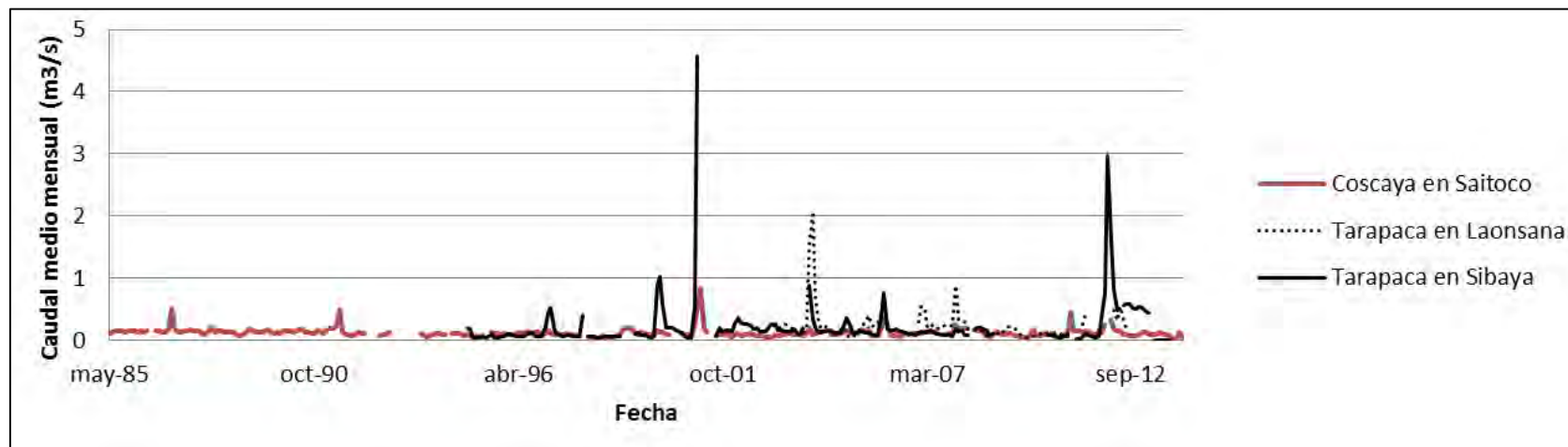
Precipitación Media Mensual en Estaciones Consideradas (Continuación)



Fuente: (DGA, 2014)

Figura 6-18

Caudales Medios Mensuales en Estaciones Consideradas



Fuente: (DGA, 2014)

6.4.3 Análisis de Frecuencia en Estaciones Pluviométricas

A partir de las precipitaciones en 24 horas máximas anuales de cada estación, se realizó un análisis de frecuencia para determinar la precipitación asociada a distintos períodos de retorno. En la Tabla 6.3 se presentan el resumen de los resultados de este análisis, se muestra la mejor distribución encontrada para cada estación.

Tabla 6.3 Precipitación en 24 horas para Distintos Períodos de Retorno.

Período de Retorno (años)	Pp Estación (mm)			
	Chuzmiza 3.400 [m.s.n.m.]	Mocha 2.150 [m.s.n.m.]	Poroma 2.880 [m.s.n.m.]	Lagunillas 4.020 [m.s.n.m.]
Distribución	Log-Pearson	Log-Parson	Gumbel	Log-Normal
5	34,2	15,7	18,3	23,0
10	43,8	23,0	23,3	27,0
20	52,9	28,7	28,0	30,7
50	64,2	34,1	34,1	35,6
100	72,4	36,7	38,7	39,3

Fuente: (DGA, 2014)

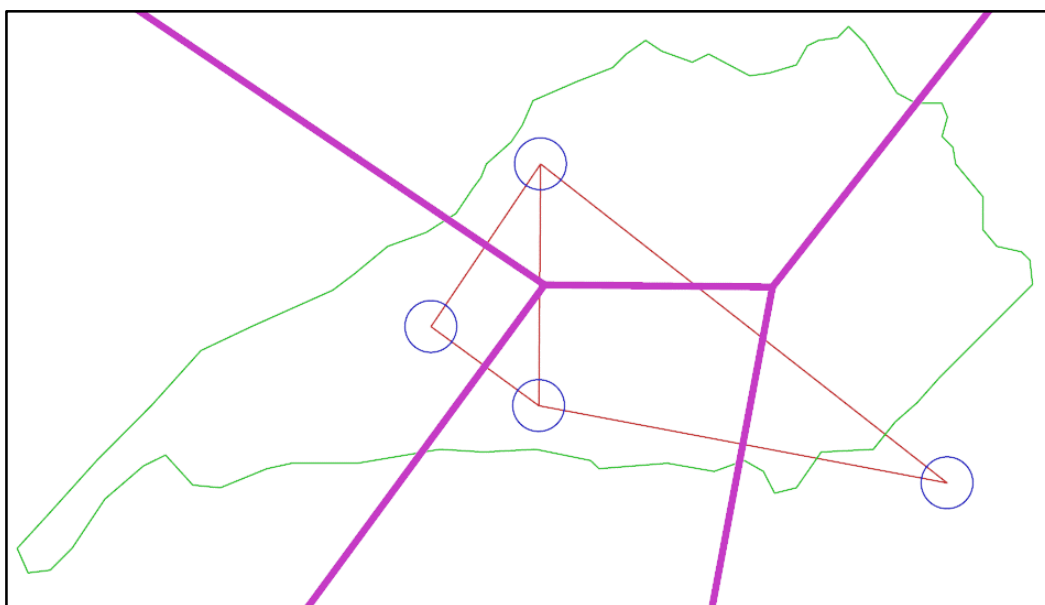
Tras realizar el análisis de frecuencia, se calculó la precipitación representativa de la cuenca de la quebrada de Tarapacá mediante el método de los polígonos de Thiessen, presentados en la Figura 6-19, cuyas áreas relativas se presentan en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Áreas Relativas de los Polígonos de Thiessen.

Estación	Área Relativa (%)
Chuzmiza	31,6
Mocha	25,8
Poroma	19,2
Lagunillas	23,4
Total	100

Fuente: (DGA, 2014)

Figura 6-19 Esquema Polígonos de Thiessen Tarapacá



Fuente: (DGA, 2014)

Luego de determinar los polígonos y sus áreas relativas, se determinó la precipitación representativa de la cuenca, presentada en la Tabla 6.5.

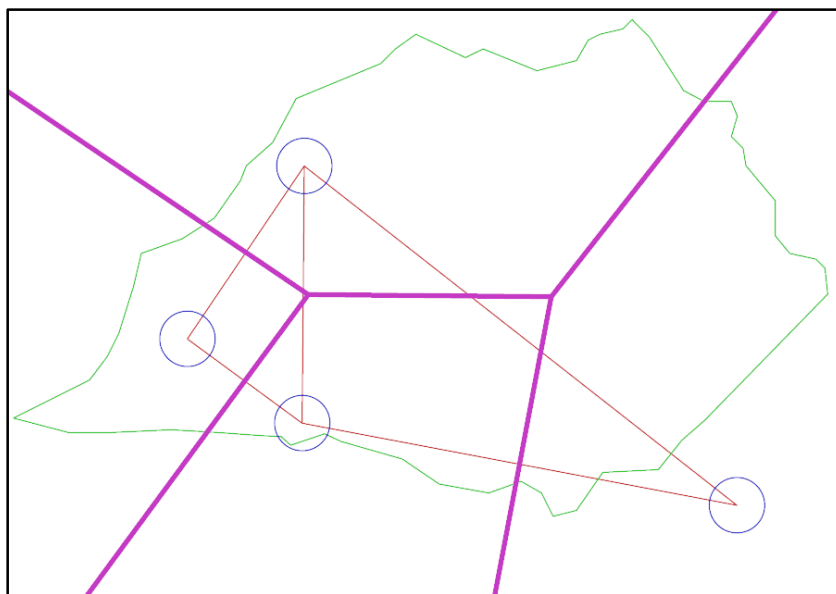
Tabla 6.5 Precipitación Representativa de la Cuenca.

T (años)	Pp en Cuenca (mm)
5	23,8
10	30,6
20	36,7
50	44,0
100	49,0

Fuente: (DGA, 2014)

Utilizando la misma metodología anteriormente descrita, se determinó la precipitación representativa para la cuenca cuyo punto de salida corresponde a la estación fluviométrica Quebrada de Tarapacá en Laonsana (ver Figura 6-20).

Figura 6-20 Esquema Polígonos de Thiessen Cuenca Quebrada de Tarapacá en Laonsana



Fuente: (DGA, 2014)

Los valores resultantes se presentan en la Tabla 6.6.

Tabla 6.6 Precipitación Representativa de la Cuenca Quebrada de Tarapacá en Laonsana.

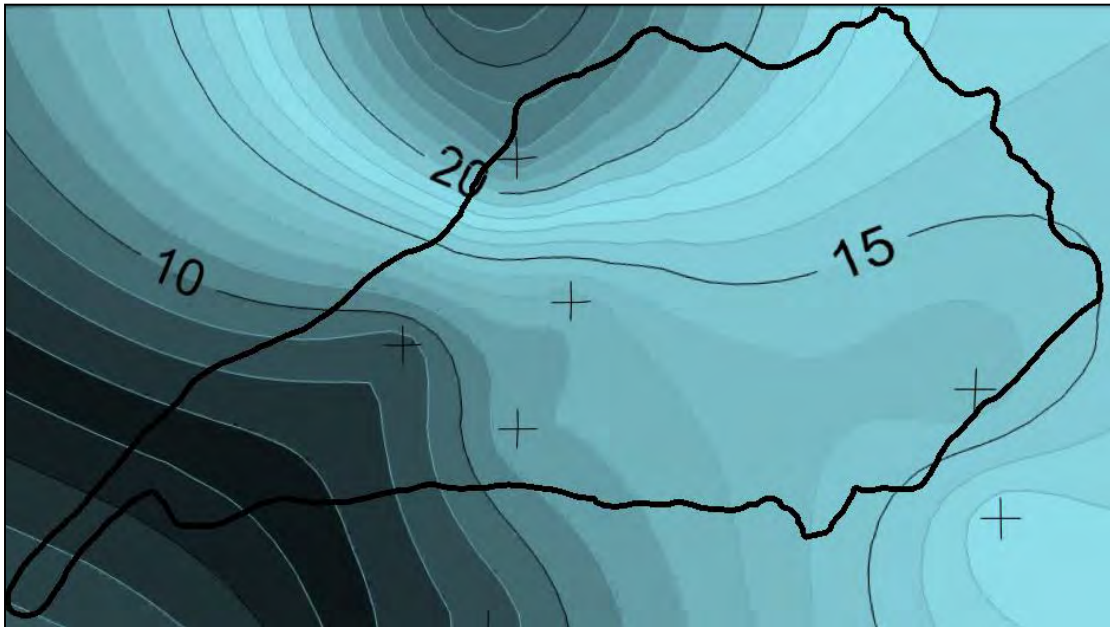
T (años)	Pp en Laonsana (mm)
5	25,4
10	32,2
20	38,4
50	46,1
100	51,5

Fuente: (DGA, 2014)

Se observa que las precipitaciones representativas de este último punto son mayores que los correspondientes a la totalidad de la cuenca de Tarapacá. Esto se debe a que la cuenca se encuentra a una mayor altura y existe un efecto orográfico en las precipitaciones en la zona.

Otra metodología utilizada para el cálculo de precipitaciones es la de las isoyetas. En la Figura 6-21 se presentan las isoyetas para un período de retorno de 2 años.

Figura 6-21 Isoyetas para T=2 años.



Fuente: (DGA, 2014)

De esta forma se calcula la precipitación representativa para la cuenca para un período de retorno de 2 años, obteniendo $P_p(T = 2 \text{ (años)}) = 13,3 \text{ (mm)}$. Realizando el mismo proceso para la cuenca controlada por la estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana, se obtiene $P_p(T = 2 \text{ (años)}) = 14,8 \text{ (mm)}$.

Luego utilizando el promedio de los coeficientes de frecuencia para las zonas cercanas a la quebrada de Tarapacá (ver Tabla 6.7), **presentes en el “Manual de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Fluviométrica” (DGA, 1995), se pueden determinar** las precipitaciones para distintos períodos de retorno (ver Tabla 6.7). Para Obtener los coeficientes de frecuencia para el periodo de retorno 2 años, se normalizaron los promedios de coeficiente de frecuencia para 10 años de periodo de retorno por el valor de $TR = 2$ años.

Con los resultados anteriores se obtienen los valores presentados en la Tabla 6.8, en donde se encuentra un resumen con la precipitación representativa de la cuenca de la quebrada de Tarapacá y de la cuenca delimitada por la estación en Laonsana en Tarapacá para distintos períodos de retorno.

Tabla 6.7 Coeficientes de Frecuencia Utilizados.

Período de Retorno (años)	Coeficiente de Frecuencia (T=10)			CF (T=2)
	Chapiquiña	Collahuasi	Promedio	Promedio
2	0,548	0,533	0,541	1,000
5	0,819	0,831	0,825	1,526
10	1,000	1,000	1,000	1,850
20	1,172	1,144	1,158	2,142
50	1,392	1,310	1,351	2,500
100	1,556	1,421	1,489	2,754

Fuente: (DGA, 2014)

Tabla 6.8 Precipitación Representativa para Distintos Períodos de Retorno.

Período de Retorno (años)	Precipitación (mm)	
	Cuenca Tarapacá	Estación Laonsana
2	13,3	14,8
5	20,4	22,5
10	24,7	27,3
20	28,6	31,6
50	33,3	36,9
100	36,7	40,7

Fuente: (DGA, 2014)

6.4.4 Análisis de Crecidas en la Quebrada de Tarapacá

Para el análisis de crecidas no es factible utilizar directamente las metodologías convencionales de análisis de crecidas propuestas en el "Manual de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica" (DGA, 1995), ya que los métodos empíricos que condensa este manual son válidos desde la Región de Atacama hasta la Región de Los Lagos. Es por esto que se proponen dos metodologías de cálculo de caudales

máximos basadas en la escasa información hidrológica de la zona, la que se presentan a continuación.

a) Transposición de caudales:

Como base del análisis se considera los registros de caudales máximos instantáneos de la estación Quebrada de Tarapacá en Sibaya, ubicada en la parte alta de la cuenca de la quebrada de Tarapacá. Los registros de esta estación no se encuentran completos, por lo que se utilizaron los datos obtenidos en la (DGA, 2011), que cubren desde el año 1962 hasta el año 2010. Para validar estos datos, primero se determinó la representatividad de la estación fluviométrica Quebrada de Tarapacá en Sibaya respecto a la estación pluviométrica Chuzmiza, es decir, se determinó si esta estación fluviométrica realmente mide las crecidas registradas por los pluviómetros cercanos. Para esto se realizaron dos correlaciones: en la primera se presentan los caudales medios diarios en función de las precipitaciones máximas en 24 horas a nivel anual (Figura 6-22) y en la segunda se presentan las precipitaciones en 24 horas en función de los caudales medios diarios máximos anuales (Figura 6-23).

Figura 6-22 Correlación Precipitación Máxima en 24 hrs Anual con Caudal Medio Diario. Estación Quebrada de Tarapacá en Sibaya.

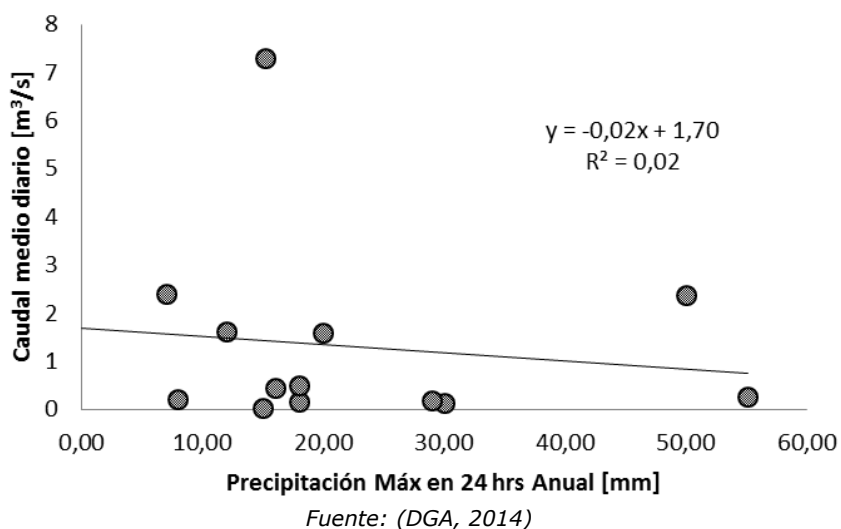


Figura 6-23 Correlación Caudal Medio Diario Máximo Anual con Precipitación en 24 hrs. Estación Quebrada de Tarapacá en Sibaya.

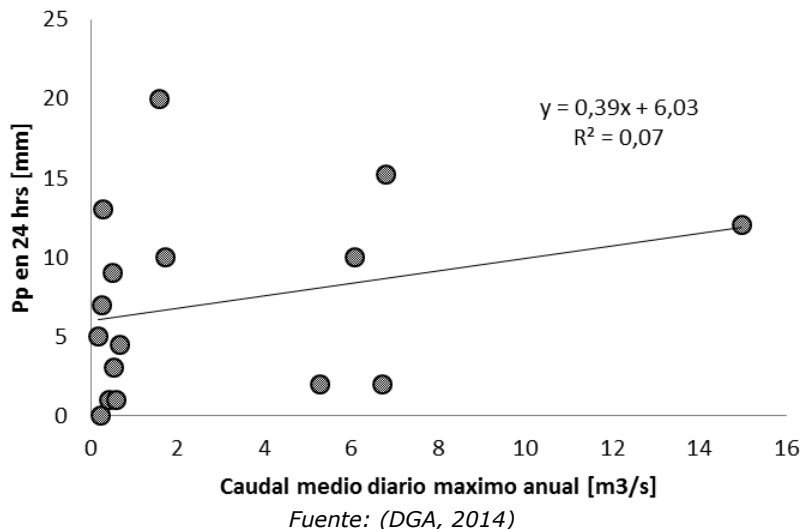


Figura 6-24 Correlación Precipitación Máxima en 24 hrs Anual con Caudal Medio Diario. Estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana.

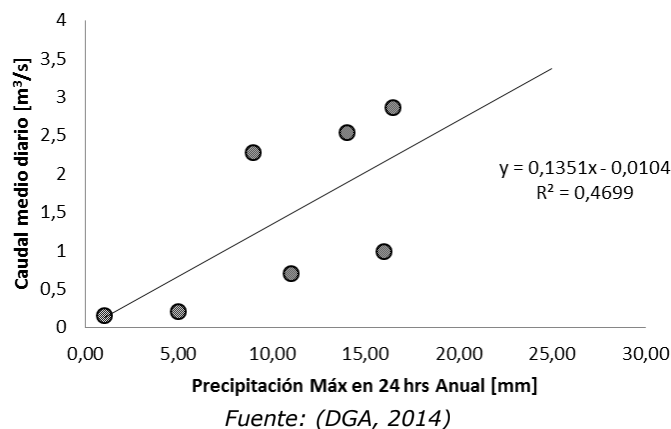


Figura 6-25 Correlación Caudal Medio Diario Anual con Precipitación en 24 hrs Estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana.

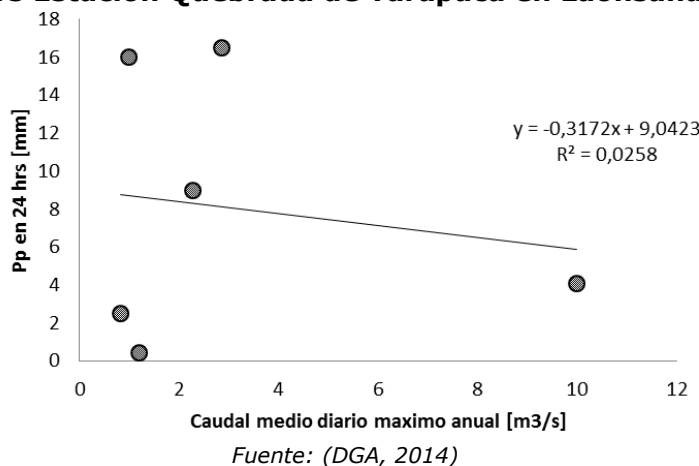


Figura 6-26 Correlación Precipitación Máxima en 24 hrs Anual con Caudal Medio Diario. Estación Quebrada de Tarapacá en Mina San Juan.

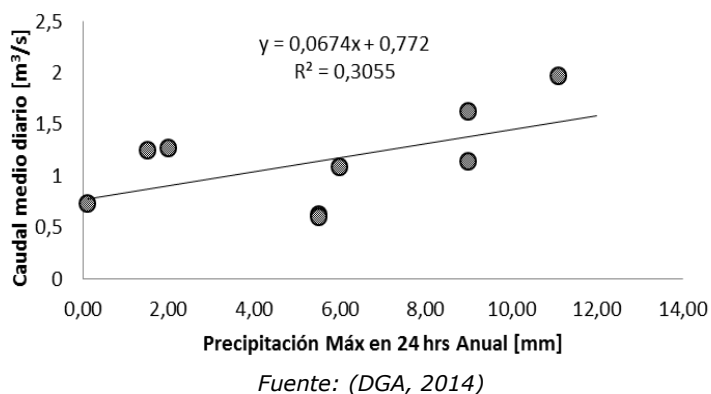


Figura 6-27 Correlación Caudal Medio Diario Anual con Precipitación en 24 hrs. Estación Quebrada de Tarapacá en Mina San Juan.

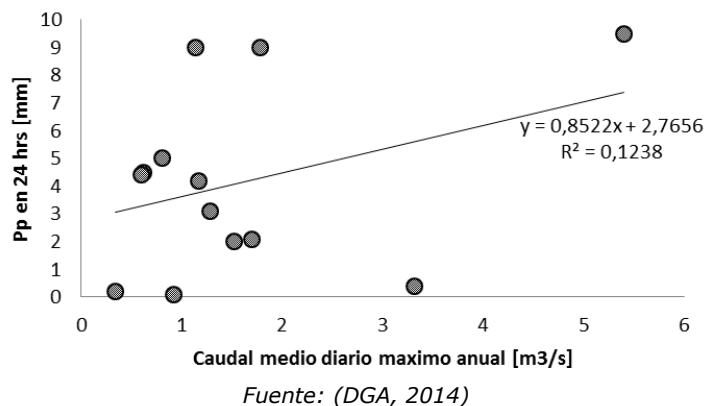


Figura 6-28 Correlación Precipitación Máxima en 24 hrs Anual con Caudal Medio Diario para Estación Río Coscaya en Saitoco.

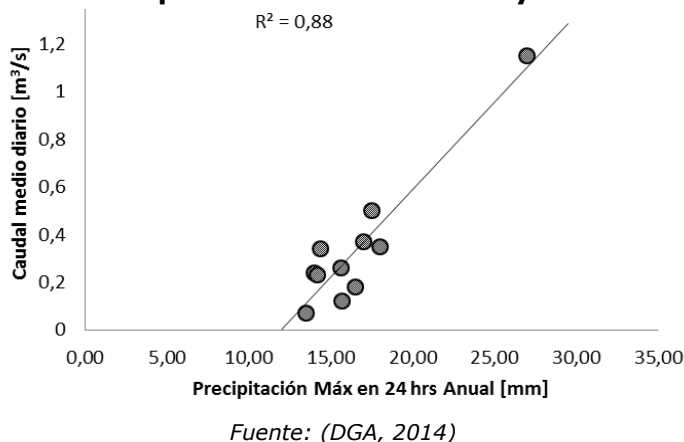
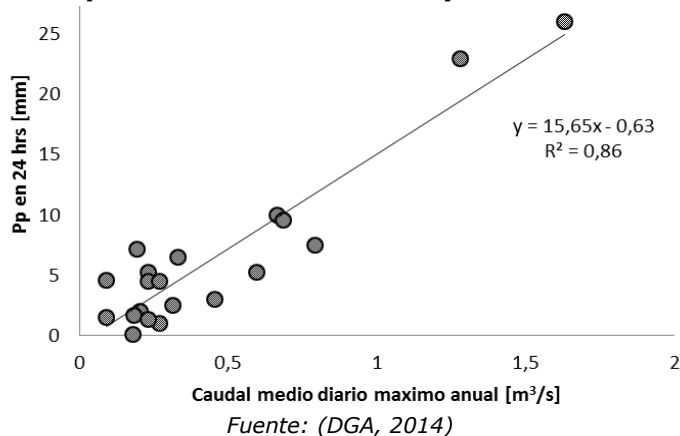


Figura 6-29 Correlación Caudal Medio Diario Anual con Precipitación en 24 hrs para Estación Río Coscaya en Saitoco.



A continuación se relacionaron los caudales máximos instantáneos en la estación Quebrada de Tarapacá en Sibaya en función de la misma variable en la estación Río Coscaya en Saitoco, para el mismo periodo de tiempo, tal como se observa en la Figura 6-30.

Tras eliminar puntos anómalos, se llega a un coeficiente de correlación igual a 0,81.

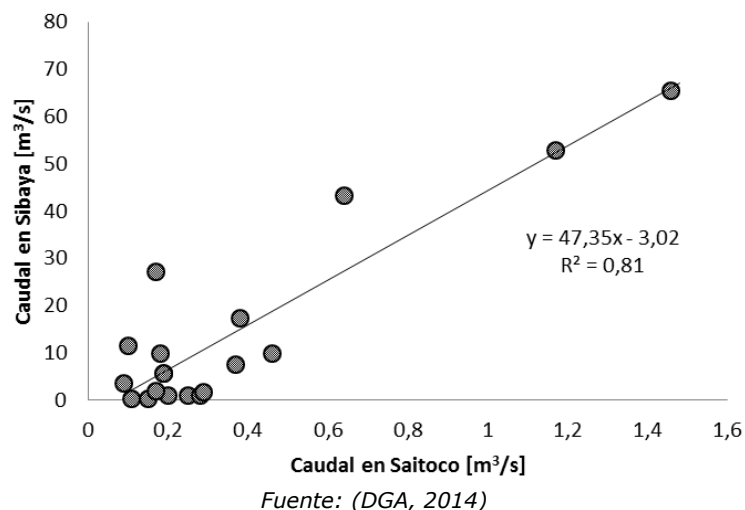
De esta forma se corrigieron los caudales máximos instantáneos de la (DGA, 2011). Se corrigieron datos sólo a partir de 1985, ya que este es el año en que comienza el registro de la estación Río Coscaya en Saitoco. En la Tabla 6.9 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 6.9 Caudales Máximos Instantáneos Corregidos para Estación Quebrada de Tarapacá en Sibaya

Año hidrológico	QMI (m³/s)	Año hidrológico	QMI (m³/s)
1985-1986	6	1999-2000	19
1986-1987	66	2000-2001	67
1987-1988	7	2001-2002	9
1988-1989	11	2002-2003	1
1989-1990	52	2003-2004	11
1990-1991	27	2004-2005	15
1991-1992	6	2005-2006	15
1992-1993	6	2006-2007	10
1993-1994	5	2007-2008	6
1994-1995	2	2008-2009	13
1995-1996	4	2009-2010	18
1996-1997	6	2010-2011	5
1997-1998	2	2011-2012	26
1998-1999	31	2012-2013	11

Fuente: (DGA, 2014)

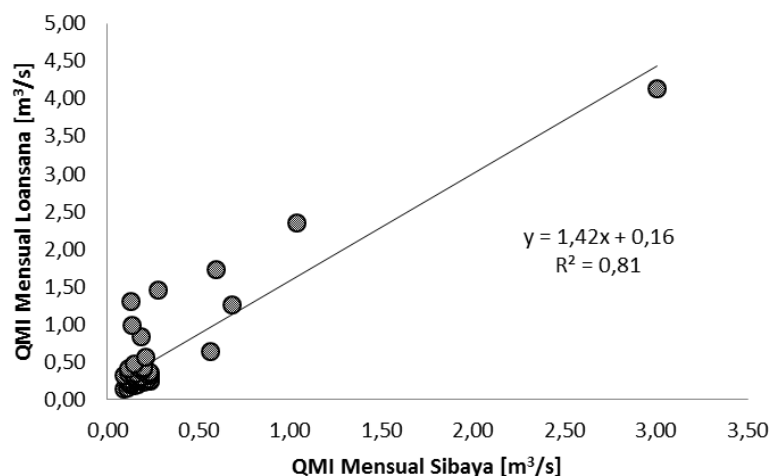
Figura 6-30 Correlación entre Caudales Máximos Instantáneos en QT Sibaya y RC Saitoco.



Considerando los datos de la estación Quebrada de Tarapacá en Sibaya como válidos, se realizó una trasposición de caudales desde esta estación a la estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana, ubicada en la parte baja de la cuenca, para poder estimar posteriormente el caudal máximo asociado a distintos periodos de retorno a la salida de la cuenca.

Para realizar la trasposición de caudales antes expuesta, se correlacionaron los caudales máximos instantáneos para ambas estaciones fluviométricas en un periodo de 10 años. Como se aprecia en la Figura 6-31, se obtiene un coeficiente de correlación de 0,81, por lo tanto se utilizó esta correlación para determinar los caudales máximos instantáneos en la estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana. Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 6.13.

Figura 6-31 Correlación de Caudales Máximos Instantáneos Mensuales para Estaciones Quebrada de Tarapacá en Sibaya y en Laonsana.



Fuente: (DGA, 2014)

Tabla 6.10 Caudales Máximos Instantáneos Transpuestos para Estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana.

Año hidrológico	QMI (m³/s)	Año hidrológico	QMI (m³/s)
1985-1986	9	1999-2000	26
1986-1987	92	2000-2001	94
1987-1988	10	2001-2002	13
1988-1989	15	2002-2003	2
1989-1990	73	2003-2004	15
1990-1991	38	2004-2005	20
1991-1992	9	2005-2006	21
1992-1993	9	2006-2007	15
1993-1994	7	2007-2008	9
1994-1995	3	2008-2009	18
1995-1996	6	2009-2010	25
1996-1997	8	2010-2011	7
1997-1998	3	2011-2012	36
1998-1999	44	2012-2013	15

Fuente: (DGA, 2014)

A partir de estos datos se realiza un análisis de frecuencia cuyos resultados se presentan en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11 Caudales para Distintos Períodos de Retorno en Estación Quebrada de Tarapacá en Laonsana.

T (años)	Caudal (m³/s)
5	33
10	51
20	72
50	108
100	141
Distribución	Log-Normal

Fuente: (DGA, 2014)

Finalmente se transpusieron estos caudales a la salida de la cuenca en estudio mediante la relación:

$$\frac{Q_1}{A_1 \cdot P_1} = \frac{Q_2}{A_2 \cdot P_2}$$

Considerando las precipitaciones presentadas en la Tabla 6.5, Tabla 6.6 y Tabla 6.8 y las áreas presentadas en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12 Área de las cuencas en Estudio.

Cuenca	Área (km²)
Río Coscaya en Saltoco	69
Quebrada de Tarapacá en Sibaya	610
Quebrada de Tarapacá en Laonsana	1.338
Quebrada de Tarapacá	1.725

Fuente: (DGA, 2014)

Finalmente se obtuvieron los caudales máximos instantáneos para toda la cuenca en estudio, que se presentan en la Tabla 6.13.

Tabla 6.13 Caudal Máximo Instantáneo en la Cuenca de la Quebrada de Tarapacá para Distintos Períodos de Retorno Según Método de Transposición.

Período de Retorno (años)	Caudal máximo instantáneo (m ³ /s)	
	Transposición Thiessen	Transposición Isoyetas
5	40	38
10	62	59
20	89	84
50	133	126
100	173	164

Fuente: (DGA, 2014)

De los resultados obtenidos mediante esta metodología, se destaca la inconsistencia entre la pendiente de la correlación de caudales de la estación Río Coscaya en Saitoco y Quebrada de Tarapacá en Sibaya y la relación entre el área de la cuenca aportante de ambas estaciones. Esto se atribuye a que la estación ubicada en Saitoco, a pesar de tener una buena correlación con las precipitaciones, subestima los caudales máximos. Esto se verificó al observar que esta estación registra caudales pequeños en relación a otras estaciones de la zona para eventos de crecidas, tales como el antecedente del año 2012.

b) Método curva número:

Este método consiste en determinar la precipitación efectiva en la cuenca, para luego utilizarla en un hidrograma triangular y determinar el caudal máximo instantáneo. Para esto se tiene la siguiente metodología:

Precipitación efectiva:

- Determinar la clase del suelo:

CLASE C: Suelos con capacidad de infiltración bajas. Marga arcillosa, marga arenosa poco profunda, suelos de bajo contenido orgánico y suelos generalmente con alto contenido de arcilla.

- Clasificar las condiciones de humedad (Lluvia antecedente de 5 días):

Grupo AMC I estación de crecimiento $P_p < 35,6$ mm.

- Determinar valor de curva número (ver Anexo F):

86,7; mezcla entre barbecho pobres con cubierta de residuos vegetales que ocupe al menos el 5% de la superficie del suelo y pastizales pobres.

- Transformar de curva número II a curva número I:

$$CN(I) = \frac{4,2 \cdot CN(II)}{10 - 0,058 \cdot CN(II)}$$

- Calcular el máximo valor de retención del suelo (S):

$$S(mm) = \frac{25400}{CN} - 254$$

- Calcular la precipitación efectiva en la cuenca (Pe):

$$Pe = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S}$$

Donde P es la precipitación en la cuenca asociada al período de retorno T.

Hidrograma unitario:

- Calcular el tiempo de concentración (t_c):

$$t_c(hr) = 0,948 \cdot \left(\frac{L[km]^3}{\Delta H[m]} \right)^{0,385} = 0,948 \cdot \left(\frac{98,6^3}{4544} \right)^{0,385} = 7,4 hr$$

- Calcular tiempo de lluvia efectiva (t_r). En la literatura se encuentran distintas expresiones, por lo cual se utiliza el promedio entre estas:

$$t_{r1}(hr) = 2 \cdot \sqrt{t_c[hr]} = 5,5 hr$$

$$t_{r2}(hr) = t_c(hr) = 7,4 hr$$

$$t_{r3}(hr) = \frac{t_c[hr]}{(1 + t_c[hr])^{0,2}} = 4,9 hr$$

$$\overline{t_r(hr)} = \frac{1}{3} \cdot (t_{r1} + t_{r2} + t_{r3}) = 5,9 hr$$

- Calcular el tiempo de retardo (t_p):

$$t_p = 0.6 \cdot t_c = 4,5 \text{ hr}$$

- Calcular tiempo al máximo o 'peak' (T_p):

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_p = 7,4 \text{ hr}$$

- Calcular el caudal máximo (Q_p):

$$Q_p \left[\frac{m^3}{s} \right] = 0.208 \cdot \frac{A}{T_p} \cdot P$$

Donde P es la precipitación en la cuenca asociada al período de retorno T.

Finalmente en la Tabla 6.14 se presenta el resumen de caudales máximos instantáneos según período de retorno para el método de la curva número.

Tabla 6.14 Caudal Máximo Instantáneo para Distintos Períodos de Retorno Según Curva Número.

Período de Retorno (años)	Caudal máximo instantáneo (m³/s)	
	Curva número Thiessen	Curva número Isoyetas
5	13	2
10	67	18
20	144	47
50	265	99
100	364	144

Fuente: (DGA, 2014)

6.4.5 Análisis de Caudales de Crecidas en Cuencas de Quebradas Aportantes

Los puntos de drenaje de las cuencas aportantes corresponden a los abanicos fluviales.

Las coordenadas de los puntos de drenaje para las cuencas consideradas se presentan en la Tabla 6.15:

Tabla 6.15 Puntos de Drenaje de Cuencas.

QUEBRADA	WGS84 19S	
	UTM E (m)	UTM N (m)
AROMA	425.764	7.785.898
TARAPACÁ	429.795	7.749.844
QUIPISICA	432.843	7.754.462
S	433.952	7.755.871
QUISMA	453.123	7.731.035
CHACARILLAS	435.927	7.715.508

Fuente: Elaboración propia

Las cuencas delimitadas y los DEMs (UTM WGS84 19S), se presentan en el apartado correspondiente a la caracterización de las quebradas aportantes.

Utilizando la información contenida en la Tabla 6.13 y en la Tabla 6.15, además de la expresión de transposición:

$$\frac{Q_1}{A_1 P p_1} = \frac{Q_2}{A_2 P p_2}$$

Se obtienen los caudales de crecida para distintos periodos de retorno presentados en la Tabla 6.16. Esta Tabla muestra un resumen de los caudales de crecida para las seis cuencas.

Tabla 6.16 Resumen de Caudales de Crecida para Distintos Periodos de Retorno en Cuencas Aportantes al Acuífero de la Pampa del Tamarugal.

Quebrada	Área (km²)	Área ef (km²)	Pp (mm)	Q 5 (m³/s)	Q 10 (m³/s)	Q 20 (m³/s)	Q 50 (m³/s)	Q 100 (m³/s)
Aroma	1.759	1.572	90,7	54,4	79,2	113,5	164,4	209,3
Tarapacá	1.735	1.600	96.4	58,9	85,7	122,9	177,9	226,5
Quipisca	881	775	25.9	7,7	11,2	16,0	23,7	29,5
Sagasca	999	782	36.7	10,9	15,9	22,8	33,1	42,1
Quisma	281	276	63.6	6,7	9,8	13,9	20,2	25,8
Chacarillas	1.211	1.200	98.2	44,9	65,5	93,9	135,9	173,1

Fuente: Elaboración propia

6.5 Curvas de Variación Estacional

Para obtener las curvas de variación estacional, las cuales representan el comportamiento mensual de las quebradas para distintas probabilidades de excedencia, se utilizó la trasposición de caudales a partir de los datos de flujos medios mensuales de la estación Quebrada Tarapacá en Sibaya. La cuenca que aporta agua a esta estación posee un área de 610 km². En la Tabla 6.17 se presentan los datos utilizados. No se considera el relleno de datos ya que la extensión del registro es suficiente para desarrollar un análisis de frecuencia.

Tabla 6.17 Caudales Medios Mensuales Estación Quebrada de Tarapacá en Sibaya.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1993												
1994												0,20
1995	0,18	0,03	0,05	0,04	0,06	0,03	0,05	0,09	0,04	0,04	0,06	0,06
1996	0,09	0,09	0,07	0,05	0,05	0,06	0,07	0,11	0,11	0,05	0,05	0,06
1997	0,21	0,44	0,52	0,18	0,10	0,07	0,06	0,08	0,08	0,05	0,06	0,05
1998	0,39		0,05	0,05	0,05	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05
1999	0,06					0,10	0,12	0,08	0,08	0,06	0,03	0,06
2000	0,90	1,03	0,58	0,20	0,19	0,20	0,15	0,13	0,11	0,06	0,04	0,04
2001	0,54	4,58						0,05	0,19	0,13	0,15	0,16
2002	0,13	0,26	0,35	0,27	0,26	0,25	0,23	0,18	0,19	0,14	0,14	0,14
2003	0,22	0,25	0,24	0,15	0,16	0,13	0,14	0,13	0,17	0,11	0,09	0,20
2004		0,89	0,34	0,20	0,11	0,13	0,14	0,15	0,13	0,12	0,12	0,11
2005	0,23	0,35	0,24	0,12	0,12	0,14	0,14	0,11	0,12	0,09	0,08	0,08
2006	0,37	0,75	0,18	0,15	0,16	0,17	0,13	0,13	0,12	0,09	0,09	0,08
2007	0,11	0,13	0,12	0,14	0,16	0,11	0,09	0,10	0,08	0,07	0,10	0,06
2008	0,17	0,14	0,15	0,07	0,08		0,16	0,20	0,19	0,17	0,16	0,08
2009	0,09											
2010							0,08	0,07	0,06	0,04	0,04	0,07
2011	0,06			0,02	0,02	0,06	0,10	0,07	0,06	0,04	0,05	0,33
2012	0,75	2,96	1,60	0,82	0,47		0,55	0,57	0,57	0,52	0,49	0,53
2013	0,51	0,45	0,44									
2014			0,12	0,16	0,17	0,15	0,15	0,15	0,09	0,12	0,15	0,15
2015	0,17	0,20	0,22	0,19	0,16	0,18	0,17	0,16	0,15	0,15	0,15	0,14
2016	0,14	0,16			0,15	0,13	0,12	0,14	0,14	0,11	0,11	0,14
2017	0,16		0,18	0,13	0,15	0,18						

Fuente: Elaboración propia

Utilizando la información de la Tabla 6.17 y las áreas de las quebradas aportantes presentadas en la Tabla 6.16, además de la expresión de transposición:

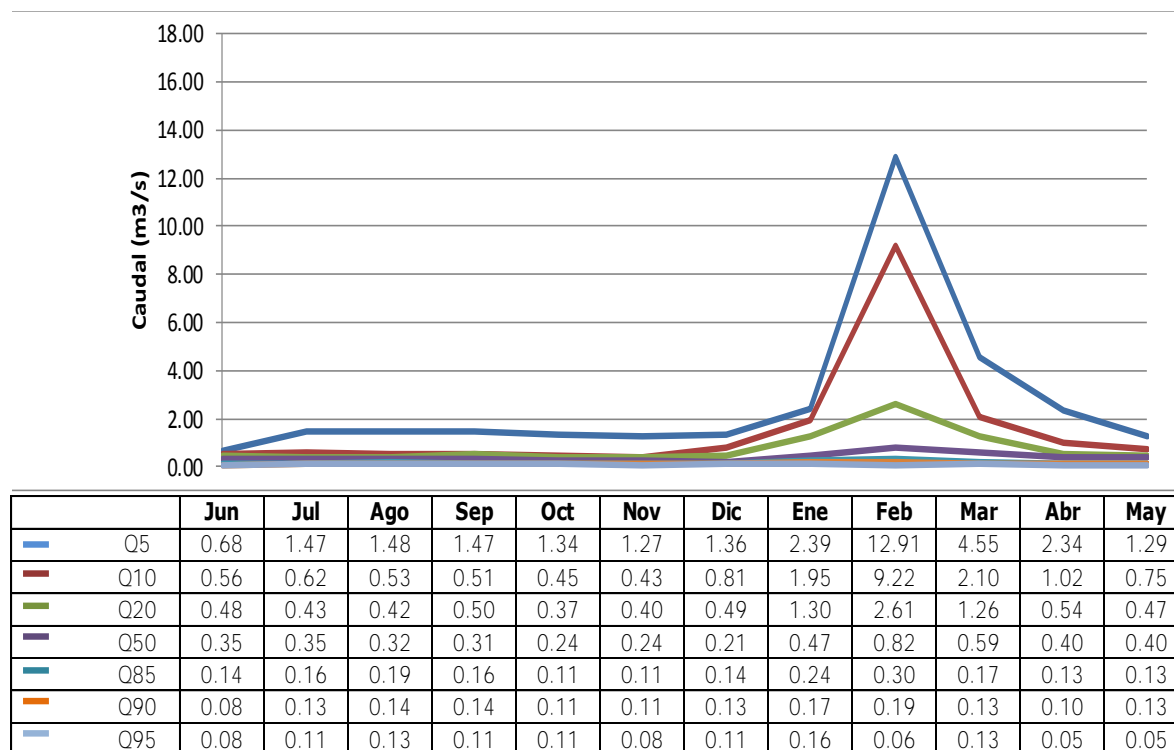
$$\frac{Q_1}{A_1 P p_1} = \frac{Q_2}{A_2 P p_2}$$

Se obtienen los caudales medios mensuales para las quebradas aportantes al acuífero de la Pampa del Tamarugal.

Se procedió a realizar un análisis de frecuencia de los caudales medios mensuales para así obtener los caudales asociados a distintas probabilidades de excedencia. Para este análisis de frecuencia se utilizó la distribución de Weibull.

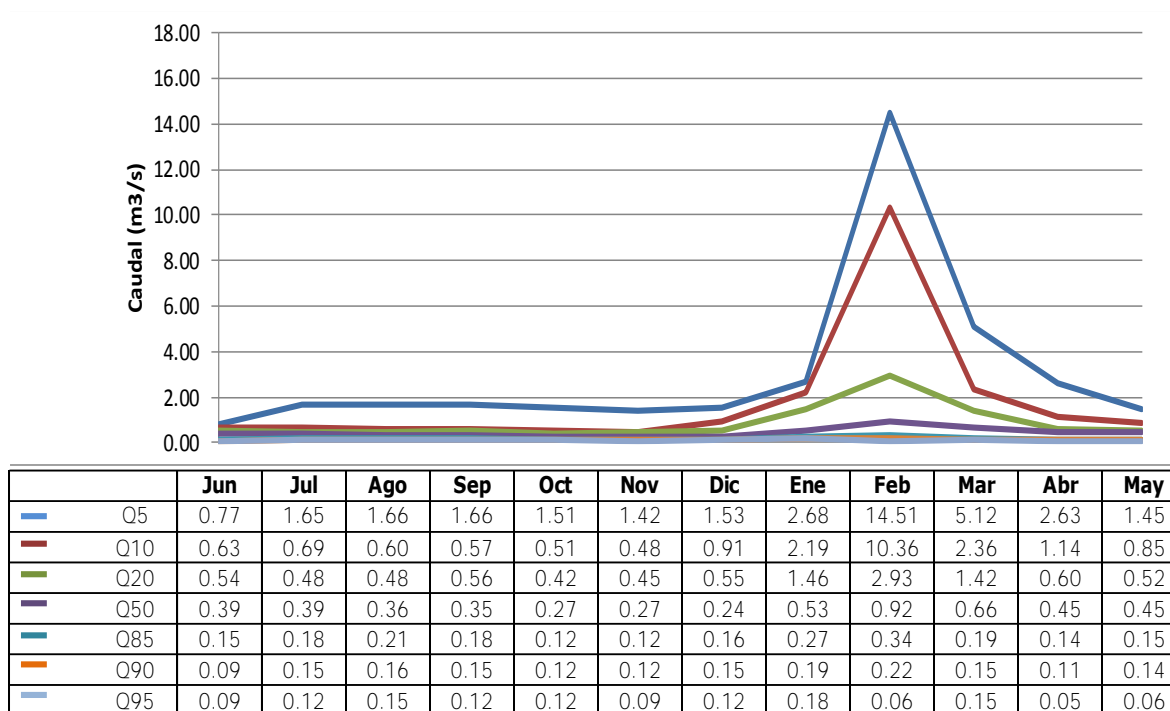
Para una misma quebrada, se agruparon los caudales mensuales asociados a diferentes probabilidades de excedencia y se graficaron, obteniendo las curvas de variación estacional. A continuación, se presentan las curvas de variación estacional obtenidas para las quebradas aportantes al sistema hídrico Pampa del Tamarugal.

Figura 6-32 Curva de Variación Estacional Quebrada de Aroma.



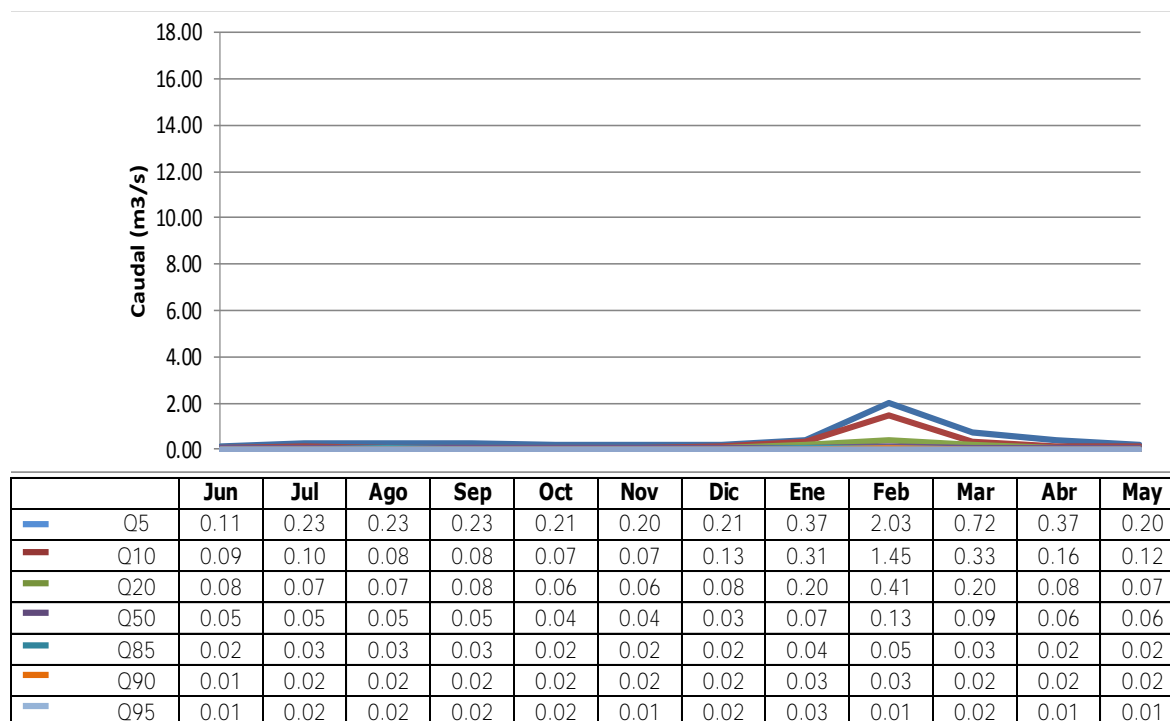
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-33 Curva de Variación Estacional Quebrada de Tarapacá.



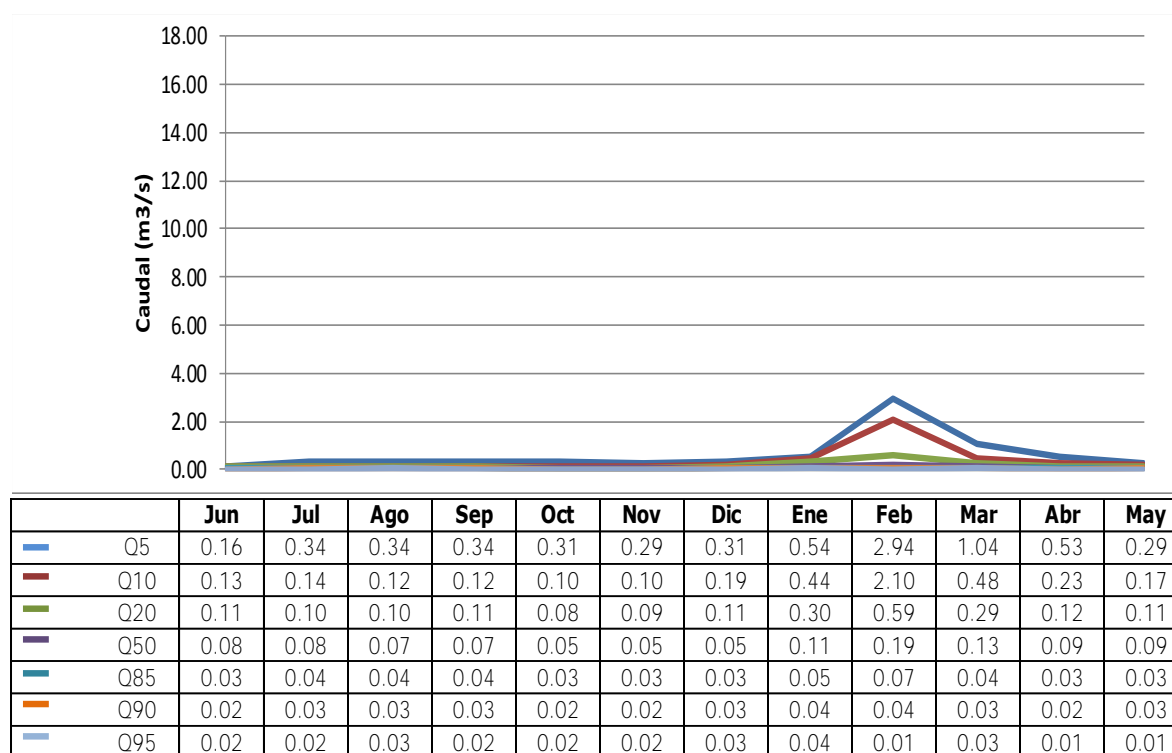
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-34 Curva de Variación Estacional Quebrada de Quipisca.



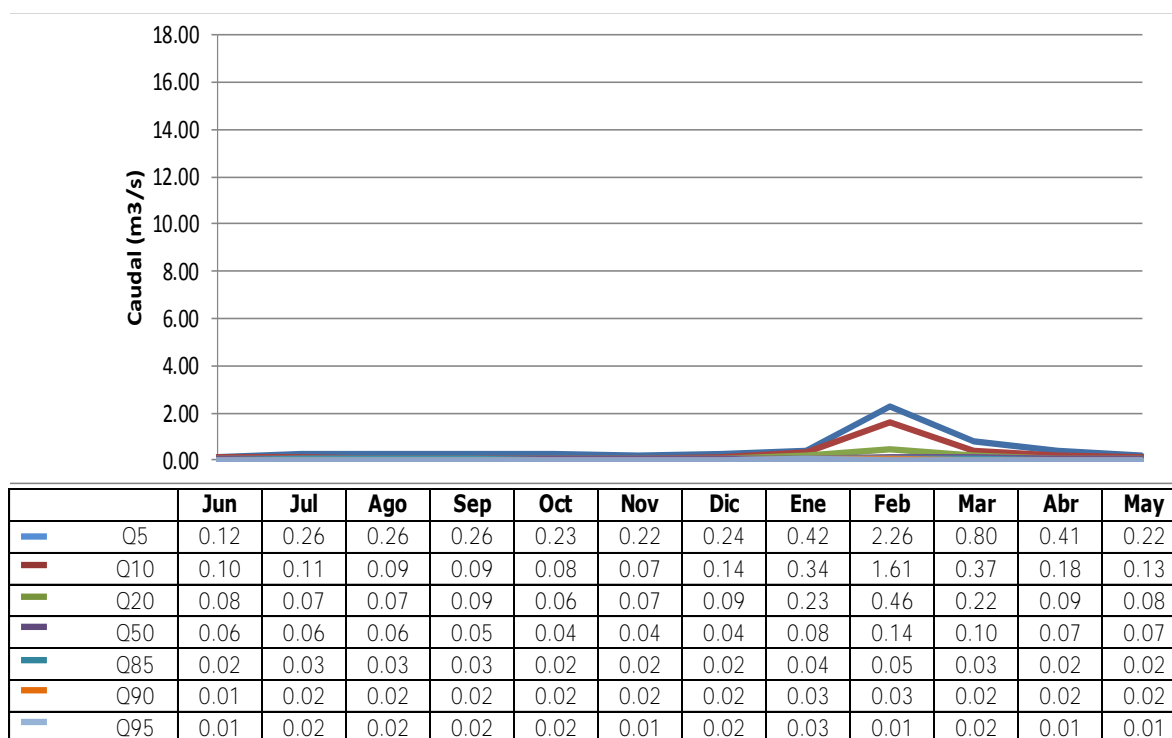
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-35 Curva de Variación Estacional Quebrada de Sagasca.



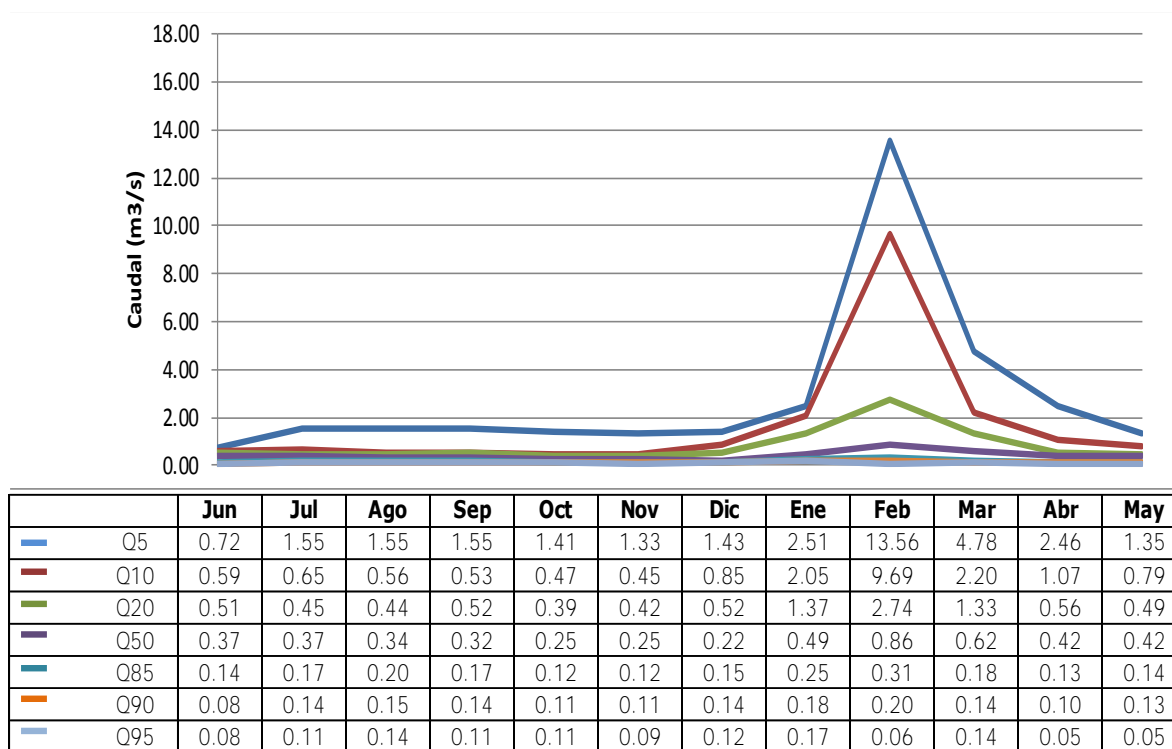
Fuente: Elaboración propia

Figura 6-36 Curva de Variación Estacional Quebrada de Quisma.



Fuente: Elaboración propia

Figura 6-37 Curva de Variación Estacional Quebrada de Chacarillas.



Fuente: Elaboración propia

Se observa que el caudal máximo se produce en verano. Meteorológicamente, esta región se caracteriza por presentar intensas precipitaciones en altura durante el verano por lo que son estos eventos los causantes de los grandes caudales representados en las curvas estacionales de baja probabilidad de excedencia. Cabe destacar que, en términos absolutos, las principales diferencias entre las quebradas se presentan para estas curvas de baja probabilidad.

Durante el resto del año, las quebradas presentan un caudal base asociado a las escasas precipitaciones que ocurren en el sector y a interacciones subsuperficiales.

6.6 Instalación de Estación Meteorológica

6.6.1 Ubicación

Tal como se señaló precedentemente, los únicos cauces que aportan permanentemente recursos hídricos al acuífero de la Pampa del Tamarugal son las quebradas de Aroma, Tarapacá y Chacarillas.

Como se observa en la Figura 3-2, las dos primeras cuencas cuentan con numerosas estaciones meteorológicas, que pueden aportar información valiosa para establecer relaciones entre las precipitaciones que se registran en las cuencas y la información registrada por las estaciones fluviométricas ubicadas en los cauces de las mismas.

Se aprecia que en la cuenca de la quebrada de Aroma hay 7 estaciones meteorológicas, mientras que en la de Tarapacá hay 10. Mientras que en la cuenca de la quebrada de Chacarillas no existe ninguna estación meteorológica.

En el Anexo E se adjuntan las características de la estación meteorológica que se instaló en la quebrada de Chacarillas.

Se acordó con el mandante que la estación meteorológica correspondiente a este estudio se instalara en la naciente de la cuenca de la quebrada de Chacarillas (Quebrada Caya) y a una cota superior a los 3.850 m.s.n.m.

Un aspecto relevante en este tema es la accesibilidad, tanto para la instalación como para la mantención de la estación y la recuperación de datos. La única ruta existente corresponde al camino de acceso a la faena minera de la compañía Quebrada Blanca.

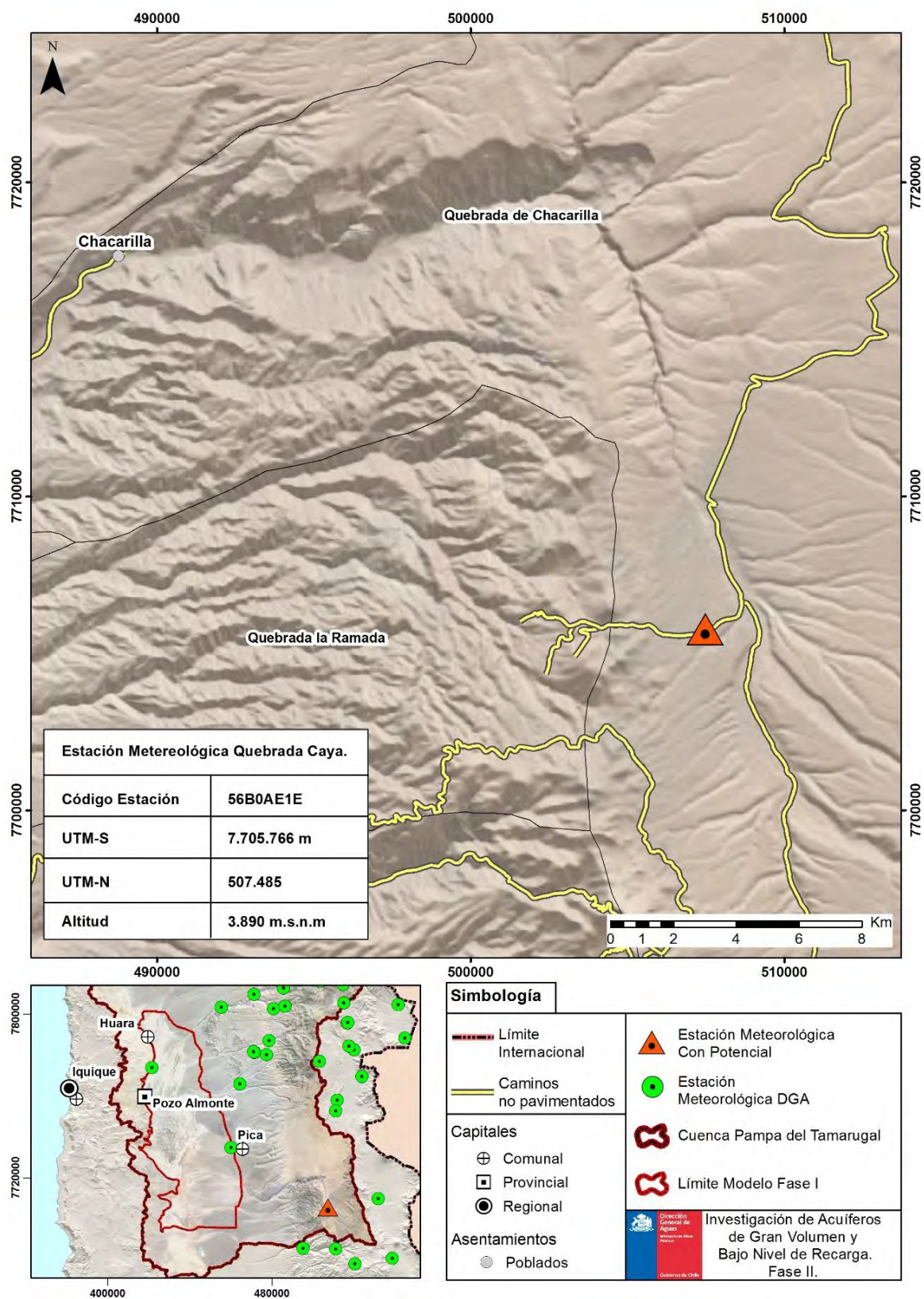
En la Figura 6-38 se indica con un triángulo de color rojo la ubicación en la que se instaló la estación meteorológica, correspondiente a las coordenadas

Tabla 6.18 Ubicación Estación Quebrada Caya.

Estación Meteorológica Quebrada Caya	
Código Estación	56B0AE1E
UTM-S	7.705.766 m
UTM-E	507.485 m
Altitud	3.890 m.s.n.m.

Fuente: Elaboración propia

Figura 6-38 Ubicación de Estación Meteorológica Quebrada Caya.

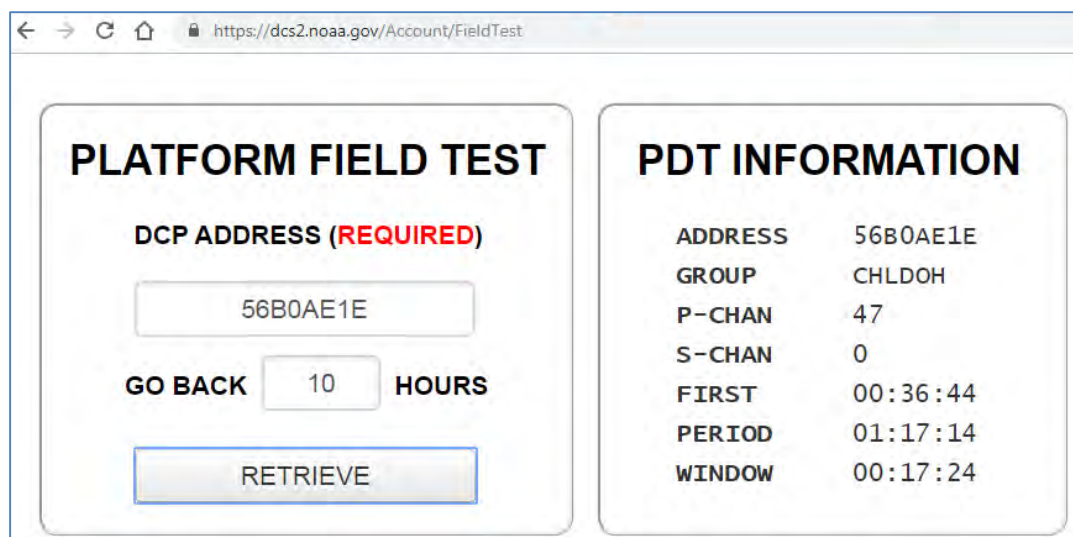


Fuente: Elaboración propia

6.6.2 Características:

- Transmisión en Tiempo Real
- Transmisión satelital cada 1 hora de paquete de datos meteorológicos con registrados cada 30 minutos
- *Variables meteorológicas:*
 - Temperatura
 - Humedad
 - Velocidad y Dirección Viento
 - Radiación Solar
 - Presión Atmosférica
 - Precipitación Líquida
 - Precipitación Instantánea
 - Precipitación Acumulada
- *Link Visualización datos:*
<https://dcs2.noaa.gov/Account/FieldTest>
- *Código Web Estación*

DCP ADDRESS: 56B0AE1E



PLATFORM FIELD TEST	
DCP ADDRESS (REQUIRED)	
<input type="text" value="56B0AE1E"/>	
GO BACK	<input type="text" value="10"/> HOURS
<input type="button" value="RETRIEVE"/>	

PDT INFORMATION	
ADDRESS	56B0AE1E
GROUP	CHLDOH
P-CHAN	47
S-CHAN	0
FIRST	00:36:44
PERIOD	01:17:14
WINDOW	00:17:24

En Anexos se presenta en detalle características equipamiento, manuales de configuración y mantenimiento instrumental, y archivo configuración de la Estación Satelital.

Figura 6-39

Estación Meteorológica Quebrada Caya Instalada.



Fuente: Elaboración propia

7 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

7.1 Caracterización geológica de la zona de estudio

7.1.1 Marco Geomorfológico Regional

La geomorfología de la región se manifiesta en unidades morfoestructurales paralelas a la fosa. Estas se han formado debido al alzamiento regional generado por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Se alcanzan alturas que van hasta los casi 6000 m.s.n.m. (Farías et al., 2005; Nester y Jordan, 2012).

Unidades Morfoestructurales

La configuración macromorfológica se ha definido por convención (de oeste a este), como: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Precordillera y Altiplano (Figura 7-1).

- **Cordillera de la Costa:** posee una extensión superior a los 1.000 km entre los 18°S y los 28°S, su altura en promedio es de 1.500 m.s.n.m. y máxima de 3.114 m.s.n.m. con una disposición aproximada norte sur. Por el extremo oeste se expone un acantilado de entre 1.000 m.s.n.m. hasta 2.000 m.s.n.m. (Mortimer y Saric, 1975). Presenta estructuras del tipo falla normal, caracterizadas como la Zona de Fallas de Atacama (AZF). Por el contrario, el flanco este es menos abrupto y mucho más suave, engranando a la Depresión Central por medio de depósitos coluviales y aluviales. En la región cubre un área de 8.035 km² (IGM, 1984).
- **Depresión Central:** en el norte de Chile se ubica entre los 18° y 23° de latitud sur, con una superficie suave y plana con una altura promedio de 1.500 m.s.n.m. Esta superficie plana es el techo de una cuenca sedimentaria y presenta un registro geológico con depósitos desde el Jurásico en adelante, compuesto de tobas riolíticas y depósitos sedimentarios continentales con potencias superiores a 1.000 m. Es conocida como Pampa del Tamarugal y alcanza un área cercana a 20.254 km² (IGM, 1984).

La cuenca sedimentaria de la Pampa del Tamarugal corresponde al tipo endorreico que alberga más de 700 m de material continental proveniente de la Cordillera, Precordillera y, en mucho menor medida, de la Cordillera de la Costa. Según estudios, esta cuenca presenta alzamiento sintectónico en su zona este y está asociado con las fases tectónicas que alzaron la Cordillera de los Andes

(Pinto, 1999; Farías et al., 2002; Farías et al., 2003; Jordan, 1983; Jordan et al., 2010; Nester y Jordan 2012).

El principal mecanismo de transporte de material corresponde al fluvial, seguido del aluvial y finalmente el eólico. Existe escorrentía en las cuencas hidrográficas y en tres de ellas es permanente durante el año: las quebradas de Aroma, Tarapacá y Chacarillas. Además, durante los años de lluvias extremas se desarrollan flujos aluvionales o inundaciones. Estos son el mecanismo de transporte de sedimentos de mayor energía para la deposición de la cuenca de la Pampa del Tamarugal, y modelan la cobertura de la cuenca en forma de abanicos; los más importantes para este estudio son los abanicos de las quebradas de Aroma y Tarapacá.

- **Precordillera:** compone una prominente morfoestructura positiva que alcanza altitudes entre 3.500 y 4.500 m.s.n.m. Ésta forma el piedemonte de la Cordillera Occidental con un área de 6.041 km² (en la zona de estudio). Se encuentra cubierta por ignimbritas del Mioceno, las que son afectadas por pliegues monoclinales con vergencia hacia el oeste. En la zona de estudio se distinguen rocas del Paleozoico en adelante, cubiertas por unidades del Jurásico que se encuentran plegadas. Las unidades del Jurásico a su vez están cubiertas por las unidades del Cenozoico en discordancia angular. La parte más alta de la Precordillera está marcada por la actividad volcánica que desde el mioceno ha presentado actividad y ha modelado el paisaje. Es en este lugar donde se ubican las quebradas que albergan a las quebradas aportantes a la zona de Estudio. En general presenta actividad de fallas con vergencia oeste y dirección aproximada norte-sur, en 2 puntos importantes: en la zona del volcanismo y donde están las flexuras. En la zona de volcanismo existe además actividad geotermal, donde destaca el sector de Puchuldiza en el sector de cabecera de la Quebrada Aroma (IGM, 1984).
- **Cordillera Occidental:** esta unidad presenta un cordón volcánico del neógeno con elevaciones sobre los 5.500 m.s.n.m. Se considera el borde oeste del Altiplano boliviano que está entre 3.800 – 4.200 m.s.n.m. Es un engrosamiento de la corteza continental y es la estructura de mayor altitud en la zona.
- **Altiplano:** corresponde a una gran planicie con una altura superior a los 3.800 m.s.n.m. y se ubica al este de la Cordillera Occidental. Presenta gran extensión y alberga las cuencas que descargan en dirección este desde la cordillera Occidental y el cordón volcánico (IGM, 1984).

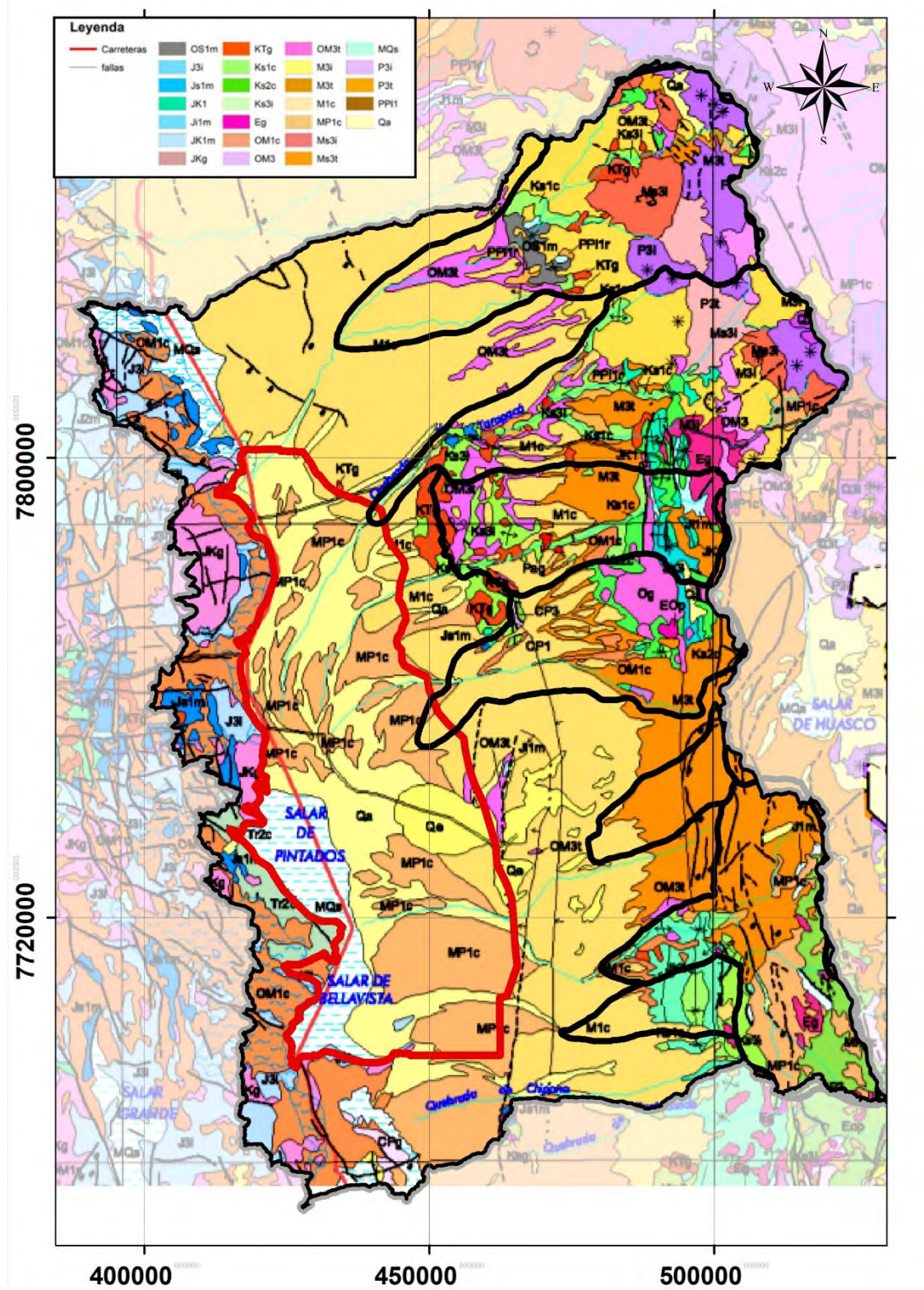
7.1.2 Marco Geológico Local

Las rocas que componen la Cordillera de la Costa son en su mayoría mesozoicas sedimentarias e ígneas intrusivas. En la zona de estudio estas rocas se encuentran en el sector oeste, limitando la Depresión Central, generalmente discordantes y cubiertas por depósitos coluviales, eólicos y/o salares. Estos últimos se encuentran interdigitando el relleno de la Depresión Central.

En dirección este por la Depresión Central, se encuentra el piedemonte de la Precordillera, y a medida que se avanza hacia las quebradas la inclinación se hace mayor. Avanzando hacia occidente, la inclinación se agudiza hasta finalizar en la Cordillera Occidental. Por último, se encuentra el Altiplano, donde se ubica el actual cordón volcánico.

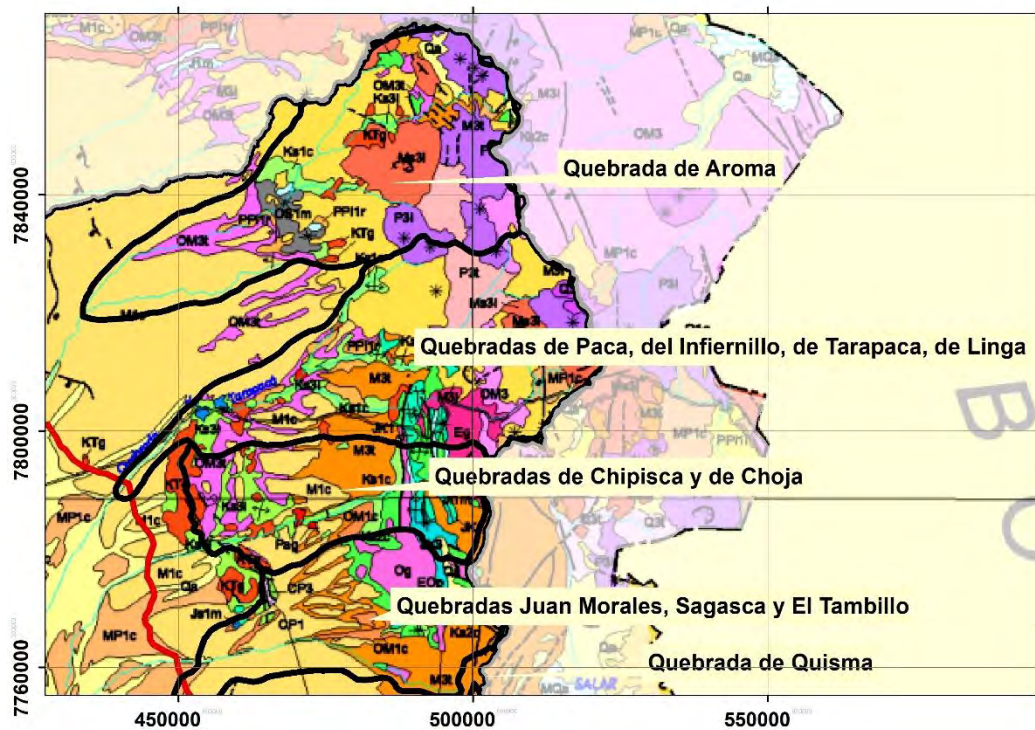
La planicie de la Depresión Central se caracteriza por estar cubierta con depósitos sedimentarios continentales del periodo cenozoico. Su relleno corresponde al material de la respectiva quebrada que es erosionada. A continuación, se presenta la descripción de las principales litologías de la zona de estudio, junto al mapa geológico de la zona (ver Figura 7-2)

Figura 7-2 Mapa Geológico de la Pampa del Tamarugal en la Zona de Estudio.



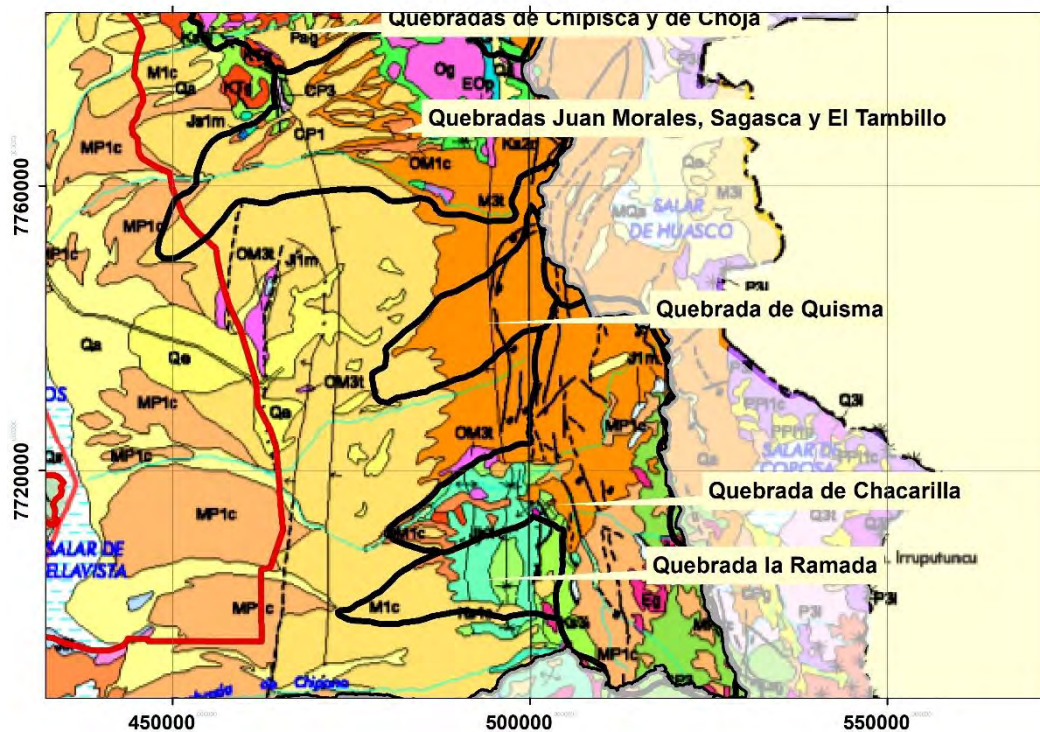
Fuente.: Elaboración propia

Figura 7-3 Mapa Geológico Quebradas Zona Norte



Fuente: Elaboración propia

Figura 7-4 Mapa Geológico Quebradas Zona Sur



Fuente: Elaboración propia

Las formaciones geológicas en la zona de estudio son:

- **Fm. Qda. Aroma (Harambour, 1990) (Devónico – Silúrico) (OS1m)**

La Fm. Qda. Aroma corresponde a 1000 a 1500 m de potencia de una secuencia rítmica de metarenitas y metalutitas. Esta unidad exhibe metamorfismo y deformación dúctil, con desarrollo local de milonitas adyacentes al plano de la flexura aroma. Esta unidad subyace en inconformidad a los depósitos mesozoicos.

- **Fm. Oficina Viz (Thomas, 1970; Silva 1977; Kossler 1998) (J3i)**

Corresponde a secuencias de lavas basálticas porfídicas a lavas andesíticas. En la zona de estudio se encuentra intercalando a las secuencias sedimentarias de la Fm Agua Santa.

- **Fm. Agua Santa (Cecioni y García, 1960) (Js1m)**

Esta Fm. Corresponde a calizas y areniscas. Está dividido en 2 miembros: Miembro Inferior: corresponde a calizas con intercalación de areniscas. Miembro Superior: corresponde a una secuencia granocreciente, con yeso macizo, calizas y limolitas, y subordinados paquetes de areniscas con intercalaciones de calizas. Estos depósitos se encuentran inclinados, con un leve manteo hacia el oeste y rumbo aparente norte – sur. Y solo se encuentran interrumpidos por cuerpos intrusivos y entradas de salares.

- **Fm. Duplijsa (Galli, 1968; Harambour 1990) (JK1)**

La Fm. Duplijsa corresponde a una secuencia sedimentaria que está definida por 100 m de calizas arenosas y areniscas calcáreas dispuestas en bancos de 20 – 30 cm.

- **Fm. Qda. Coscaya (Harambour, 1990) (Sinemuriano – Neocomiano) (Ji1m)**

La Fm. Qda. Coscaya se define como una serie de rocas sedimentarias volcanoclásticas principalmente conglomerados mal seleccionados de rocas volcánicas intermedias - ácidas con una matriz arenosa-tobácea, y areniscas, localmente calcáreas con intercalación de areniscas marinas en la base. Esta sobreyace en discordancia angular a la Fm. Qda Aroma y subyace en inconformidad con unidades del Cenozoico.

- **Fm. Infiernillo (Harambour, 1990) (JK1m)**

Corresponde a una unidad definida como más de 130m de rocas carbonatas y clástico carbonatadas, que corresponden a fangolitas calcáreas de color negro

azulado con alteración pardo claro, dispuestas en bancos centimétricos, que hacia el techo gradan a calizas macizas.

- **Complejo Intrusivo Huara (Cecioni y García, 1960) (140 – 136 Ma) (JKg)**

Granodioritas, dioritas, monzodioritas, granitos, tonalitas y pórfidos dacíticos, dioríticos y andesíticos. Ubicados intruyendo las unidades anteriormente mencionadas.

- **Fm. Chusmiza (Harambour, 1990) (Jurásico superior – Cretácico inferior) (Ks1c)**

La Fm. Chusmiza se define como una serie de estratos de areniscas, conglomerados y tobas de colores pardos y verdosos que afloran en el sector oriental del área de estudio. Sobreyace en discordancia de erosión y en concordancia transicional al miembro superior de la Fm. Qda. Coscaya y en discordancia con la Fm. Noasa. Se presenta cubierto en discordancia angular por las lavas cenozoicas del volcán Tatajachura.

- **Fm. Noasa (Harambour, 1990) (Cretácico superior) (Ks2c)**

La Fm. Noasa se define como una secuencia de areniscas cuarcíferas medias a gruesas. En la base de la secuencia se intercalan areniscas finas y fangolitas silíceas, y hacia el techo, calizas negras. El espesor expuesto es inferior a 350 m. Aflora en una franja longitudinal en la parte oriental de la zona de estudio. Su base no está expuesta. Subyace concordantemente a la Fm. Qda. Coscaya y en discordancia a la Fm. Chusmiza, con la cual también se encuentra en contacto por falla inversa.

- **Intrusivos de la Precordillera (Harambour, 1990) (KTg)**

Rocas intrusivas presentes en la zona de estudio, según las edades K-Ar disponibles y las relaciones de contacto, van desde el Cretácico superior al Eoceno. Se componen de dioritas, tonalitas, granodioritas y granitos de grano grueso que intruyen a la secuencia paleozoica y mesozoica, así como también a rocas intrusivas hipabisales que afloran en las quebradas.

- **Fm. Oxaya (Galli, 1957; Galli y Dingman, 1962) (Oligoceno Superior – Mioceno inferior) (OM1c)**

Secuencia de rocas sedimentarias y volcanoclásticas con una potencia promedio de 600 m. Su contenido corresponde a intercalación de ignimbritas y conglomerados volcanoclásticos continentales, con areniscas y limolitas intercaladas. Esta secuencia

se encuentra cubierta en discordancia angular con las lavas de Sotoca, por el este, y subyace en paraconcordancia, y localmente en discordancia angular, a la Fm. El Diablo.

Secuencias y centros volcánicos intermedios a ácidos (Oligoceno – Mioceno) (Om3).

Se definen como lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesíticos a riolíticos.

Secuencias volcánicas dacíticas a riolíticas (Oligoceno –Mioceno) (Om3t).

Se definen como rocas piroclásticas asociadas a calderas de colapso.

Complejos volcánicos erosionados (Lahsen, 1973) (Mioceno Inferior –Medio) (M3i).

Se definen como edificios volcánicos parcialmente erosionados y secuencias volcánicas: lavas, brechas, domos y rocas piroclásticas andesítico-basálticas a dacíticas. Ignimbrita Huasco: Ignimbritas riolíticas y dacíticas de color gris y rosado. Vitrófiros basales negros.

- **Fm Puchuldiza (Lahsen, 1973) (Mioceno medio) (M3t)**

Esta formación posee dos miembros, uno inferior que corresponde a un primer nivel de areniscas grises correspondientes a cenizas volcánicas seguido de rocas piroclásticas asociadas a calderas de colapso, con un paquete de dacitas grises negras vítreas y andesitas porfíricas de textura gruesa, en parte silicificadas y cloritizadas, de espesor variable entre 20 y 150 m. Y un miembro superior consistente de tobas soldadas de color rosado a pardo violáceo con abundantes fiamme.

- **Fm. El Diablo (Tobar et al., 1968; Vogel y Vila, 1980) (Mioceno inferior alto – Mioceno medio) (M1c)**

La Fm. El Diablo corresponde a una secuencia sedimentaria conformada por areniscas grises y pardas, de grano medio a grueso, laminadas, areniscas de guijarro, areniscas finas a medias con laminación cruzada de tipo eólico, conglomerados gruesos y de bolones, de tonos grises claro y oscuro, e intercalaciones subordinadas de tobas de flujo y caída de tufitas cineríticas blancas. Esta formación se ha dividido en dos Miembros.

Miembro Inferior, se presentan paquetes sedimentarios, de entre 2 a 7 m de arenisca con estratificación cruzada, y conglomerados de mediana a buena compactación, con espesores entre 100 y 150 m.

Miembro Superior, corresponde a una unidad clástica gruesa, constituida por conglomerados mediana a pobremente consolidados y subordinadas intercalaciones de tobas de ceniza. Con espesores entre 50 y 100 m. Esta unidad se deposita discordantemente sobre la Fm. Oxaya.

- **Depósitos aluviales antiguos (Pleistoceno – Holoceno) (MP1c)**

Depósitos aluviales que consisten de bolones, gravas, arenas y limos no consolidados. Se encuentran disecados por depósitos aluviales activos y cubiertos por eólicos activos, del Holoceno. Los techos de estos depósitos consisten de suelo yesífero de textura rugosa y estructuras poligonales.

- **Lavas de Tatajachura (Lahsen y Munizaga, 1979) (Plioceno Inferior) (Ms3i y Ms3t)**

Centros y secuencias volcánicas correspondientes a lavas, domos y rocas piroclásticas andesítico a dacíticas. Corresponde a un complejo volcánico parcialmente erosionado. Está dispuesto descendiendo hacia el oeste sobre la quebrada de Aroma.

- **Salar de Zapiga (MQs)**

Depósitos salinos con presencia de nitratos sulfatos y boratos. Ocurre en forma de costra salina y engrana con los depósitos de piedemonte por el oeste, y por el este con el Miembro Superior de la Fm. El Diablo y/o aluviones antiguos y modernos. Estos depósitos corresponden a restos de los que serían los lagos salinos de la Depresión Central durante el cenozoico.

- **Cerros Sotoca y Taipicollo (Trujillo 1970; Lahsen 1976) (Mioceno Superior) (P3i y P3t)**

Secuencias de Lavas, domos y depósitos piroclásticos andesíticos a dacíticos, conos de piroclastos y lavas basálticas a andesítico basálticas. Depósitos correspondientes a un centro volcánico. Alcanzan un espesor de 900m cerca del cono del volcán. Están dispuestos descendiendo hacia el oeste desde los cerros de Sotoca. Sobreyace de manera discordante a la Fm. Oxaya, y engrana hacia el oeste con el Miembro Superior de la Fm. El Diablo.

- **Fm. Gravas de San Antonio (Farías et al., 2005a) (Plioceno Inferior a Medio) (PPI1)**

Esta formación corresponde a una serie de conglomerados aluviales, con estratificación planar irregular, intercalada con niveles de areniscas. Los conglomerados son polimícticos.

- **Depósitos aluviales nuevos (Holoceno) (Qa)**

Depósitos no consolidados, flujos de lodo guijarrosos, formados por una mezcla cohesiva de limo – arcilla y guijarros de variado tamaño, distribuidos en lo que corresponde a las redes de estrechos cauces aluviales, de actividad efímera, encausados primariamente por los drenajes de primer orden que se asocian a las principales quebradas que drenan el margen occidental de la Precordillera.

Dentro de este estudio las formaciones principales serían: Fm. El Diablo (Tobar et al., 1968; Vogel y Vila, 1980) (Mioceno inferior alto – Mioceno medio) (M1c) y Depósitos aluviales antiguos (Pleistoceno – Holoceno) (MP1c).

7.2 Campaña de Terreno

7.2.1 Introducción

Los trabajos realizados en la campaña de terreno del presente estudio son los siguientes:

- Reconocimiento general de la zona: infraestructura, captaciones de aguas subterráneas y piezómetros de control de niveles, geomorfología, áreas de infiltración, etc.
- Extracción de datos medidos en terreno a través del instrumental de monitoreo.
- Campaña de registro de niveles de pozos de monitoreo DGA.
- Construcción de sondaje.

7.2.2 Recopilación de Datos desde Piezómetros de la DGA

7.2.2.1 Generalidades

Al analizar la respuesta temporal-espacial del acuífero de la Pampa del Tamarugal, se considera importante contar con las siguientes series de tiempo:

Pluviometría: información útil para la caracterización hidrológica de la zona, la infiltración directa por precipitación en las zonas de recarga y la estimación de crecidas en los cauces afluentes a la cuenca.

Nivel Estático: información importante para cuantificar las variaciones del nivel freático del acuífero y su respuesta en el tiempo.

Los datos de niveles estáticos permiten determinar el gradiente de la superficie equipotencial en distintos sectores del acuífero. Este parámetro es indispensable al definir la magnitud del flujo subterráneo y permite evidenciar la dinámica hídrica subterránea.

La red de monitoreo de niveles actual cuenta con 38 puntos de medición. En la Tabla 7.1 se muestran los principales datos de la red vigente existente en la cuenca en estudio:

Tabla 7.1 Red Piezométrica Vigente Región de Tarapacá, Provincia del Tamarugal (WGS84 UTM z19S) / Fuente: DGA

ID	COD BNA	Nombre	UTM WGS84 H19S		Altitud	Comuna
			E (m)	N (m)		
1	01700023-3	Chacarilla	465.954	7.716.212	1276	Pica
2	01700050-0	Concova	468.013	7.735.137	1472	Pica
3	01700051-9	La Calera 3	455.171	7.745.881	1105	Pica
4	01700052-7	La Calera 2	453.299	7.744.812	1055	Pica
5	01700054-3	Esmeralda 11	459.519	7.735.752	1096	Pica
6	01700057-8	Esmeralda 28	460.136	7.735.493	1114	Pica
7	01700059-4	Esmeralda 34	460.596	7.734.578	1117	Pica
8	01700068-3	Puquío Núñez	463.283	7.721.558	1184	Pica
9	01700083-7	Granja María José	463.676	7.732.672	1270	Pica
10	01700084-5	Enrique Aguayo	463.868	7.732.475	1267	Pica
13	01700019-5	Salar Pintados	432.326	7.720.575	966	Pozo Almonte
14	01700024-1	Salar Bellavista	426.236	7.695.371	945	Pozo Almonte
15	01700026-8	Salar Bellavista	441.994	7.699.154	964	Pozo Almonte
16	01700032-2	Salar Pintados (Sara - Tirana)	426.836	7.751.866	1008	Pozo Almonte
17	01700034-9	Salar Pintados 2	435.285	7.720.321	972	Pozo Almonte
18	01700043-8	Salar Bellavista	438.772	7.708.111	966	Pozo Almonte
19	01700044-6	Salar Sur Viejo	440.303	7.685.003	917	Pozo Almonte
20	01700053-5	Esmeralda 6	449.653	7.742.623	994	Pozo Almonte
21	01700063-2	Planta AP Hispania	432.833	7.739.176	978	Pozo Almonte
22	01700069-1	Salar Pintados	432.710	7.726.292	964	Pozo Almonte
23	01700074-8	Salar Bellavista	435.659	7.707.124	963	Pozo Almonte
24	01700076-4	Salar Bellavista	440.396	7.703.579	969	Pozo Almonte
25	01700080-2	Luis Quispe	440.611	7.735.599	970	Pozo Almonte
26	01700098-5	Salar Sur Viejo	437.606	7.686.957	922	Pozo Almonte

ID	COD BNA	Nombre	UTM WGS84 H19S		Altitud	Comuna
			E (m)	N (m)		
27	SC	JICA D	428.238	7.770.096	1051	Pozo Almonte
28	SC	JICA 5	427.467	7.760.047	1023	Pozo Almonte
29	SC	JICA E	428.123	7.751.680	1001	Pozo Almonte
30	SC	JICA Junoy	430.539	7.731.731	975	Pozo Almonte
31	SC	JICA 9	438.495	7.705.014	964	Pozo Almonte
32	SC	JICA F	447.451	7.708.706	1010	Pozo Almonte
33	SC	JICA 8	445.891	7.722.691	1009	Pozo Almonte
34	SC	JICA 6	445.636	7.739.238	986	Pozo Almonte
35	01700045-4	Punta Dolores 4	401.718	7.824.249	1115	Huara
36	01700086-1	Remolino	410.925	7.820.114	1143	Huara
37	01700087-K	Remolino	409.142	7.823.328	1138	Huara
38	SC	JICA 4	421.753	7.803.816	1163	Huara
39	SC	JICA 3	413.907	7.815.718	1143	Huara
40	SC	JICA C	426.482	7.790.035	1108	Huara

Fuente: Elaboración propia

Durante el mes de diciembre de 2017, se ejecutó una campaña de mediciones considerando del orden de 50 puntos de medición, entre piezómetros de la red de monitoreo de la DGA, pozos privados y antiguos pozos abandonados de la CORFO, en función de:

- La ubicación de los puntos de medición y su relevancia en el estudio de los acuíferos de la Pampa del Tamarugal, y
- El estado de los piezómetros existentes.

Los datos de niveles medidos fueron georreferenciados y acompañados con toda la información anexa que se consideró de utilidad: fecha y hora de la medición, materialidad, estado, elevación de terreno, diámetro del pozo o piezómetro, etc. Para la medición de nivel estático en los pozos de la red actual, se utilizó un pozómetro como el que observa en la Figura 7-5.

Figura 7-5 Empleo de pozómetro para la medición del nivel de aguas subterráneas.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 3-2 se presenta con círculos de color amarillo la ubicación de la red de monitoreo de pozos de la DGA en la Pampa del Tamarugal.

7.2.3 Resultados de la Campaña de Medición de Niveles Freáticos

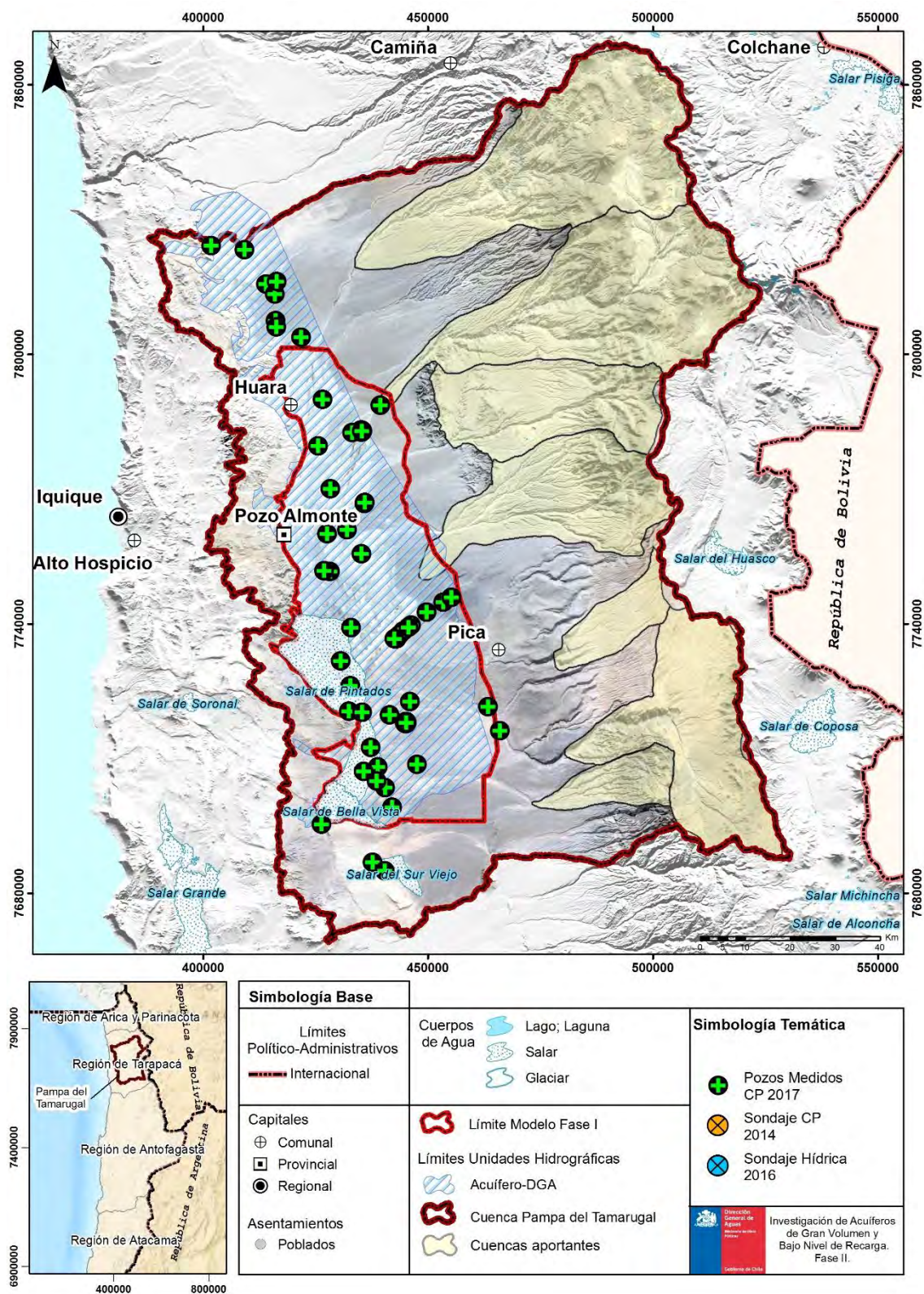
En la Figura 7-7 y en la Figura 7-6 se muestran respectivamente aquellos pozos, tanto de la red de monitoreo de la DGA como de otros propietarios, cuyos niveles fueron medidos por Con Potencial Consultores, tanto en la campaña de terreno realizada a fines de 2017 para el presente estudio, como los de la efectuada en 2014 para la ejecución del informe que estudia los mecanismos de recarga en la Pampa del Tamarugal (DGA, 2014).

Asimismo, en el Anexo B se señalan en detalle los 51 pozos y piezómetros catastrados durante la campaña de terreno realizada en diciembre de 2017.

Se comparan los resultados de la piezometría obtenida a partir de la campaña realizada en terreno con otras dos: La primera corresponde a una elaborada para el año 2016 por Hídrica consultores (resultados entregados por el modelo numérico) en **“Investigación de Acuíferos de Gran Volumen y Bajo Nivel de Recarga en la Zona Norte”** (DGA, 2016), mientras que la segunda se obtiene a partir de los datos **recopilados en el estudio “Investigación y Análisis de los Mecanismos de Recarga de la Pampa del Tamarugal”** (DGA, 2014) de Con Potencial consultores.

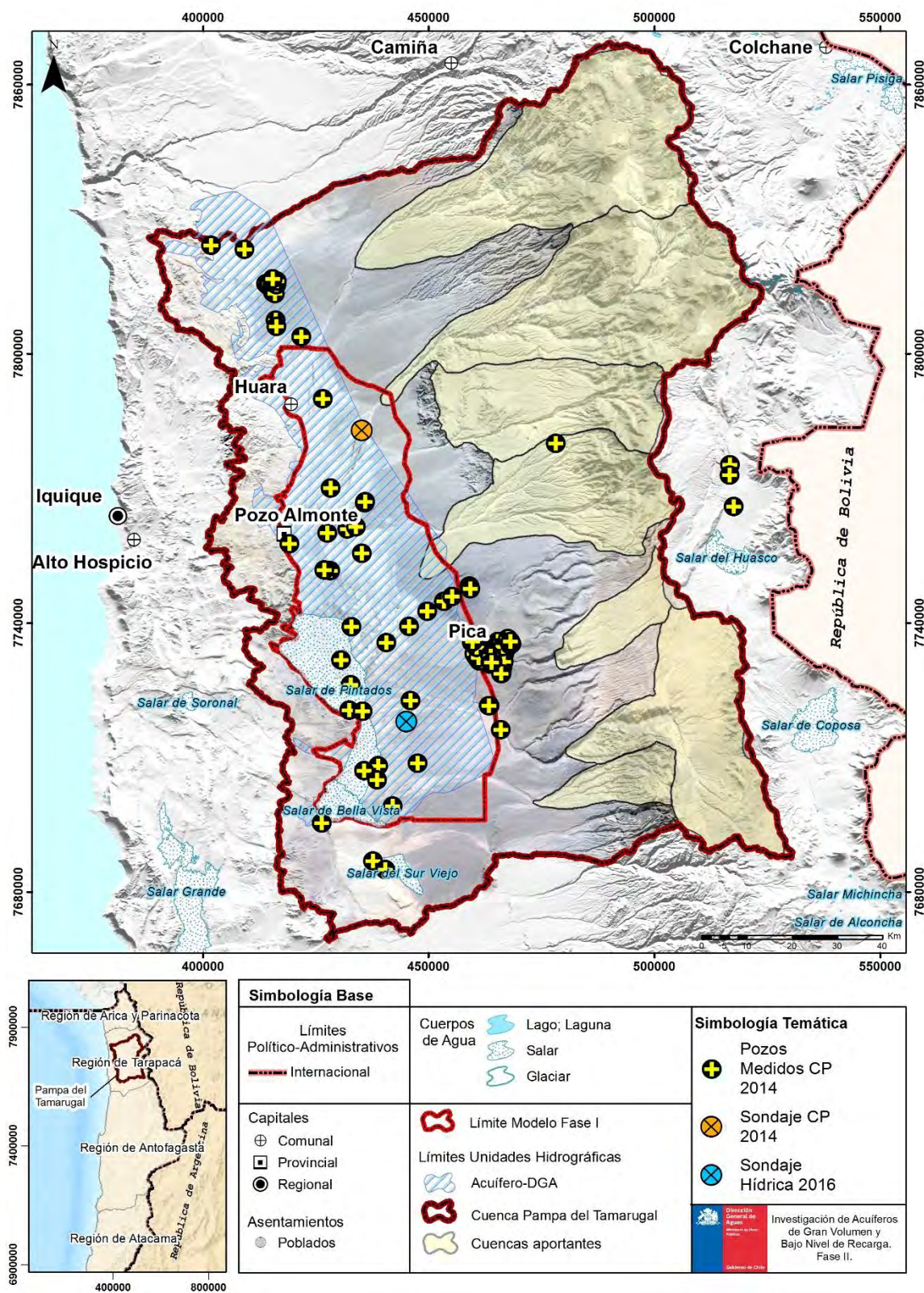
En la Figura 7-8 se observa en el lado derecho la piezometría construida con los datos obtenidos en la campaña de terreno realizada para el presente estudio y en el lado izquierdo de la figura la piezometría correspondiente a los resultados de la modelación de la Fase I (DGA, 2016) correspondientes al año 2016. La diferencia es clara en la forma de las curvas, las líneas piezométricas de la figura de la derecha indican un flujo sur poniente con una marcada dirección este - oeste en las zonas de recarga, correspondientes a la zona oriente del dominio, en donde se encuentran las quebradas. Por su parte las líneas en la figura de la izquierda muestran un flujo regional con dirección preferente norte-sur. Las deformaciones de las líneas de corriente son distintas para el sector de Canchones y la extracción en la zona de Pintados se observan desfasadas en el eje de las longitudes. En resumen, los flujos locales, las zonas de extracción y la forma en como ingresa la recarga, difieren.

Figura 7-6 Campaña de Medición de Niveles Freáticos (2017).



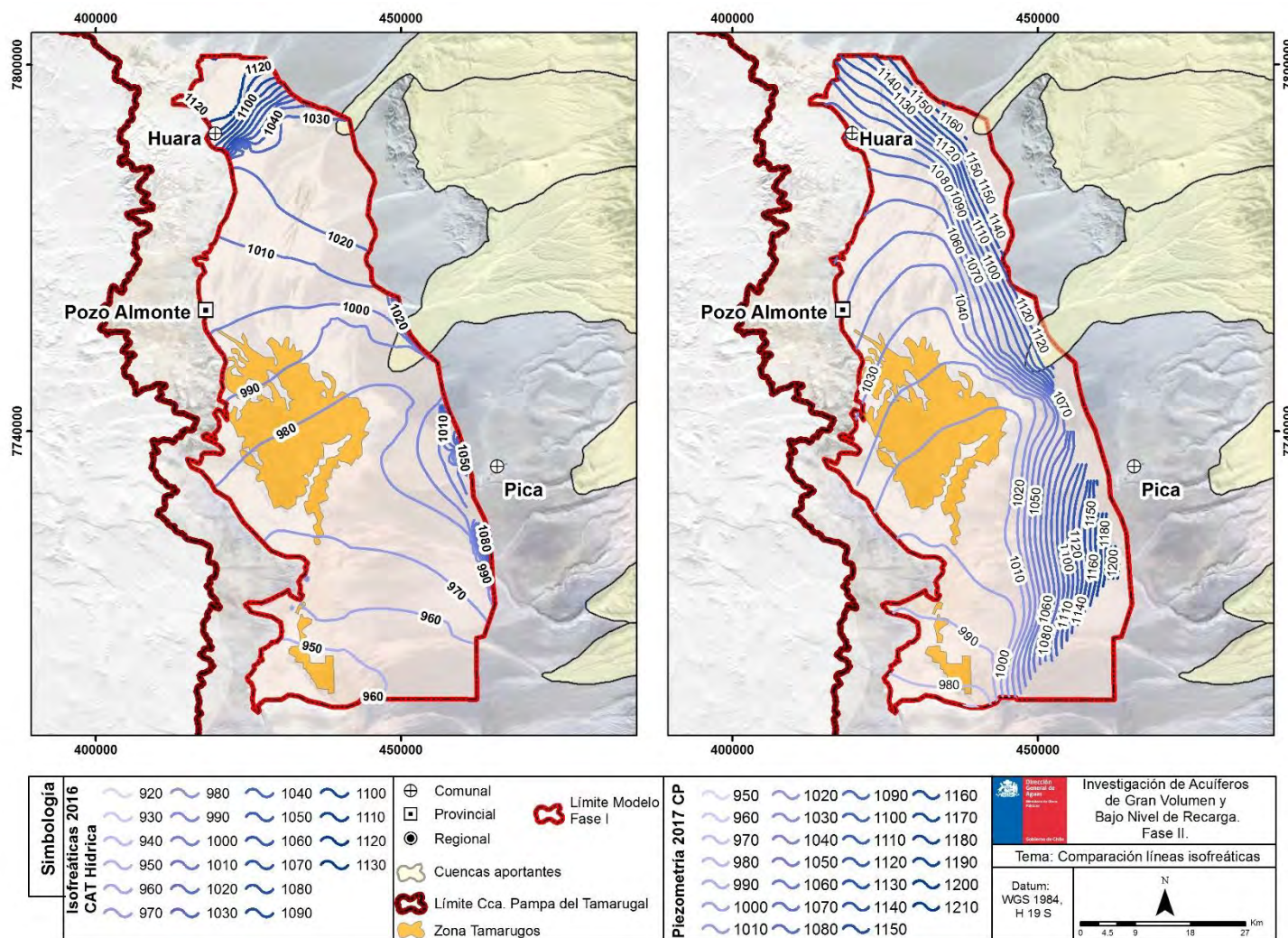
Fuente: Elaboración propia

Figura 7-7 Campaña de Medición de Niveles Freáticos (2014).



Fuente: Elaboración propia

Figura 7-8 Comparación de líneas isofreáticas modelo numérico 2016 (Fase I) vs piezometría en terreno 2017 (Fase II).



Fuente: Elaboración propia

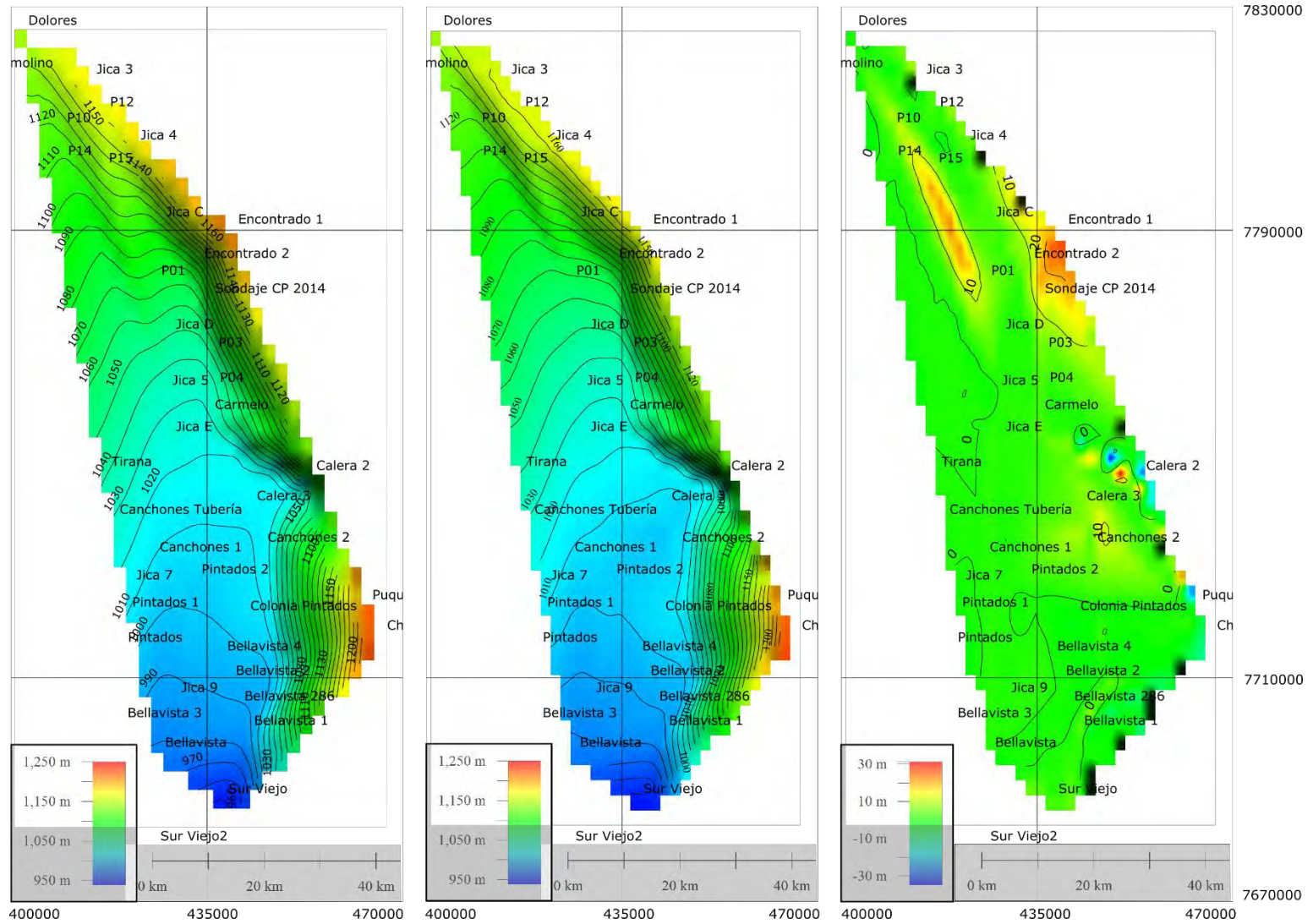
En la Figura 7-9 se presentan 3 mapas, el de la izquierda corresponde a la piezometría obtenida con los datos recopilados hasta el año 2014, las líneas equipotenciales se encuentran espaciadas cada 10 m. En la figura central se observa los niveles freáticos correspondientes al año 2017 obtenidos en la campaña de terreno. Se observa que las líneas poseen una forma bastante similar y que la dirección del flujo regional va en el mismo sentido en ambos casos, la zona de recarga posee similar gradiente hidráulico en las quebradas de la zona oriente de la cuenca. Se observa además una diferencia entre las curvas 2014 y 2017 en dos sectores en particular, en el cuadrante superior izquierdo y la parte superior del central izquierdo (sector comprendido entre Huara y Pozo Almonte), esto se explica por la incorporación de más pozos, los que corrigen la interpolación utilizada para obtener las curvas a partir de puntos.

Similar situación ocurre en la zona de Canchones, en donde se incluyen 5 mediciones que en 2014 no estaban consideradas, esto permite mejorar la interpolación e identificar una zona de descenso de niveles producto de la extracción.

El mapa de la derecha en la Figura 7-9 corresponde a la diferencia entre ambas superficies, esto indica la variación entre la situación de 2014 y la de 2017. El color verde que domina en la imagen indica que las variaciones en el nivel freáticos son cercanas a cero, la mayoría de ellas menores a 1 metro. En el cuadrante central derecho se observan unas variaciones importantes de altura en un área pequeña, **estas “manchas” se atribuyen a diferencias** producidas por el método de interpolación (se utilizó el mismo en ambas, Método de Kriging), dado que no hay pozos cercanos que puedan indicar una diferencia en las mediciones. En el sector en donde las curvas quedan redondeadas en 2017 (Sector de Huara), se observa una zona de color rojo y amarillo en donde sería recomendable tener un punto de medición para mejorar la precisión de la piezometría. Se observa también que en la zona de las quebradas hay unas variaciones importantes de altura, en la zona norte hay un descenso importante en el Pozo Jica 3 (Quebrada Aroma), superior a 3 m. En la zona de la quebrada de Tarapacá hay un descenso de 28 m en el pozo Encontrado 1, se recomienda verificar la causa de esa fluctuación y monitorear los niveles de dicho pozo, ya que tiene una ubicación privilegiada a la bajada de la quebrada. Por otro lado, en la quebrada de Chacarillas se observa un aumento en el nivel del orden de los 5 m en el pozo Chacarillas y un aumento del orden de los 3 metros en el pozo Jica F.

Figura 7-9

Comparación de Piezometría 2014 vs 2017.



Fuente: Elaboración propia

7.3 Construcción de Pozos de observación [150 m de Perforación].

7.3.1 Generalidades

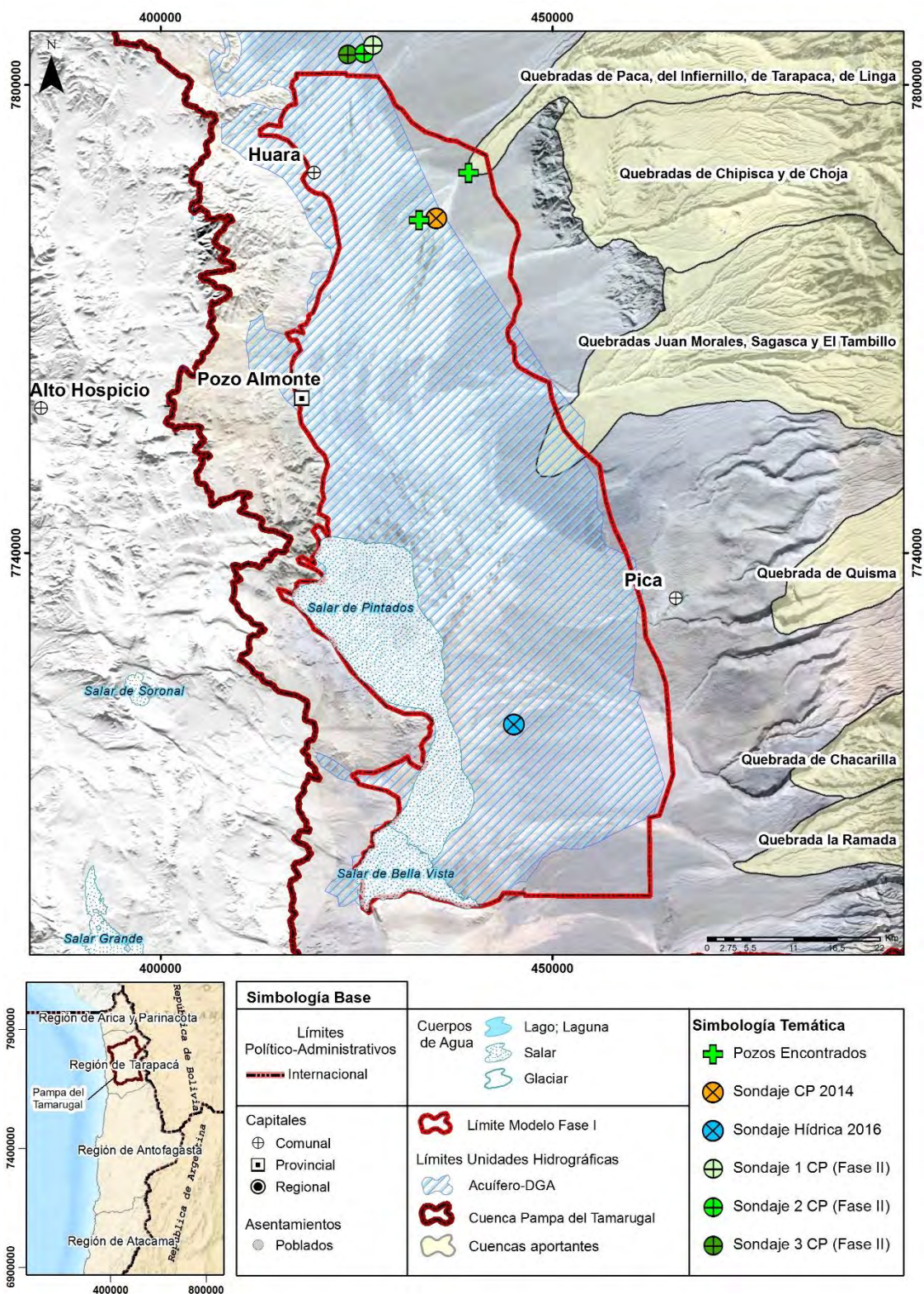
En la Figura 7-10 se representan las cuencas y subcuencas delimitadas por la DGA y los piezómetros construidos para el estudio sobre los mecanismos de recarga en la quebrada de Tarapacá (DGA, 2014), el construido en 2016 para la Fase I del presente estudio (DGA, 2016), y los construidos durante la actual campaña de terreno, en el abanico de la quebrada de Aroma.

Tal como se señaló anteriormente, la única recarga del acuífero de la Pampa del Tamarugal está constituida por los flujos subterráneos de las quebradas aportantes. Los cauces de estas quebradas están bien definidos en los tramos cordilleranos y precordilleranos, mientras que, al llegar a la Pampa del Tamarugal, que posee una pendiente mucho menor y una potencia de sedimentos mucho mayor, los cauces pierden esa definición inicial, difuminándose en una serie de cauces que forman abanicos fluviales.

Las 3 quebradas más importantes, en términos de recarga al sistema acuífero en eventos de crecidas, son Aroma, Tarapacá y Chacarillas. El efecto de estas crecidas debiese evidenciarse en variaciones de niveles piezométricos en los puntos de monitoreo de las aguas subterráneas a la salida de las quebradas. Este efecto se va disipando en la medida que el punto de control se encuentra más alejado del inicio del abanico. Es decir, para que un piezómetro detecte una variación perceptible del nivel de las aguas subterráneas, debe ubicarse en el sector de recarga, a una distancia relativamente corta del borde oriental del acuífero, que corresponde aproximadamente al inicio del correspondiente abanico fluvial.

En el estudio realizado por Con Potencial en la Quebrada de Tarapacá (DGA, 2014) se construyó e instrumentó un piezómetro de 100 m de profundidad en el inicio del abanico fluvial de la quebrada de Tarapacá, permitiendo así detectar los cambios de niveles provocados por crecidas. En la Fase I (DGA, 2016), se construyó un piezómetro en el abanico de la quebrada Chacarillas, el que se considera demasiado alejado del inicio del abanico, por lo que probablemente no perciba los efectos de las crecidas de la quebrada Chacarillas como fuente de recarga del acuífero.

Figura 7-10 Nuevos Pozos de observación en la Pampa del Tamarugal.



Fuente: Elaboración propia

7.3.2 Construcción de Pozos de observación

Tal como se señaló, entre los objetivos del estudio se encuentra la construcción de un pozo de observación de 150 m de profundidad, para ser utilizado posteriormente como piezómetro de la red de control de niveles del acuífero, este sondaje debía perforarse en unidades de sedimentos no consolidados, no en roca.

Durante el desarrollo del presente estudio se plantearon dos alternativas de ubicación para la construcción de un nuevo pozo de observación. Como primera opción, el inicio del abanico fluvial de la quebrada de Aroma (alternativa N°1) y como segunda opción el inicio del abanico fluvial de la quebrada de Chacarillas (alternativa N°2). De acuerdo con el mandante, se optó por desarrollar la alternativa N°1, por tratarse de un área relevante para el estudio, la que no posee ningún piezómetro que permita representar los cambios de niveles provocados por eventos de crecidas en dicha quebrada ni estimar el flujo pasante producto de la recarga.

El proceso de la definición de su ubicación no contó con el apoyo de antecedentes, ya sea de perfiles estratigráficos de pozos, piezómetros existentes o de exploraciones geofísicas, ya que la zona del abanico fluvial de la quebrada de Aroma carece de información de este tipo, a diferencia de otras quebradas aportantes al acuífero de la Pampa del Tamarugal.

Definida la ubicación con la incertidumbre señalada, se perforó el sondaje para la instalación del mencionado piezómetro. Sin embargo, la perforación alcanzó el basamento rocoso a solo 23 m de profundidad. Se continuó perforando, para confirmar que se trataba de la roca fundamental y no un bloque de gran tamaño, alcanzando los 43 m de profundidad, se toma la decisión de detener la perforación y habilitar un nuevo piezómetro.

En vista de los resultados obtenidos en este primer sondaje S-1, se definió la ubicación de un nuevo punto para perforar el sondaje S-2, esperando detectar el nivel freático y que el espesor de rellenos sedimentarios fuese relevante. Sin embargo, se produjo una situación similar a la ya descrita, al alcanzar el basamento rocoso a una profundidad aproximada de 30 m.

En consecuencia, se definió una tercera ubicación para el piezómetro S-3, en esta ocasión se perforó hasta una profundidad de 76 m. se encontró conglomerado meteorizado a los 63 metros de profundidad.

Ni en S-1 ni en S-2 se detectó la presencia de aguas subterráneas. En la Tabla 7.2 se entregan las coordenadas, cota aproximada y profundidad de perforación de los tres puntos mencionados.

Tabla 7.2 Sondajes perforados en la Fase II del estudio.

SONDAJE	UTM-N (m)	UTM-E (m)	COTA (m.s.n.m.)	PROFUNDIDAD (m)
S-1	7.805.057	427.126	1.213	43
S-2	7.804.049	425.997	1.199	42
S-3	7.803.884	423.891	1.188	76

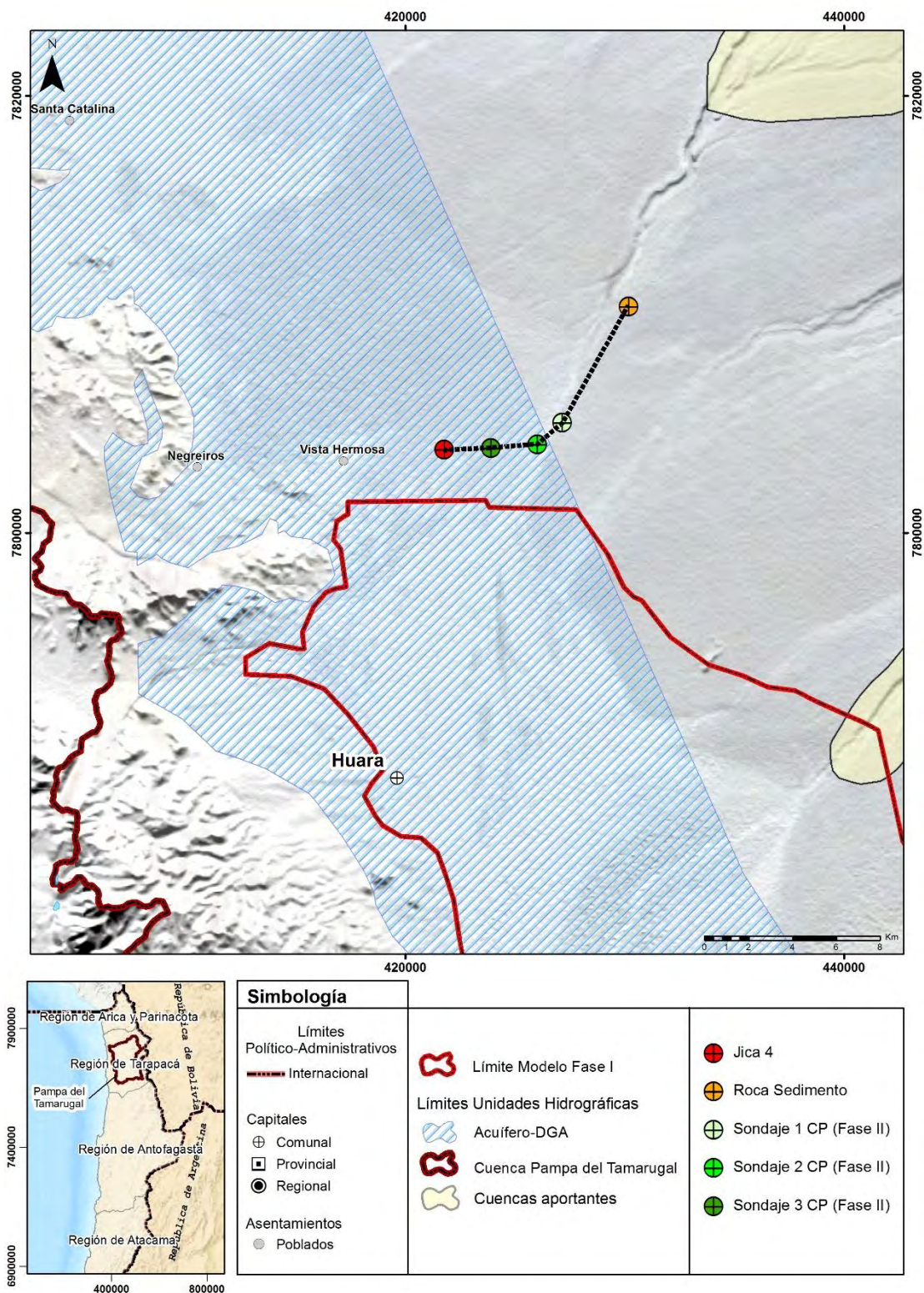
Fuente: Elaboración propia

El Anexo C contiene la descripción estratigráfica preliminar de las muestras extraídas desde los sondajes S-1, S-2 y S-3 con la respectiva descripción de los materiales encontrados durante la perforación. Luego del proceso de perforación se hicieron ensayos de permeabilidad *in situ*; en cada sondeo se realizó un ensayo de Lefranc de carga constante y uno de carga variable. Los resultados detallados de las pruebas realizadas se presentan en el Anexo D.

En la Figura 7-11 se muestra la ubicación de las perforaciones y de los puntos utilizados para la construcción del perfil transversal que se presenta en la Figura 7-12. La vista en planta permite verificar que las dos primeras perforaciones se realizan cerca de los extremos de la caja de la Quebrada y la última de las perforaciones se acerca al pozo de monitoreo Jica 4.

En el esquema de la Figura 7-12 muestra el nivel freático medido en el pozo Jica 4, en las perforaciones S-1 y S-2 no se encontró agua. Se presume que el flujo de recarga que viene desde la quebrada de Aroma es menor a lo pronosticado y que viaja por una zona distinta a la explorada. Existe la posibilidad que el flujo viaje encajonado por una zona de conductividad alta (flujo subterráneo preferencial) o que se desvíe en algún momento hacia el sector norte.

Figura 7-11 Ubicación de perforaciones y perfil longitudinal Quebrada Aroma, Vista en Planta.

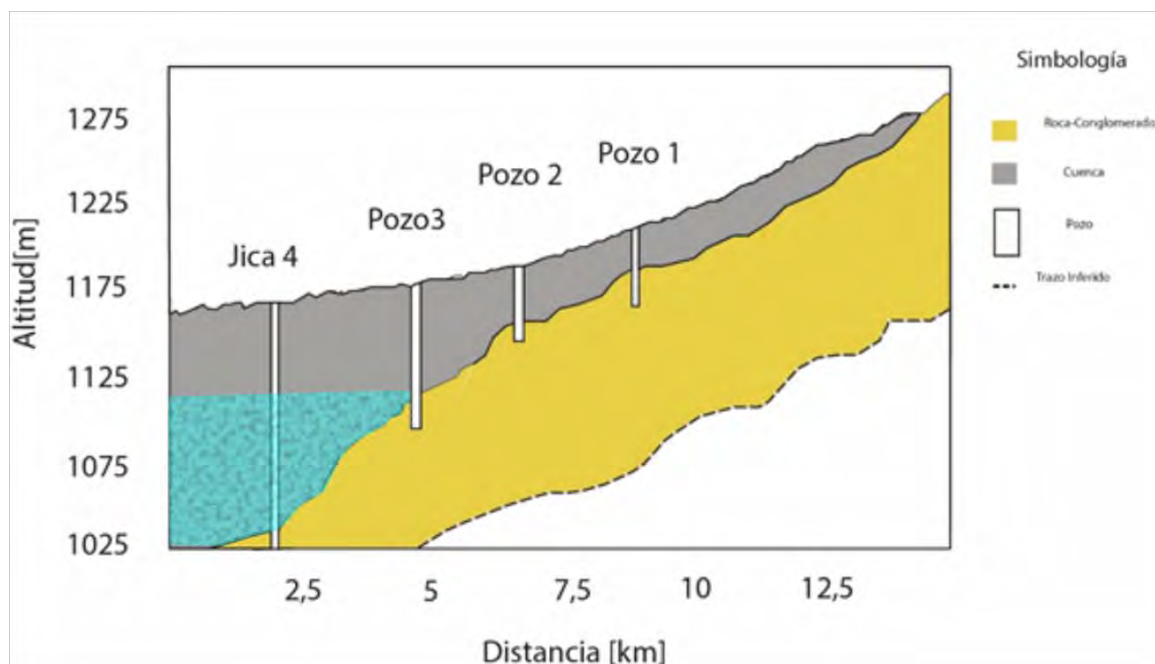


Fuente: Elaboración propia

Al no detectarse agua subterránea en ninguno de los sondeos y no ser verificado el nivel de agua estabilizado del sondeo S-3, no fue posible realizar un ensayo de calidad físico química de las aguas ni un análisis isotópico.

En la Figura 7-12 se muestra un esquema con el perfil transversal de las perforaciones, se infiere el nivel freático basado en la lectura del pozo Jica 7. El Pozo 1, Pozo 2 y pozo 3 corresponden a las perforaciones S-1, S-2 y S-3 respectivamente.

Figura 7-12 Perfil longitudinal perforaciones en Quebrada Aroma.



Fuente: Elaboración propia

8 MODELO HIDROGEOLÓGICO

8.1 Introducción

En este capítulo se expone lo relacionado con la actualización del modelo numérico presentado en la Fase I. Debido a las deficiencias detectadas en la calibración, así como las diferencias conceptuales en la recarga desde las quebradas y las limitaciones propias del software utilizado, lo que se fundamenta durante el presente capítulo, en lugar de una actualización, se desarrolla un nuevo modelo numérico hidrogeológico para la cuenca de la Pampa del Tamarugal. En general se utiliza un modelo conceptual muy similar al entregado en Fase I. En el siguiente apartado se mencionan los principales cambios realizados al modelo.

Se presenta a continuación un análisis crítico del modelo de la Fase I, luego el desarrollo del modelo conceptual y numérico, y, en tercer lugar, la calibración en régimen permanente y la calibración validación en régimen transiente. Finalmente se exponen los escenarios futuros simulados y los análisis con respecto al balance de masa de largo plazo en la cuenca en estudio.

Para facilitar la comprensión se utilizó la misma nomenclatura que en la Fase I, por lo tanto, se tienen los siguientes modelos numéricos:

- **Modelo en Régimen Permanente (CNP, Condición Natural en régimen Permanente),** corresponde a la condición natural de la cuenca, antes de tener pozos con explotación importante y producción de agua potable a gran escala, el acuífero se encuentra balanceado.
- **Modelo en Régimen Transiente (CAT, Condición Actual en régimen Transiente),** corresponde al régimen impermanente, sujeto a la explotación de aguas subterráneas para la producción de agua potable, minera e industrial a la cual ha estado sometido el acuífero desde 1960 en adelante. Entrega el comportamiento de todos los años comprendidos entre 1960 y el estado actual.
- **Modelo en Régimen Transiente (CFT, Condición Futura en régimen Transiente),** corresponde a un modelo predictivo de la situación futura, partiendo del estado actual del acuífero. Este modelo está sujeto a los supuestos que se estimen convenientes de modelar y que se presentan en el respectivo apartado. Esto permite visualizar distintos escenarios para el volumen disponible de agua y los descensos locales para los años venideros.

8.2 Análisis Crítico y Mejoras del Modelo.

Como se mencionó en el apartado anterior, el modelo que se debía mejorar, pues tenía múltiples inconsistencias, por lo que se construyó un nuevo modelo numérico hidrogeológico para la Pampa del Tamarugal. Los principales cambios se enumeran a continuación y se detallan en su respectivo apartado, en donde se implementa el modelo numérico.

- Se elimina del modelo conceptual la recarga por crecidas o eventos extremos. Esto es porque el orden de magnitud de la recarga con respecto a los flujos medios es irrelevante para este modelo de largo plazo y para el volumen del acuífero. No es relevante incluir solo una crecida de periodo de retorno de 50 años. Por lo demás, los métodos de estimación de crecidas del manual de la DGA son válidos desde la III Región hacia el sur, por lo que cualquier cálculo de caudales de crecidas se encuentra sujeto a realizar supuestos no convencionales.
- Se utiliza una recarga media constante durante el periodo de calibración/validación y no la variación anual propuesta por DICTUC 2016. La fluctuación de la recarga en torno a la media no cambia el balance de masa de largo plazo, sólo genera cambios en la variación del almacenamiento a escala anual, relacionado de forma lineal con la variación de la recarga.
- La cantidad de recarga estimada es menor que las mencionadas en la bibliografía revisada y que las utilizadas en Fase I (en donde el orden de magnitud de las recargas propuestas es de los 900 lt/s de caudal total de entrada producto del aporte de las quebradas). A diferencia de estudios anteriores que indican que el caudal medio anual calculado para las cuencas infiltra en su totalidad como recarga, se asume que infiltra un porcentaje de este caudal. Estos flujos son obtenidos a partir de transposición de caudales, dado que corresponden a cuencas sin control fluviométrico y existe escasa información sobre la distribución espacial de la precipitación, debido a la falta de estaciones meteorológicas en la zona.
- La condición de altura constante en el límite sur cambia y además tiene un gradiente lineal creciente en la dirección O-E. Esto se implementa debido a que la piezometría realizada en terreno indica dichos gradientes en la zona y los datos revisados para niveles estáticos de los pozos entrega valores distintos que los propuestos en Fase I.

-
- Se utiliza el modulo no lineal de evapotranspiración ETS corregido, ya que se advierte que la curva en Fase I fue mal ingresada. Esto significa que en Fase I tanto la evaporación, como la evapotranspiración aumentan en función de la profundidad, hasta alcanzar la profundidad de extinción, lo que no es correcto, y al momento de realizar la calibración se puede obtener un balance de masa erróneo.
 - Se utiliza otro factor de uso para las extracciones por bombeo.
 - Las recargas de las quebradas no se encuentran uniformemente distribuidas. Se observa que las quebradas de Tarapacá y Sagasca ingresan encajonadas al modelo, por lo que se propone que conceptualmente ingrese un gran caudal en una zona de baja conductividad hidráulica. Como se explica más adelante, esta baja conductividad representa la pendiente del fondo impermeable (mucho caída de potencial en poca distancia, es decir, un alto gradiente hidráulico) y no la conductividad real. Se insiste en recalcar que al ser un modelo de una capa este corresponde a un modelo de impulso y respuesta, que resuelve las ecuaciones físicas del agua subterránea, por lo que la conductividad hidráulica no necesariamente coincidiría con los valores físicos de pruebas de bombeo o ensayos de permeabilidad.
 - Se aumenta la cantidad de pozos de calibración para el régimen permanente. Se cubre de la manera más homogénea posible el dominio y al aumentar la cantidad de pozos y mejorar la distribución espacial implica una mejor calibración para el mismo RMS.
 - Se utiliza otra distribución de las zonas de conductividad hidráulica, ya que las características del modelo hacen que no necesariamente el valor de la conductividad hidráulica ingresado represente la unidad geológica superficial. Como ya se mencionó la conductividad hidráulica K corresponderá a un valor K' , el cual incluye la corrección del basamento impermeable versus el basamento rocoso (gradiente hidráulico) y, al ser de una capa, corresponde a un K promediado en la vertical, es decir, promedia estratos permeables superficiales, de baja permeabilidad intermedios y algunas zonas prácticamente impermeables de mucha profundidad.
 - Se construye una nueva capa superficial en base a un SRTM de resolución 25 metros corregido.
 - Se construye una nueva grilla de 250.000 celdas de 220 x 108 m. aumentando unas 5 veces la resolución, ya que el modelo anterior tenía

51.359 celdas de 500 x 500 m en general y de 250 x 250 m en la zona refinada.

8.3 Modelo conceptual

8.3.1 Método de Modelación

Para realizar la modelación numérica se resolverá la ecuación general de flujo de agua subterránea.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$$

Ecuación 8.3-1

En donde:

K_{ii} corresponde a la conductividad hidráulica en la dirección i . x , y , z , son los ejes coordenados cartesianos, h corresponde a la carga hidráulica, W corresponde a las inyecciones o extracciones de flujo externas, S_s al almacenamiento específico y t al tiempo.

Esta ecuación corresponde a una ecuación en derivadas parciales (EDP), la que entrega la altura de la carga hidráulica distribuida en el espacio en función del tiempo. Se resuelve a través del método de diferencias finitas, el cual viene implementado en gran cantidad de software. Se utilizó el software Visual Modflow en su versión 4.6.0.169.

Para el caso del régimen permanente la ecuación se reduce a:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = 0$$

Ecuación 8.3-2

Y si el medio es homogéneo e isótropo:

$$K \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + W = 0$$

Ecuación 8.3-3

Dentro de los supuestos importantes, se considerará a las unidades acuíferas isótropas y homogéneas, es decir, la conductividad hidráulica será la misma en todas las direcciones y

la conductividad es constante en el espacio en cada unidad geológica. Por otro lado, el modelo resolverá el flujo saturado con densidad constante.

Modflow cuenta con una amplia serie de Solver, los cuales poseen distintos parámetros y se acoplan a distintos paquetes, los que permiten ingresar condiciones de bordes e iniciales con distintas características. Por sus cualidades y precisión se utilizará el Solver MODFLOW NWT durante el proceso de construcción y el Solver MODFLOW 2000 para poder utilizar modelos no lineales de evapotranspiración y evaporación.

8.3.2 Dominio del modelo

El dominio del modelo se definió en consistencia con el modelo presentado en DGA 2016 y considera incluir el sistema hidrogeológico de la Pampa del Tamarugal. Como primera aproximación, se consideró los límites utilizados en los modelos numéricos de PRAMAR (2008), SERNAGEOMIN (2016) y DGA (2017) basados en antecedentes y trabajos de terreno realizados.

Se consideraron los rangos de conductividad hidráulica propuestos en el modelo conceptual de SERNAGEOMIN (2016), mas no su zonificación. Se vuelve a reiterar que el K modelado, corresponde a un K promediado en la vertical, producto de ser un modelo de una capa y que corrige el gradiente hidráulico producto del basamento impermeable, que difiere del basamento rocoso, debido a lo anterior, es posible encontrar grandes caídas de potencial en poca distancia en lugares con alta permeabilidad, en donde el modelo de una capa representará esa zona como una de baja permeabilidad. En general este fenómeno ocurre cerca de las quebradas, donde la condición de borde corresponde a una conceptualización del proceso y no en el resto de la Pampa del Tamarugal, en donde el principio de horizontalidad de depositación geológica no se ve afectado por fallas o por pliegues producto de subducción de placas.

En cuanto a la definición del basamento rocoso, se utilizó una compilación de registros geoelectricos. TEM y gravimétricos realizados en la zona de estudio.

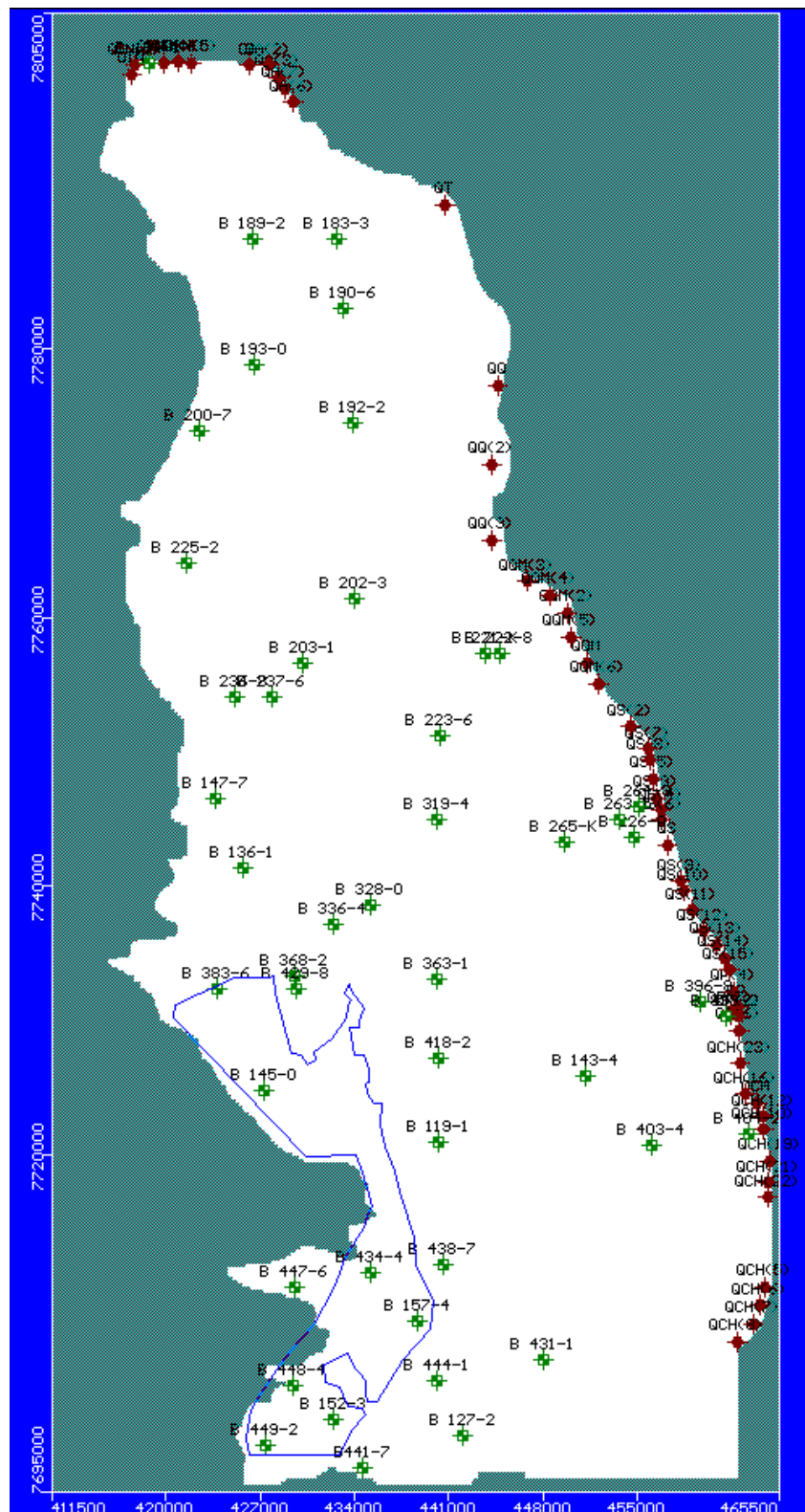
Con respecto a la superficie del dominio, se utilizó un modelo de elevación digital (DEM), con una resolución de 25 metros.

En términos generales, la delimitación del dominio quedó dada por:

- Oeste, limitado por la cordillera de la Costa.

-
- Este, ajustado discretamente a partir de las delimitaciones establecidas en los estudios de SERNAGEOMIN (2016) y principalmente PRAMAR (2008), de acuerdo a la implementación de las condiciones de borde. Si bien SERNAGEOMIN (2016) presenta una definición de unidades hidrogeológicas hacia el este del límite establecido, el flujo subsuperficial proveniente desde las quebradas se obtiene considerando esta área aportante.
 - Norte, limitado a lo presentado en SERNAGEOMIN (2016), la interpretación de la dirección principal de flujo (línea de corriente), y la interpretación del basamento de los trabajos de terreno.
 - Sur, conexión con acuífero de salar Sur Viejo, de acuerdo a lo establecido por PRAMAR (2008), SERNAGEOMIN (2016), y complementado con la información de isofreáticas al año 2016.
 - En la Figura 8-1 se observa el dominio del modelo en celdas de color blanco, mientras que las celdas de color verde corresponden a las zonas inactivas. Los cuadrados de color verde con blanco corresponden a los pozos de observación con los cuales se calibra el modelo CNP. Los cuadrados de color marrón corresponden a los pozos de inyección que simulan recarga desde las quebradas.

Dominio del modelo, vista en planta en interfaz del Software.



Fuente: Elaboración propia

8.3.3 Flujos subterráneos de entrada y recarga desde las quebradas.

Como ya se ha mencionado, la zona de estudio corresponde a un clima desértico y el análisis hidrológico confirma que las precipitaciones ocurren sobre los 2.200 m.s.n.m., por lo tanto, no existe recarga por precipitación dentro del dominio del modelo.

Debido a la ubicación del límite del modelo en la frontera oriente, con la información que existe en la actualidad, es imposible discriminar entre el aporte de las quebradas y de sectores acuíferos colindantes. Un ejemplo claro, es el flujo de entrada en la zona de la quebrada de Chacarillas, en donde existe un flujo pasante desde el acuífero de Pica-Matilla. Otro ejemplo corresponde al aporte entrante por el límite norte y la recarga proveniente de la quebrada de Aroma. Por lo tanto, los aportes de las quebradas y los sectores acuíferos colindantes se considerarán como recarga subterránea.

Como consecuencia de los análisis hidrológicos y las conclusiones de la Fase I (DGA 2016), se considerará despreciable el aporte de la recarga producto de eventos extremos de precipitación.

Los aportes se dividen en 7 zonas: el aporte desde el límite norte, aporte desde la zona de Pica-Matilla y las quebradas Aroma, Tarapacá, Quipisca, Quisma, Sagasca y Chacarillas. Las recargas asociadas a eventos extremos que podrían generarse en los abanicos aluviales son despreciadas de la modelación, debido a la baja permeabilidad de los primeros centímetros de los depósitos y que los caudales de crecidas obtenidos para estos eventos son del mismo orden de magnitud que el flujo base.

8.3.4 Flujos subterráneos de salida.

Corresponde a la descarga subterránea observada por PRAMAR (2008) en el límite sur oriente del modelo, hacia la zona del salar Sur Viejo, el flujo subterráneo pasante se estima del orden de los 100 l/s. Se impuso una carga constante en el modelo en régimen permanente, medida en pozos de observación que colindan con el límite del modelo. Otros flujos subterráneos se descartan debido a la naturaleza rocosa de los contornos correspondiente al límite del modelo.

8.3.5 Evapotranspiración y evaporación en zonas de salares.

La cuenca de la Pampa del Tamarugal presenta zonas localizadas con bajas cotas de terreno, donde el nivel freático es relativamente somero. En esas zonas se produce

evaporación y existe formación de salares; dentro del dominio de la modelación estas zonas corresponden a los salares de Pintados y Bellavista. Si bien en la Fase I se planteó utilizar un modelo exponencial mediante tramos para la evaporación, propuesto por PRAMAR 2008 (Ecuación 8.3-4) para ser ingresado al modelo se debe utilizar el Solver MODFLOW 2000, el cual es bastante antiguo y posee algunas limitaciones, por este motivo, durante la construcción del modelo, proceso en el que se encuentra inestable y sensible a los cambios en los parámetros, se utiliza el solver MODFLOW NWT.

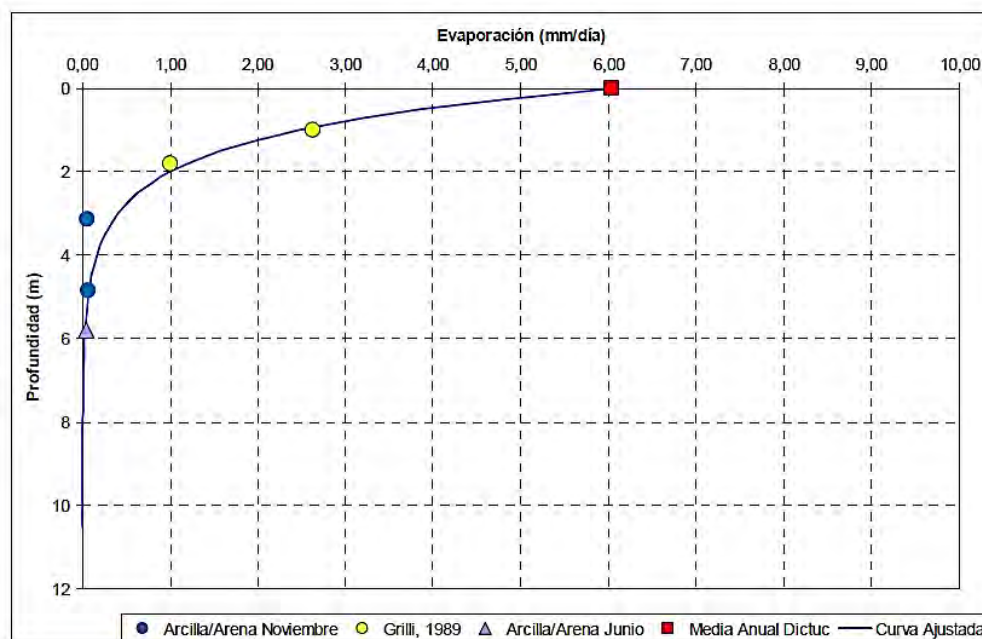
$$EV = 6,04 e^{-0,9z} \quad \text{Ecuación 8.3-4}$$

Donde:

EV: Evaporación en mm/d.

Z: Profundidad del nivel freático en metros.

Figura 8-2 Curva de Evaporación en salares propuesta por PRAMAR.

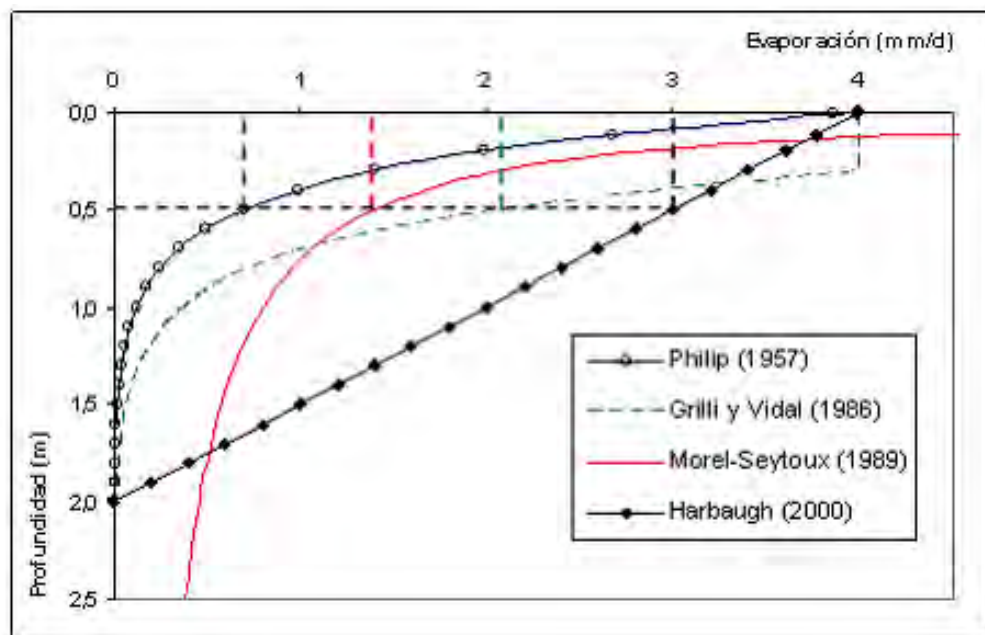


Se realizó una corrección en función de la bibliografía revisada, presentada en el apartado de construcción del modelo numérico, teniendo en cuenta resultados tanto para el salar de Atacama (Johnson & Muñoz, 2009) y (DGA, 1986), como para los salares Bellavista y

Pintados en (DGA, 1986). Ambos resultados se presentan a continuación en la Figura 8-3 y Figura 8-4.

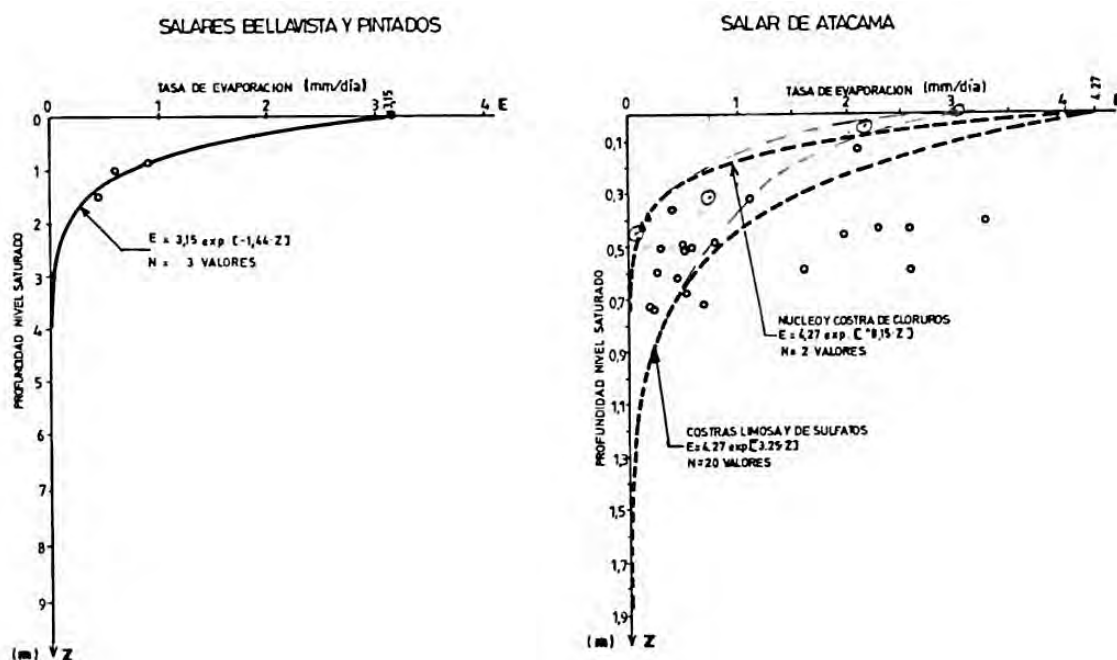
En la Figura 8-2 se observa que el modelo propuesto por (PRAMAR, 2008) y (DGA, 2016) sobre estima el valor de la evaporación superficial, basada en la evaporación media anual propuesta por DICTUC (2006), también se observa una sobre estimación en la profundidad de extinción de la evaporación.

Figura 8-3 Curva de Evaporación en Salares (PUC, 2019), Salar de Atacama.



En la Figura 8-3 se observa que el uso de un modelo lineal sobreestima bastante la cantidad evaporada conforme aumenta la profundidad, por otro lado la precisión de la forma de la curva en los primeros metros y la profundidad de extinción son parámetros sensibles, difíciles de obtener con certeza y que entregan incertidumbre al modelo. Mientras que en la Figura 8-4 se aprecia que la evaporación calculada en la superficie, para la zona de Bellavista y Pintados es bastante menor a la presentada en los modelos anteriores.

Figura 8-4 Curva de Evaporación en salares MOP 1986.



Ecuación propuesta por DGA 1986:

$$EV = 3,15 e^{-1,44 \cdot Z}$$

Ecuación 8.3-5

Donde:

EV : Evaporación en mm/d.

Z : Profundidad del nivel freático en metros.

En DGA (2016) se compila un set de información correspondiente a la evapotranspiración y la superficie plantada de tamarugos, que se ha estimado en modelos presentados por DGA (1988), DGA (1995) y PRAMAR (2008) de manera puntual para los años 1960, 1985, 1995 y 2006. Además, Callejas V. & Estados C. (1996) estiman la distribución y superficie de tamarugos para el año 1960, presentando un crecimiento del área cubierta hacia el año 1973.

En la Figura 8-5 se presenta el índice de la vitalidad en función de la profundidad PRAMAR (2008), esto complementado con la superficie de tamarugos al año 1985, sumado a los antecedentes mencionados en el párrafo anterior, se propuso un modelo no lineal de evapotranspiración DGA (2016), al cual se le aplica una discretización de 10 tramos tal

como se hace con la curva de evaporación propuesta. La expresión obtenida en DGA (2016) es la siguiente:

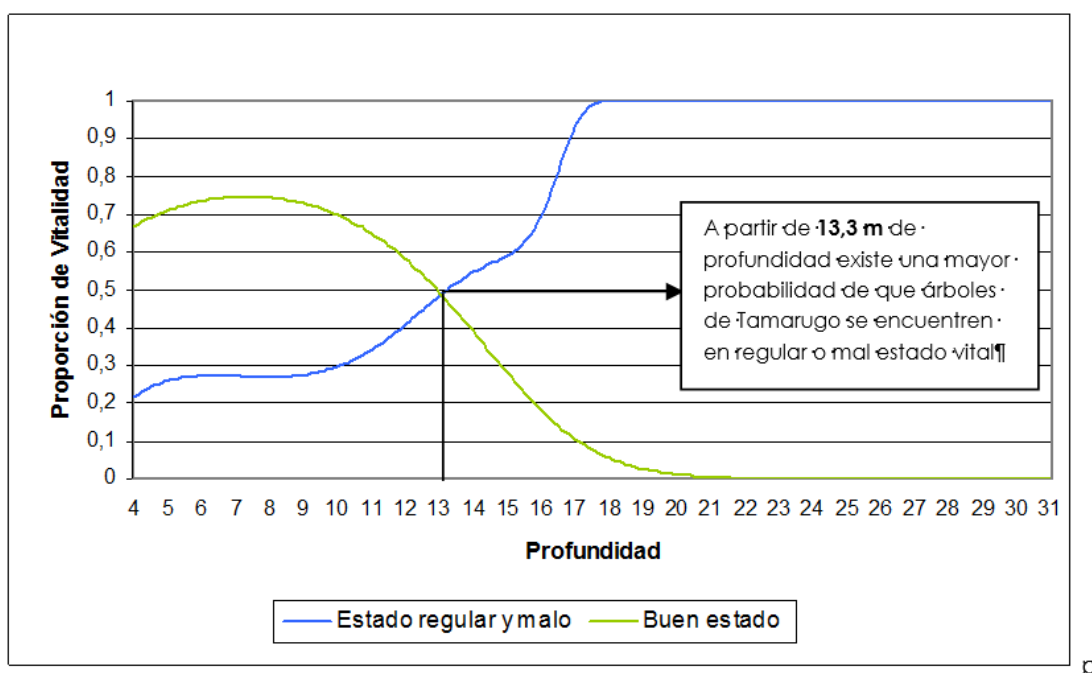
$$EVT = -0,198 \ln(z) + 0,564 \quad \text{Ecuación 8.3-6}$$

Donde:

EVT: Tasa de evapotranspiración en mm/d.

z: Profundidad del nivel freático en metros.

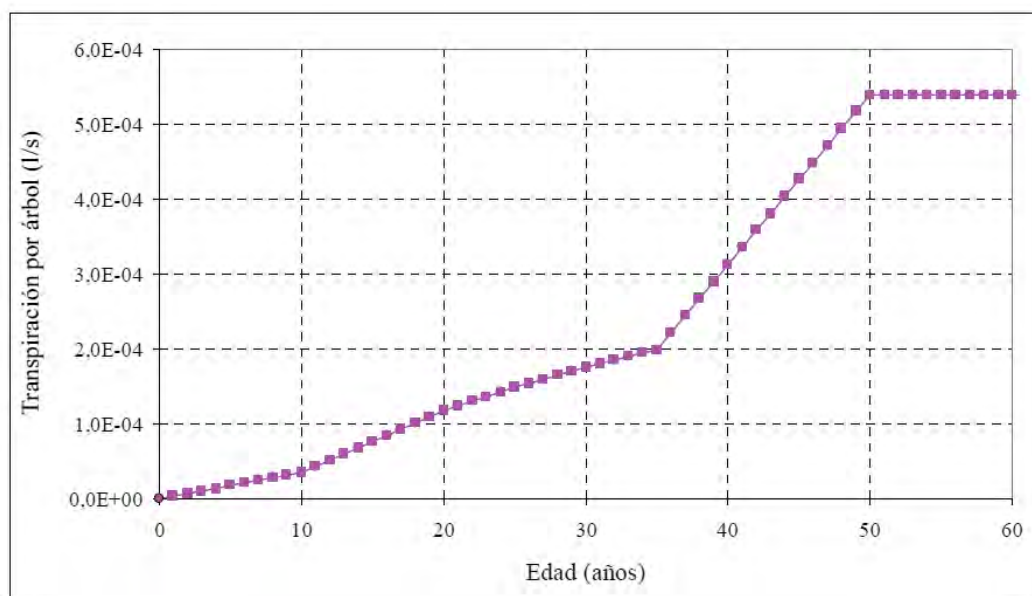
Figura 8-5 Proporción de vitalidad vs profundidad, PRAMAR 2008.



Fuente: Elaboración propia

En el presente modelo se modificó la curva de evapotranspiración propuesta, ya que, si bien existe bastante bibliografía respecto al *Prosopis Tamarugo*, esta no es concluyente y no entrega un valor claro de la ET_o superficial, ni tampoco un comportamiento en función de la profundidad. En estudios anteriores los valores obtenidos para la evapotranspiración de los tamarugos son producto del balance de masa realizado en los modelos, por lo tanto, esos valores no provienen de mediciones con lisímetros, ni de estimaciones de evapotranspiración de campo. Producto de lo anterior, se encuentran sujetos a la precisión en la estimación del caudal de salida, del aporte de las quebradas (hidrología de la zona con pocos datos), aporte de acuíferos colindantes, entre otros factores.

Figura 8-6 Transpiración de Tamarugos en función de la edad, PRAMAR 2008, basado en Acevedo 2007.



Fuente: Elaboración propia

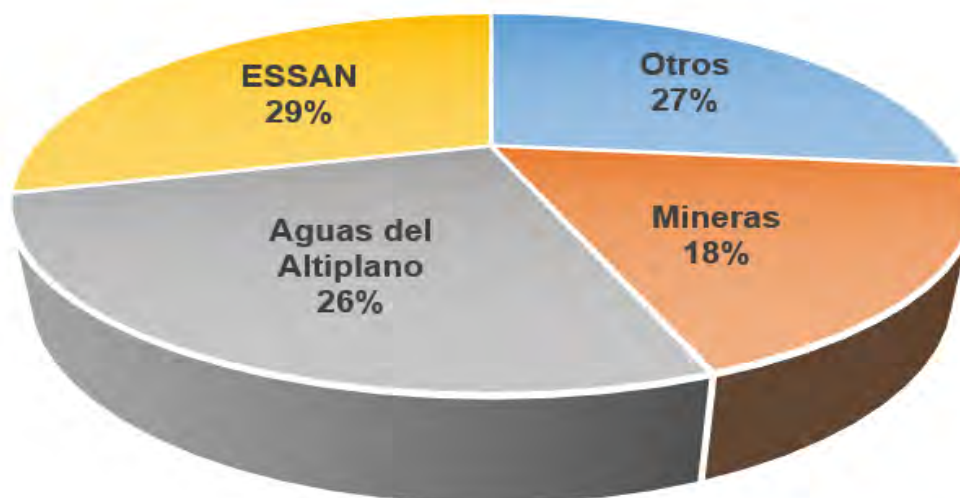
8.3.6 Extracciones a través de pozos de bombeo.

De acuerdo a lo presentado por DGA (1995), el acuífero de la Pampa del Tamarugal ha sido explotado desde 1950 a la fecha, sin embargo, la explotación a mayor escala es posterior al año 1970.

Los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas consuntivos asignados en la actualidad (2018) dentro del dominio del modelo, corresponden a 4.133 l/s, en donde la mayor cantidad corresponde al uso sanitario, es decir, a la producción de agua potable de Aguas del Altiplano y de ESSAN, (55%), seguido de los derechos otorgados a particulares y finalmente la actividad minera, tal como se presenta en la Figura 8-7. Si bien los registros de la DGA comienzan en 1982, tal como se menciona en Fase I (DGA, 2016), existen extracciones registradas con anterioridad.

Figura 8-7

Distribución porcentual de derechos de agua subterráneos consuntivos.



Fuente: Elaboración propia

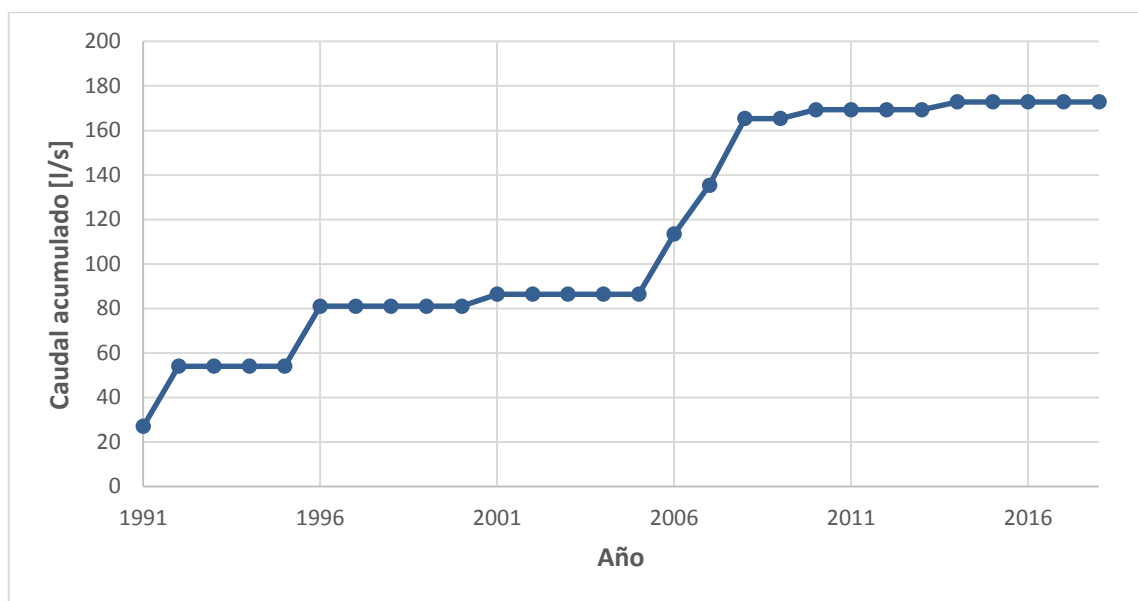
Como información adicional, se cuenta con datos aportados por la SISS (obtenidas mediante los canales de información que proporciona la Ley N°20.285) y el catastro de captaciones entregado por la empresa sanitaria Aguas del Altiplano. Estas distintas fuentes de información presentan cierta discordancia entre ellas. En particular, para el caso de la zona de El Carmelo, el catastro de captaciones indica que existen pozos cuyos derechos no se encuentra en los registros de la DGA. Así mismo, en la zona de Canchones, pozos registrados por la DGA a nombre de ESSAN, se presentan en ubicaciones cercanas por el catastro de captaciones a nombre de Aguas del Altiplano. De cualquier modo, la distribución de derechos de agua consuntivos corresponde a la presentada en la Figura 8-7.

Con respecto al empleo de aguas subterránea para uso minero, el aprovechamiento de aguas subterráneas por compañías mineras se genera al comienzo de la década de 1990. Estos derechos aumentaron considerablemente para el período comprendido entre 2000 y 2007. En particular para el caso de SQM, el total de derechos acumulados a la fecha corresponde a 553 l/s de los 814 l/s pertenecientes al rubro minero. Esto, sin considerar el **proyecto "Pampa Hermosa"**, el cual pretende extraer un caudal adicional desde el acuífero, superior a las 400 l/s desde los sectores de Sur Viejo, Salar de Bellavista y Salar de Llamara.

En cuanto a los derechos no consuntivos, solo se registra un derecho de este tipo y corresponde a la **"Sociedad Minera La Cascada LTDA"**, con un caudal otorgado de 65 l/s; el uso declarado de estas aguas es minero.

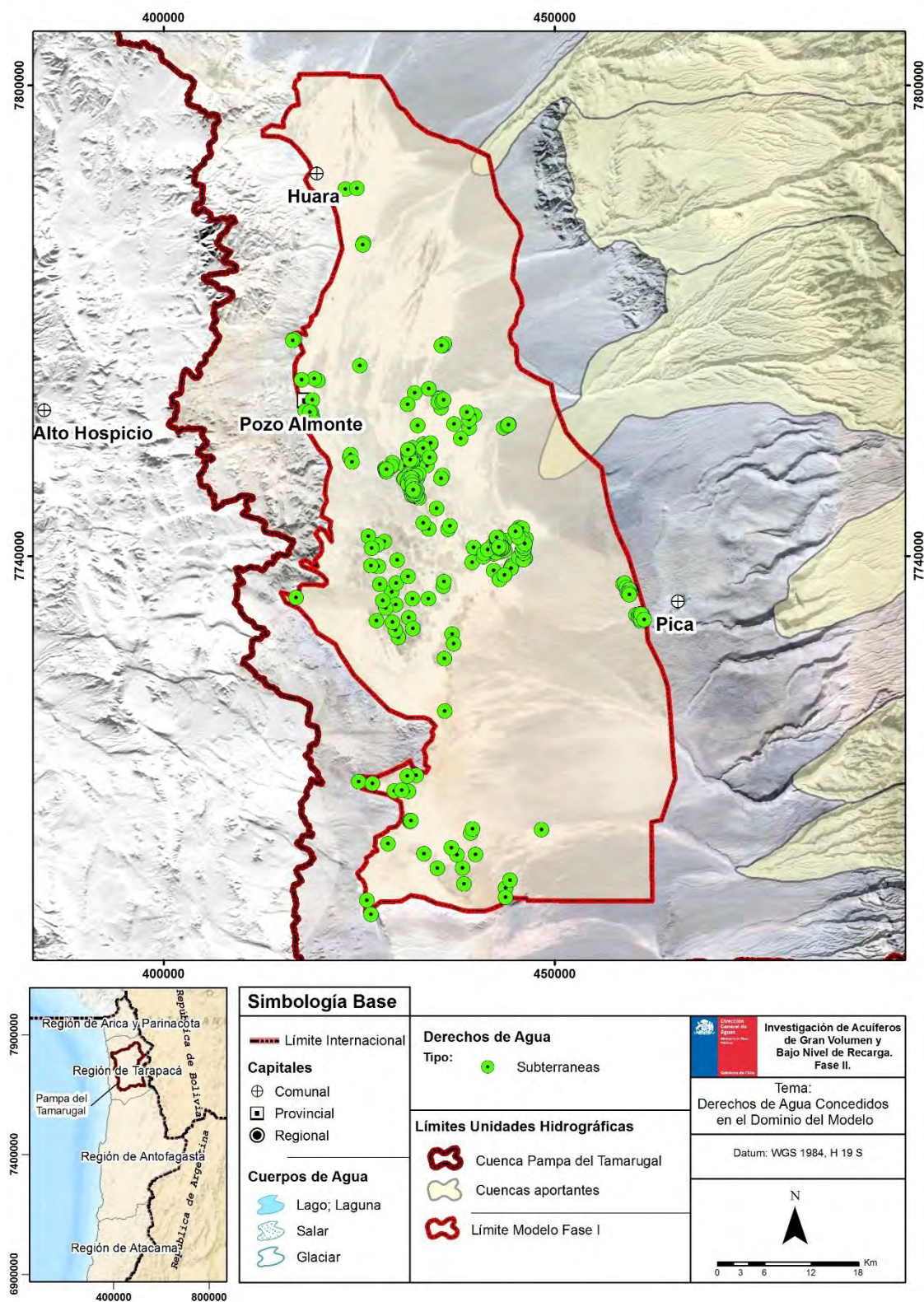
En relación a los derechos estudiados, tal como se puede observar en la Figura 8-8, se incluyeron en el análisis algunos pozos fuera del dominio establecido, para determinar la influencia de estos sobre el comportamiento del acuífero estudiado en el modelo. La mayoría de estos pozos de extracción son de uso minero y poseen un caudal total otorgado de 173 l/s los cuales se encuentran otorgados desde el año 1991 en adelante, tal como se evidencia en la siguiente gráfica:

Figura 8-8 **Gráfico DDAA acumulado fuera del límite norte del modelo en función del tiempo.**



Fuente: Elaboración propia

Figura 8-9 Distribución espacial de derechos de agua subterráneos consuntivos DGA dentro del dominio del modelo.



Fuente: Elaboración propia

8.3.7 Piezometría y niveles observados.

El flujo subterráneo regional en la Pampa del Tamarugal tiene dirección principal norte - sur, se observa también un importante flujo oriente - poniente proveniente de las recargas de las quebradas aportantes y de los sectores acuíferos contiguos.

Se cuenta con un set de 43 mediciones para la calibración del régimen permanente y se asume que el acuífero se encuentra en su régimen natural. Para el régimen transiente se utilizaron los 38 pozos de monitoreo de la red hidrometeorológica de la DGA con mayor cantidad de registros que se encuentran dentro del dominio del modelo.

También se cuenta con los registros de niveles de aguas subterráneas realizados en terreno (DGA, 2014) y los registrados en la campaña de terreno desarrollada para el presente estudio.

8.4 Modelo Numérico

A continuación, se presenta la construcción, calibración, validación y proyección de escenarios futuros con del modelo numérico hidrogeológico de la Pampa del Tamarugal, el cual fue construido en función del modelo conceptual ya descrito. Este modelo posee las propiedades de las unidades geológicas y pozos, diversos parámetros, condiciones iniciales y de borde para simular la realidad, que se describen a continuación.

8.4.1 Construcción del modelo subterráneo.

La construcción del modelo se basa en la compilación de la información geológica, geofísica y geográfica de la zona de estudio, necesaria para construir una geometría que represente las unidades geológicas y el acuífero. Por otro lado, con la información hidrometeorológica y basados en la bibliografía de estudios anteriores, se construyeron los flujos de entrada y de salida que posee el sistema. Una vez ingresadas las variables que se suponen conocidas (aquellas que se definen en el modelo conceptual, ya sea calculadas, tomadas de la bibliografía o definidas según la experiencia del consultor) se realizó un proceso de calibración, con el fin de tener un modelo de Impulso/Respuesta que, por medio de la resolución de ecuaciones físicas, permita predecir con cierto grado de certeza múltiples escenarios futuros y ser una herramienta importante para la toma de decisiones con respecto a la gestión de los recursos hídricos de la zona.

Como se mencionó, el modelo numérico se realizó en el Software Visual MODFLOW versión 4.6.0.169, utilizando los solver MODFLOW 2000 y MODFLOW NWT, obteniendo los caudales pasantes en distintas zonas y el nivel piezométrico en todo el dominio del modelo. El modelo se implementó en régimen permanente con una duración de un año (1960), asumiendo que la variación del almacenamiento en el periodo de modelación era nula. Para el régimen transiente se utilizó una ventana de modelación de 57 años (1961-2017). La condición inicial de niveles piezométricos de esta modelación (CAT) corresponde al resultado obtenido con el modelo en régimen permanente (CNP).

8.4.2 Dominio espacial del modelo.

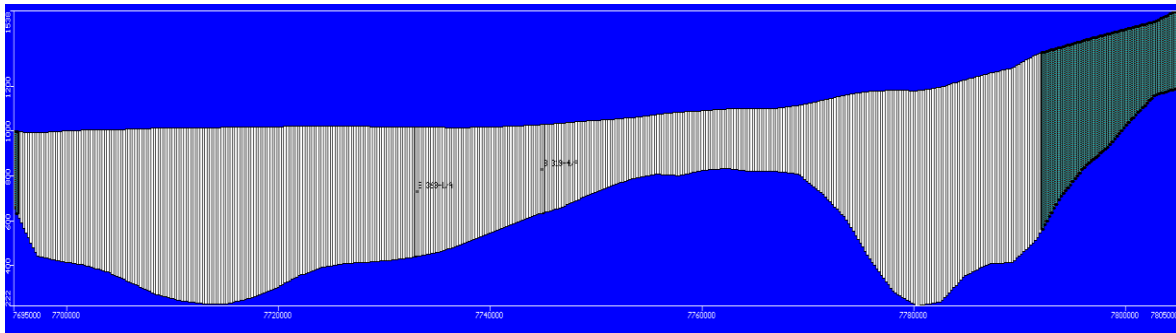
Se realizó la limpieza del dominio, disminuyendo la cantidad de celdas inactivas, esto se efectúa eliminando del modelo numérico el espacio inútil fuera del dominio, minimizando el uso de celdas inactivas. El modelo abarca un rectángulo dentro de las siguientes coordenadas UTM:

Límites Norte y Sur: coordenadas UTM (WGS84) N 7.805.000 y 7.695.000

Límites Este y Oeste: coordenadas UTM (WGS84) E 411.500 y 465.5000

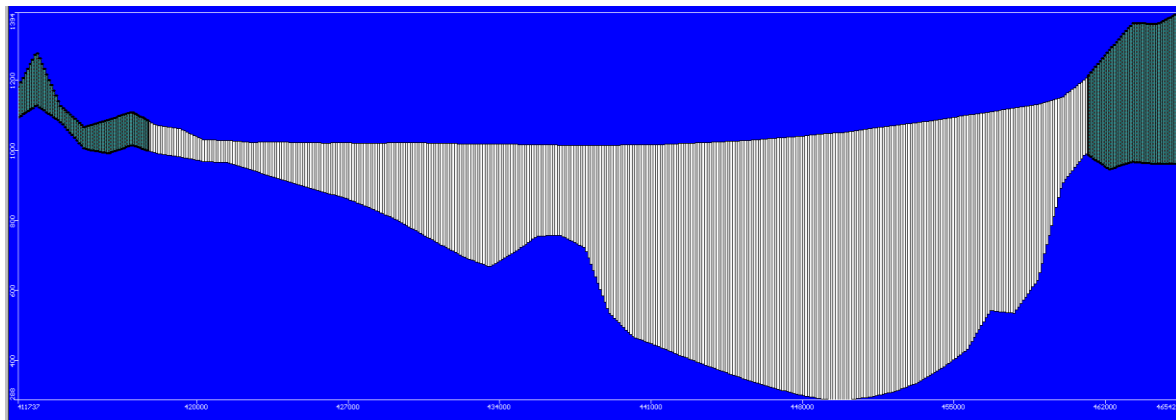
El dominio se dividió en 500 filas en dirección N-S y 500 columnas en dirección E-O, obteniendo 250.000 celdas de 220 x 108 m. En la vertical se consideró solo 1 capa al igual que en fase I, lo que trajo consigo consecuencias al momento de la calibración, ya que el basamento rocoso se encuentra a gran profundidad y coexisten unidades permeables, correspondientes a roca sedimentaria del cuaternario, ubicadas cerca de la superficie, con unidades densificadas correspondientes al terciario y cuaternario cerca del basamento rocoso, por lo tanto, la conductividad corresponde a un promedio en la vertical.

Figura 8-10 Sección longitudinal del dominio del modelo, corte dirección S-N. (escala H:V=1:20)



Fuente: Elaboración propia

Figura 8-11 Sección transversal del dominio del modelo, corte dirección O-E. (escala H:V=1:20)

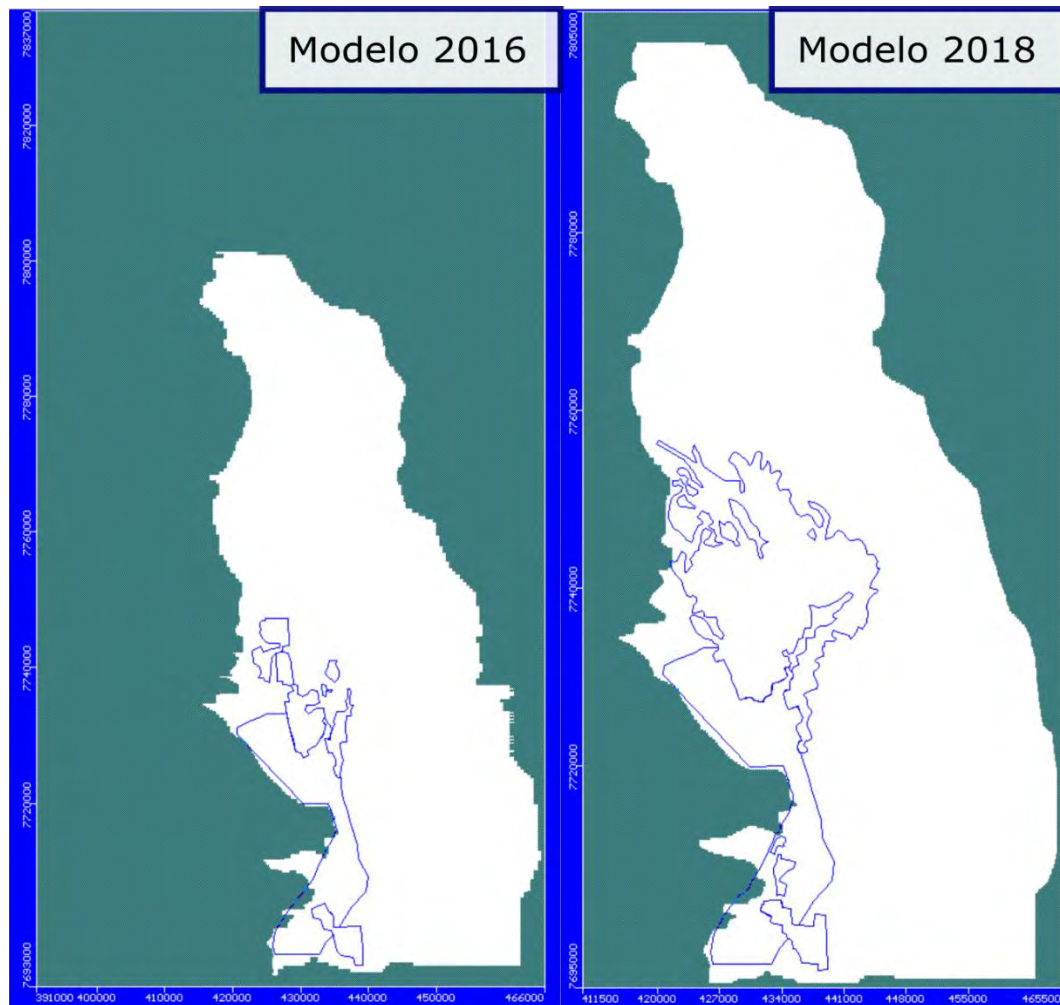


Fuente: Elaboración propia

8.4.3 Dominio temporal.

Se mantiene la discretización propuesta en DGA (2016), esta supone una escala anual para los periodos de stress, teniendo en cuenta que el objetivo es un análisis de largo plazo. En consecuencia, se consideran 57 pasos de tiempo para el periodo de calibración/validación y 50 para la proyección futura. Cada uno de esos periodos de stress el Solver lo divide en 10 pasos de tiempo de una duración 1,2 veces mayor que el anterior (para discretizar de forma más refinada el efecto del cambio en las condiciones del modelo en los tiempos más próximos al nuevo periodo de estrés).

Figura 8-12 Dominio Modelo Fase I DGA (2016) vs dominio Fase II DGA (2018).

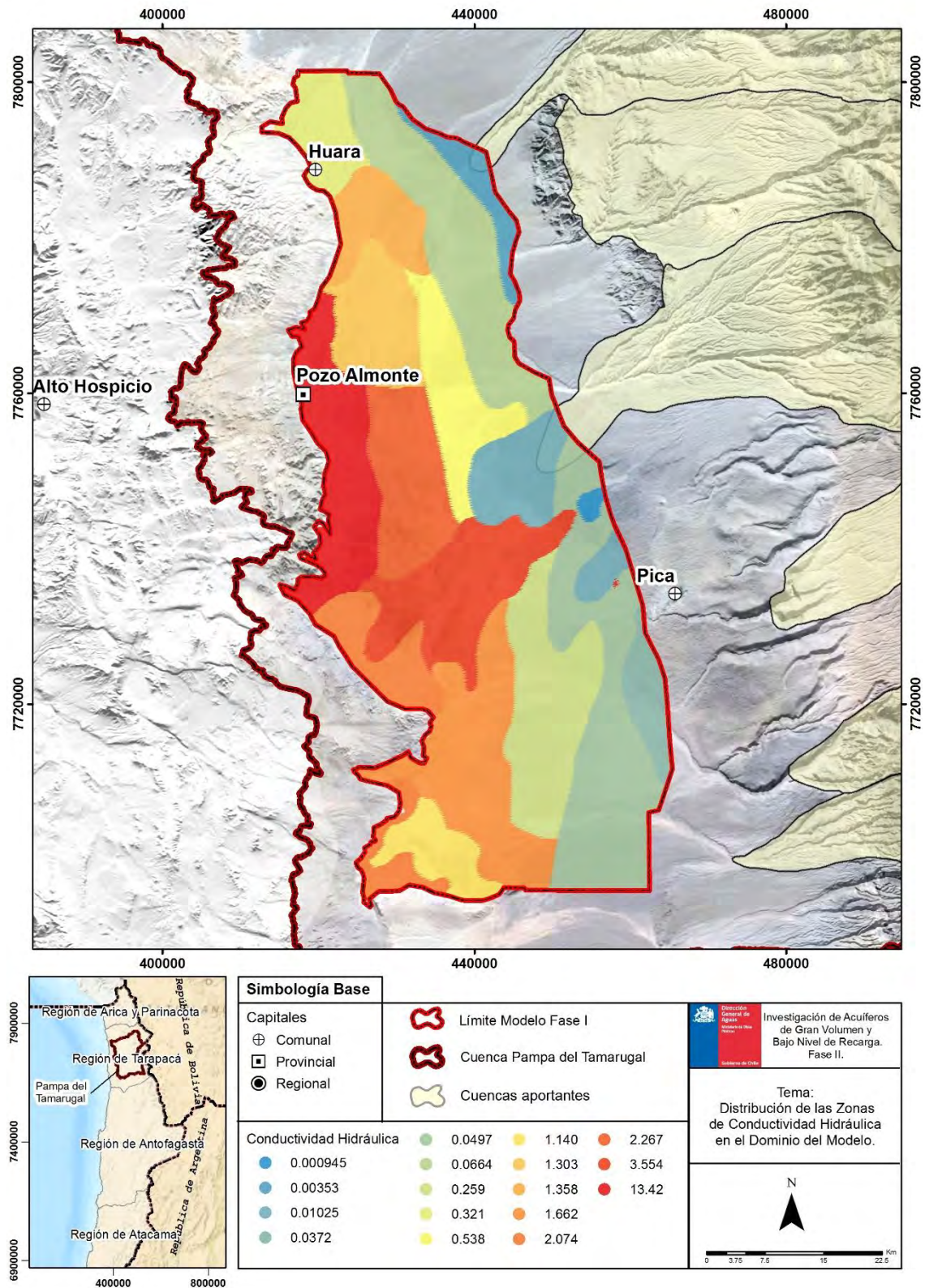


Fuente: Elaboración propia

8.4.4 Parámetros elásticos.

A pesar de que existen propuestas de zonificación geológica, tanto como para unidades geológicas, como para zonas de mayor o menor almacenamiento, esta información no se utilizó, por las razones ya expuestas. Se recalca que se propone comprender la **conductividad hidráulica del modelo como un K' , el que corresponde a una conductividad hidráulica promediada en la vertical** y que además corrige la discordancia entre la pendiente del basamento rocoso y el basamento impermeable, por lo tanto, no corresponde utilizar las zonificaciones geológicas propuestas en la literatura, que por lo demás corresponden principalmente la caracterización de la formación geológica más superficial.

Figura 8-13 Distribución de las Zonas de Conductividad Hidráulica en el Dominio del Modelo.



Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, los rangos del coeficiente de almacenamiento son concordantes con la física y las características de las unidades hidrogeológicas. Se consideró que el valor de este parámetro varía entre 10% y 30%.

8.4.5 Evaporación y evapotranspiración.

Para la evaporación se utilizó el modelo de decaimiento exponencial presentado en la Figura 8-14. Se asume una evaporación superficial de 1.400 mm/año y una profundidad de extinción de 3,5 metros. La ecuación obtenida para el decaimiento exponencial corresponde a:

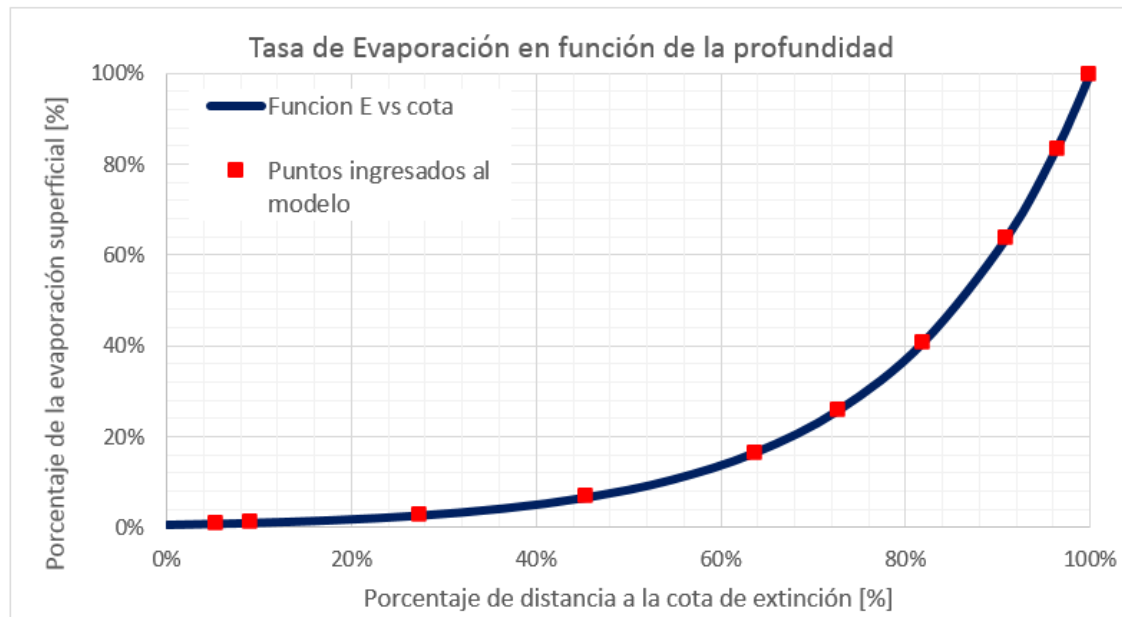
$$E = 3,835 e^{-1,414 \cdot z} \quad \text{Ecuación 8.4-1}$$

Donde:

E : Evaporación en mm/d.

Z : Profundidad del nivel freático en metros.

Figura 8-14 **Modelo de decaimiento exponencial para la evaporación.**



Fuente: Elaboración propia

Con respecto a las superficies ocupadas por los tamarugos y las áreas correspondientes a los salares, se utilizaron las mismas que en el modelo de DGA (2016), utilizando los mismos periodos de estrés (57, escala anual). Para la evapotranspiración se utiliza un modelo de

decaimiento exponencial en lugar del de decaimiento logarítmico propuesto en DGA (2016) e implementado de forma correcta en el módulo ETS de MODFLOW 2000. En la Figura 8-15 se presenta la curva utilizada en el modelo, en donde se considera una evapotranspiración superficial de 260 mm/año y una profundidad de extinción de 16 metros.

$$E = 0,689 e^{-0,298*z}$$

Ecuación 8.4-2

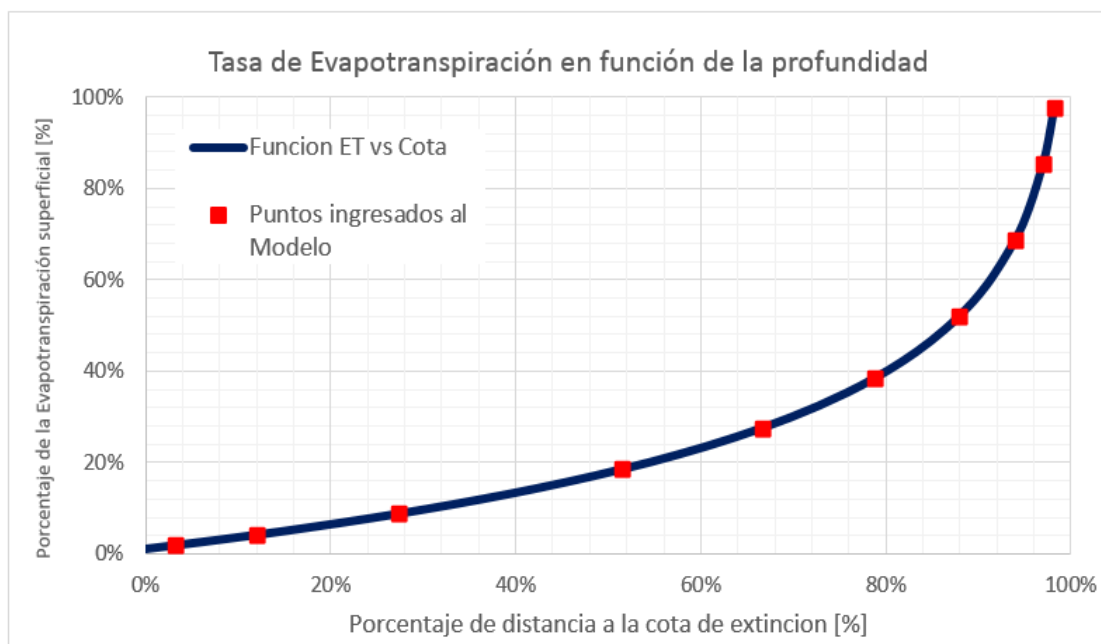
Donde:

E: Evapotranspiración en mm/d.

Z: Profundidad del nivel freático en metros.

Por otra parte en el Cuadro 8-1 se presenta la evaporación máxima utilizada en las diferentes zonas de tamarugos y salares implementadas en el modelo y los años donde permanecen activas.

Figura 8-15 Modelo de decaimiento exponencial para la evaporación.



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8-1 Valores de Evapotranspiración y Periodos Utilizados en Modelo

Zona	Max Evaporación (mm/año)	Implementación
Salar	1.400	1960-2016-2066
Tamarugo-Algarrobo	260	1960-2016-2066
Tamarugo-Algarrobo	260	1974-2016-2066
Tamarugo-Algarrobo	260	1974-2016-2066
Tamarugo-Algarrobo	260	1985-2016-2066

Fuente: Elaboración propia

8.4.6 Recarga subterránea desde las quebradas.

La recarga subterránea se simuló mediante pozos de inyección. La recarga proveniente de la quebrada de Tarapacá se simuló con sólo un pozo de inyección, ya que la información geofísica indica que este cauce se encuentra encajonado, por lo tanto, se simula como un ingreso puntual que distribuye caudal hacia el acuífero. El resto de las quebradas y el ingreso de agua por el límite norte se realizan con pozos distribuidos con caudales no uniformes. El total de los caudales ingresados por cada quebrada se presentan en la siguiente tabla.

Cuadro 8-2 Valores de Recarga Considerada con Pozos de Inyección en Modelo (CNP)

Sector	Numero de Pozos	Caudal medio Pozo (l/s)	Caudal Total (l/s)
Limite Norte	5	2,6	13
Quebrada Aroma	5	9	45
Quebrada Tarapacá	1	109	109
Quebrada Quipisca	9	3,2	29
Quebrada Quisma*	2	14,5	29
Quebrada Sagasca	1	25	25
Quebrada Chacarillas	8	14,4	116
Pica Matilla *	3	17	50

Fuente: Elaboración propia

Los caudales ingresados al modelo son proporcionales a los caudales medios anuales obtenidos en el apartado de análisis hidrológico. En base al supuesto de que la recarga estimada en la quebrada de Tarapacá es del orden de 100 l/s, según DGA (2014), este orden de magnitud se obtiene asumiendo una configuración geométrica obtenida a partir de la información geofísica (potencia media del estrato semiconfinado y ancho del perfil donde se calcula el caudal pasante), obteniendo un gradiente hidráulico medio utilizando dos pozos de observación y estimando una conductividad hidráulica K en función de la profundidad para el estrato semiconfinado. Se asume que todas las quebradas infiltran el mismo porcentaje del caudal medio anual, este supuesto se basa en que la formación de las quebradas corresponde al mismo fenómeno erosivo, los materiales aluviales y coluviales corresponden sedimentos no consolidados de la época cuaternaria, por lo que se espera condiciones similares de infiltración y evaporación. Bajo el supuesto que en la quebrada de Tarapacá se infiltra un caudal de 125 l/s se ingresan al modelo 109 l/s de forma directa en el abanico de la quebrada de Tarapacá y 16 l/s ingresan por la frontera oriente hacia el sur del abanico, para efectos del modelo, considerada la zona aportante de la quebrada Quipisca. Por lo tanto, por la quebrada Quipisca se estima que ingresa un caudal de 29 l/s.

Para la recarga de la quebrada de Aroma, se asume que solo la mitad ingresa a la Pampa del Tamarugal y la otra fluye hacia el norte, hacia la cuenca contigua, debido a la existencia de una divisoria de aguas subterráneas detectada en la zona, por lo tanto, ingresan 58 l/s, de los cuales 13 l/s corresponden al límite norte y 45 l/s a la quebrada Aroma.

Por la zona de Quisma ingresa el triple de lo calculado, ya que colindan con esta quebrada dos zonas con similar área y distribución de la altitud, correspondientes a la cuenca de la Pampa del Tamarugal, considerando un aporte total de 41 l/s de los cuales 29 l/s ingresan en la zona de Quisma y 14 l/s en la zona de la quebrada de Chacarillas.

El caudal ingresado por la quebrada de Chacarillas corresponde a la suma de su aporte más el de la quebrada La Ramada, el aporte mencionado por la subsubcuenca al sur de Quisma perteneciente a la cuenca de la Pampa del Tamarugal y un aporte subterráneo, del orden de los 50 l/s proveniente de Pica y otro cuerpo de agua que se encuentra al sur del cono de la quebrada, ingresando finalmente un total de 166 l/s.

8.4.7 Condición de nivel conocido, Limite sur.

Se impone la altura conocida en el límite sur, específicamente en la garganta de la zona oriente, donde el flujo se descarga hacia la zona del Salar Sur Viejo. Esta altura corresponde a un nivel piezométrico registrado en un pozo DGA que posee un código BNA asociado. Se

asumen dos gradientes lineales crecientes en dirección Oeste – Este, una pendiente baja en la zona plana (desde la cota 968 hasta la 974 m.s.n.m.) y una pendiente mayor en la zona de alta caída de potencial (desde la cota 974 hasta la 999 m.s.n.m.). Además, se asume un decaimiento lineal temporal de 1 metro homogéneo en el dominio espacial.

8.4.8 Pozos de explotación.

Se realizó un análisis de la información de pozos de producción existente en los registros de la DGA, el catastro de captaciones entregado por Aguas del Altiplano y los pozos presentados en DGA (2016). El objetivo fue comprobar que los caudales ingresados al modelo son consistentes con los derechos otorgados y con los informados para las operaciones de producción de agua potable. Es importante señalar que los principales caudales de extracción se encuentran registrados correctamente en el modelo.

El resultado de este análisis reveló la existencia de pozos incorporados al modelo realizado en la Fase I DGA (2016) que no se encuentran dentro de las bases de datos públicas. Estos pozos fueron eliminados de la modelación, ya que no se conoce la validez de esta información.

Se concluyó de este análisis que existen alrededor de 15 pozos de bombeo de caudales considerables que no fueron incluidos en el modelo DGA (2016), los cuales fueron ingresados en el actual proceso de modelación.

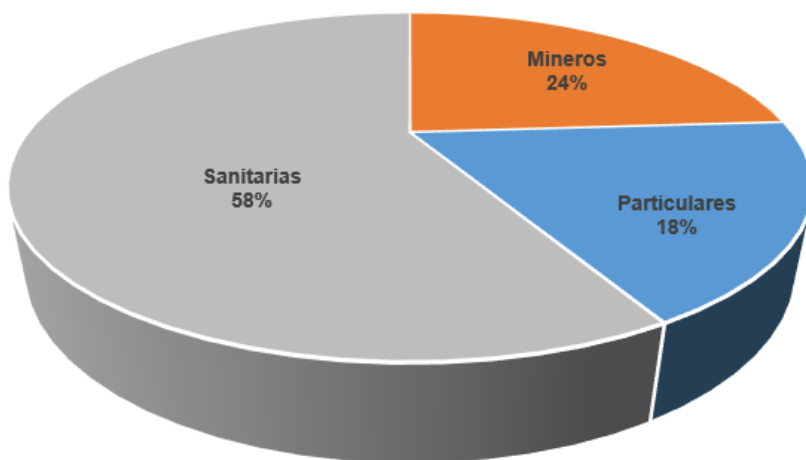
Los pozos utilizados en el modelo se clasificaron dependiendo de su uso; en particular, se diferenciaron entre aguas de uso minero, uso particular y de agua potable. Dependiendo de la categoría a la que pertenecen estos caudales se les asignó un factor de uso. De este modo, a las aguas de uso minero se les asignó el valor de 1 (opera continuamente) y a las de uso particular un valor de 0,5. Para el caso de agua potable, se ingresó el caudal operativo informado para estos pozos y en caso de que no contara con información de este tipo, se le asignó un factor de uso de 0,75.

Cuadro 8-3 Resumen de caudales de bombeo utilizados en el modelo.

Item	N° Derechos Pozos	N° Pozos con producción mayor a 20 [l/s]	Caudal total DGA[l/s]	Factor de Uso		Caudal total en pozos de extracción modelo [l/s]
Mineras	54	15	707,2	1		707
Particulares	367	10	1.067,5	0,5		534
Sanitarias	40	40	2.358,0	Con información	0,72	1.346
				Sin información	0,75	366
Total	461	65	4.132,7			2.953

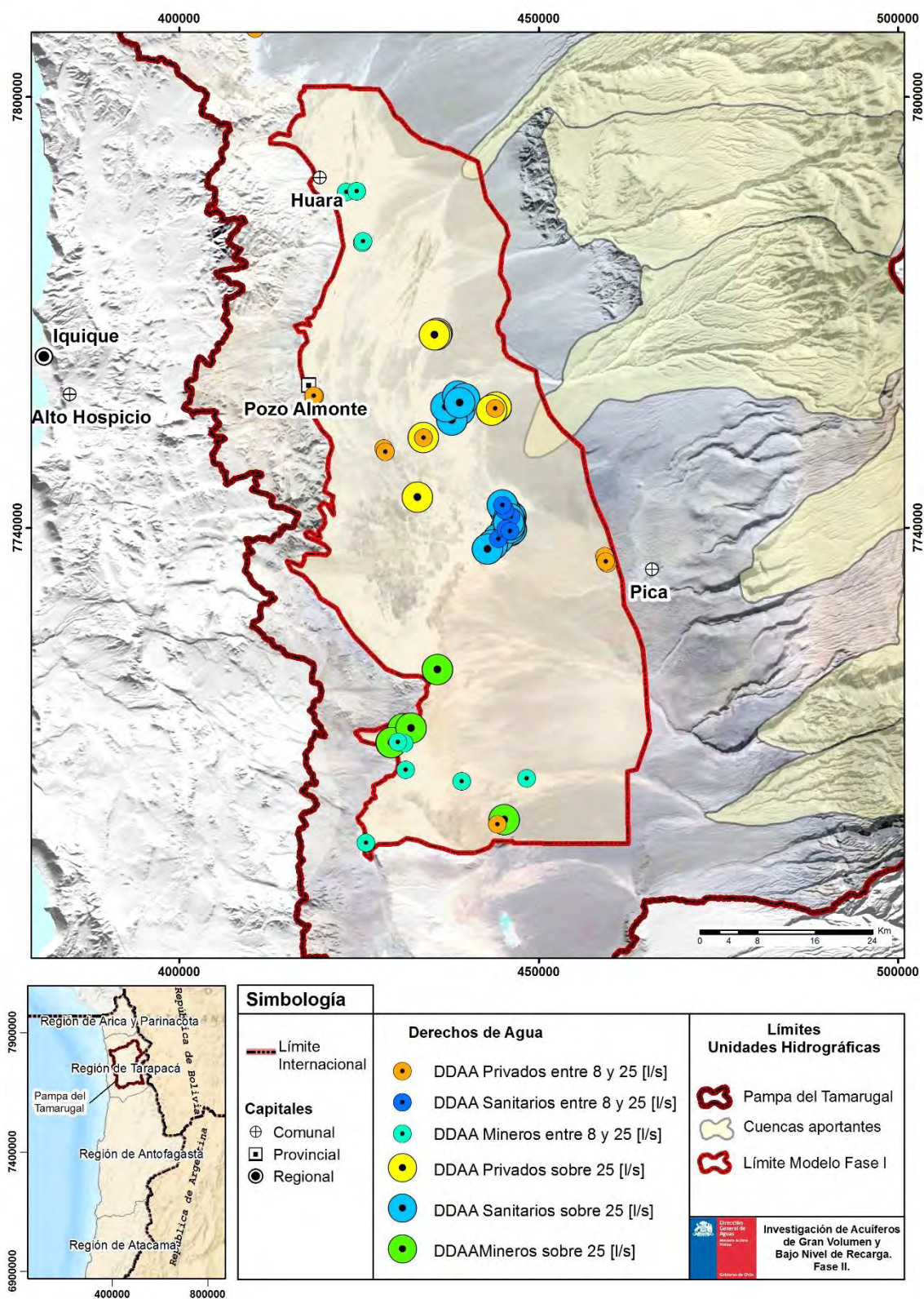
Fuente: Elaboración propia

Los mayores caudales de extracción registrados en esta zona corresponden a empresas sanitarias y a empresas mineras. La distribución espacial de estas extracciones se presenta en la Figura 8-17. La distribución porcentual de los caudales ingresados al modelo se observa en Figura 8-16. A partir de ella, es posible observar la importante influencia de las empresas sanitarias en la explotación de las aguas subterráneas en la zona. Debe considerarse que en esta gráfica se encuentra aplicado el factor de uso asignado.

Figura 8-16 Distribución porcentual del caudal de extracción ingresado al modelo.

Fuente: Elaboración propia

Figura 8-17 Distribución espacial para pozos con derechos de extracción consuntivos superior a 8 [l/s].



Fuente: Elaboración propia

8.4.9 Niveles freáticos.

Se utilizó una serie de pozos para los procesos de calibración del régimen permanente (CNP) y otra para la del régimen del transiente (CAT). Para el primero se utilizó una batería de 43 pozos obtenidos en su mayoría del estudio realizado por Álamos y Peralta, DGA (1987). Debido a la escasez de datos se utilizan valores medidos entre 1958 y 1965, bajo el supuesto de una baja explotación de aguas subterráneas en la Pampa del Tamarugal durante el periodo, lo que permitiría asumir que el acuífero se encuentra en régimen natural.

Para el régimen transiente se utilizaron los 40 pozos con mayor cantidad de registros en el tiempo, pertenecientes a la red hidrometeorológica de la Dirección General de Aguas. En ambos casos se buscó cubrir de la manera más homogénea posible el dominio, sujeto a los datos disponibles y su confiabilidad.

En el Cuadro 8-4 se presenta una tabla resumen con los descensos en el tiempo, se observa que hay zonas con grandes descensos en el tiempo tales como las vecindades de los pozos Salar Pintados 72, El Carmelo 2, Jica E, Guillermo Araya y Sara 3A, entre otros. En promedio se espera una tasa de descenso de 10 cm por año, pero existen sectores en los que se duplica, e incluso triplica, este valor medio.

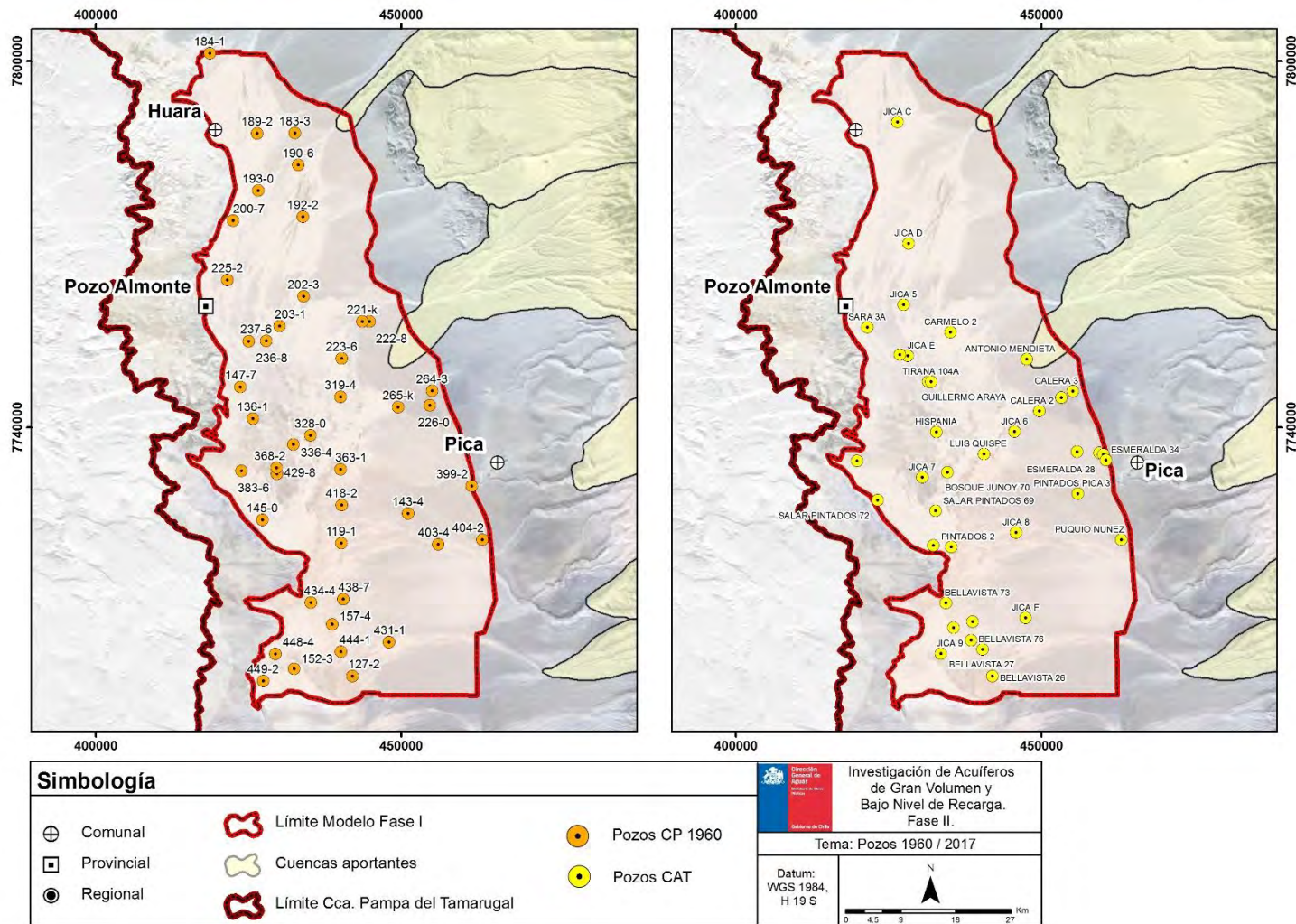
Cuadro 8-4 Resumen de descensos de niveles freáticos registrados en el tiempo.

Pozo	Inicio registros [año]	Fin registros [año]	Tasa de descenso [m/año]	Intervalo de Tiempo [años]	Descenso periodo [m]
Jica D	1998	2016	-0,11	17,4	1,87
Jica 5	1998	2016	-0,16	17,3	2,77
Sara 3A	1988	2004	-0,11	16,0	1,82
Sara Tirana	1994	2016	-0,14	21,7	3,06
Jica E	1998	2016	-0,17	17,4	2,88
Carmelo 2 [1]	1988	1999	-0,10	11,1	1,07
Carmelo 2 [2]	1999	2016	-0,39	16,2	6,37
Carmelo 2	1988	2016	-0,27	27,3	7,44
Guillermo Araya	1992	2001	-0,16	9,3	1,50
Tirana 104	1992	2000	-0,08	8,0	0,68

Pozo	Inicio registros [año]	Fin registros [año]	Tasa de descenso [m/año]	Intervalo de Tiempo [años]	Descenso periodo [m]
Hispania	1992	2015	-0,10	22,3	2,15
Salar Pintados 15	1988	2003	-0,12	14,7	1,75
Salar Pintados 72 [1]	1988	1996	-0,11	7,5	0,85
Salar Pintados 72 [2]	1996	2004	-0,51	7,9	4,03
Salar Pintados 72	1988	2004	-0,32	15,4	4,88
Jica 7	1998	2016	-0,04	17,3	0,76
Bosque Junoy	1992	2006	0,001	14,1	-0,01
Salar Pintados 69	1989	2016	-0,08	26,3	2,01
Luis Quispe	2002	2016	-0,07	13,6	0,88
Jica 6 [1]	1998	2004	0,57	5,9	-3,37
Jica 6 [2]	2004	2015	-0,13	11,1	1,45
Jica 6	1998	2015	0,11	17,0	-1,92
Esmeralda 6 [1]	2000	2005	0,03	4,9	-0,17
Esmeralda 6 [2]	2005	2016	-0,14	10,2	1,46
Esmeralda 6	2000	2016	-0,09	15,1	1,29
Jica 8 [1]	1999	2004	0,18	5,8	-1,02
Jica 8 [2]	2004	2015	-0,09	10,9	1,00
Jica 8	1999	2015	0,001	16,7	-0,02
Salar Pintados 19	1988	2016	-0,07	27,4	1,95
Pintados 2	1988	2016	-0,082	27,4	2,25
Pintados Pica 3	1989	1997	-0,14	8,2	1,18
Bellavista 73	1992	2007	-0,04	14,6	0,51
Bellavista 76	1988	2015	-0,03	27,0	0,74
Bellavista 26 [1]	1988	1999	-0,03	11,3	0,33
Bellavista 26 [2]	1999	2016	-0,08	16,1	1,34
Bellavista 26	1988	2016	-0,06	27,4	1,67
Jica 9	1998	2016	-0,07	17,3	1,27
Promedio			-0.10		1.7

Fuente: Elaboración propia

Figura 8-18 Pozos de calibración CNP para 1960 y Pozos de calibración/validación CAT [1960-2017].



Fuente: Elaboración propia

Existen singularidades en pozos vecinos entre sí. Un ejemplo de esto es que el pozo Guillermo Araya se encuentra a menos de 500 metros del pozo Tirana 104 y la tasa de descenso del primero es el doble de la del segundo para el mismo periodo de tiempo. Se presenta un grupo de pozos separados en dos intervalos de tiempo, esto muestra un quiebre en la tasa de descenso, producto de una extracción cercana. Dos ejemplos claros de este fenómeno son el pozo Carmelo 2, el cual pasa de un descenso de 1 metro en 11 años a 6 metros en 16 años, lo que es notorio desde el año 1999 en adelante; el segundo ejemplo claro corresponde al pozo Bellavista 26, el cual pasa de tener un descenso de 0,3 metros en un periodo de 11 años a uno de 1,3 metros en los siguientes 16 años.

8.5 Calibración del régimen permanente.

El proceso de calibración corresponde a la etapa posterior a la construcción del modelo numérico, una vez ingresados todos los parámetros, condiciones de borde e iniciales planteadas en el modelo conceptual. En régimen permanente se busca minimizar el error entre los niveles observados y los niveles calculados por el modelo. Para esto se pueden modificar las conductividades hidráulicas, las recargas y las salidas de caudal del modelo (evaporación, evapotranspiración y nivel constante de salida).

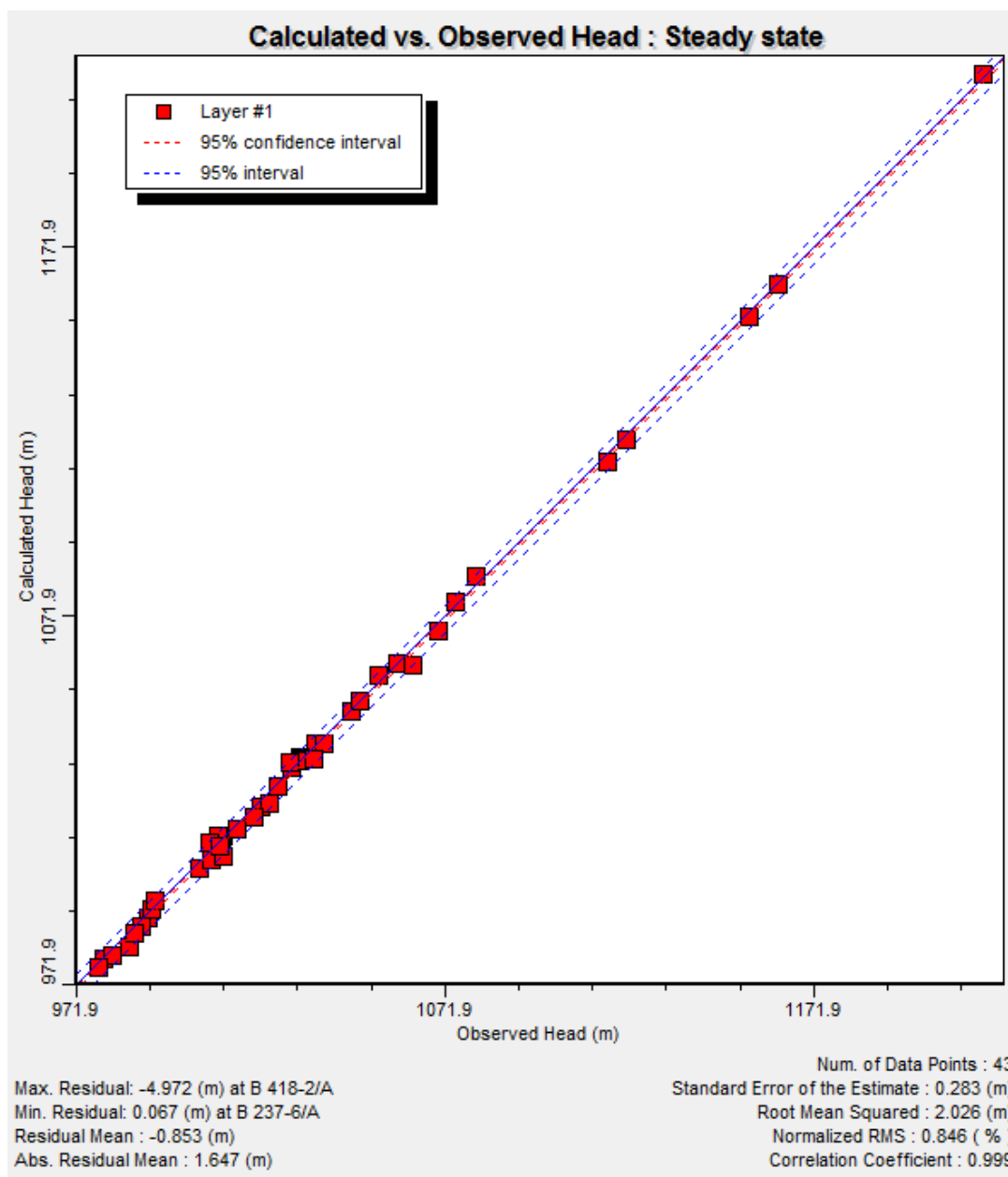
Se subdividió el dominio en varias zonas de conductividad obviando la distribución de unidades geológicas propuesta por PRAMAR (2008) y SERNAGEOMIN (2016), ya que, al ser el modelo de una sola capa en la vertical, las conductividades hidráulicas son equivalentes a la conductividad hidráulica promediada en la vertical, además corrigen la pendiente del basamento rocoso, con la del basamento impermeable. En consecuencia, lo que se obtiene **del proceso de calibración del régimen permanente es un K' que representa estos efectos.** No se utilizó la propuesta en DGA (2016), ya que los pozos de observación, con los que se calibró, no cubrían de forma homogénea el dominio.

8.5.1 Resultados de la calibración.

Al terminar el proceso de calibración se obtiene una solución con un RMS del orden del 0,5%, pero se debió sacrificar la precisión del régimen permanente en función de mejorar los resultados en el régimen impermanente, por lo tanto, lo que se expone a continuación son los resultados una vez finalizado el proceso, considerando todas las limitaciones producto de las incertidumbres en los inputs y las limitaciones asociadas a un modelo de una sola capa en la vertical.

En la Figura 8-19 se muestra el resultado de la calibración en régimen permanente, comparando niveles calculados versus observados, cada cuadrado rojo corresponde a un pozo de observación. En la figura también se adjunta en la parte inferior un resumen de los estadígrafos, para una mejor visualización se adjuntan en el Cuadro 8-5.

Figura 8-19 Resultados Gráficos del Modelo Numérico



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 8-5 Estadígrafos de Calibración Obtenido en Modelo Permanente (CNP)

Parámetro	Fórmula	Valor
Coeficiente de Correlación (R^2)	$1 - \frac{\sum (N_{OBS} - N_{SIM})^2}{\sum (N_{OBS} - \bar{N}_{OBS})^2}$	0,999
Error Medio (m)	$\frac{1}{n} \cdot \sum r_i$	0,857
Error Absoluto Medio (MAE) (m)	$\frac{1}{n} \cdot \sum r_i $	1,647
Máximo Residual Absoluto (m)	$\max \{ N_{SIM} - N_{OBS} \}$	4,972
Mínimo Residual Absoluto (m)	$\min \{ N_{SIM} - N_{OBS} \}$	0,067
Desviación Estándar (m)	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (r_i - R)^2}$	0,283
RMS (m)	$\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum r_i^2}$	2,026
RMS Normalizado (%)	$\frac{RMS}{\max(N_{OBS}) - \min(N_{OBS})}$	0,846

Fuente: Elaboración propia

8.5.2 Balance Hídrico.

El balance global de la cuenca hidrogeológica para el modelo numérico calibrado en régimen permanente, presentado en el Cuadro 8-6, desagregado por las principales componentes de entrada y salida del sistema

Cuadro 8-6 Balance Hídrico Flujos Modelo Permanente (CNP) (l/s)

ENTRADAS			ERROR
Recarga Subterránea de Quebradas y otros	416	416	0,12%
Aroma	45		
Tarapacá	125		
Quipisca	13		
Quisma	29		
Chacarillas	116		
Límite Norte	13		
Sagasca	25		
Pica - Matilla	50		
SALIDAS			
Evaporación Salares	96,7	417	
Evapotranspiración	188,3		
Descarga Salar Sur Viejo	132		

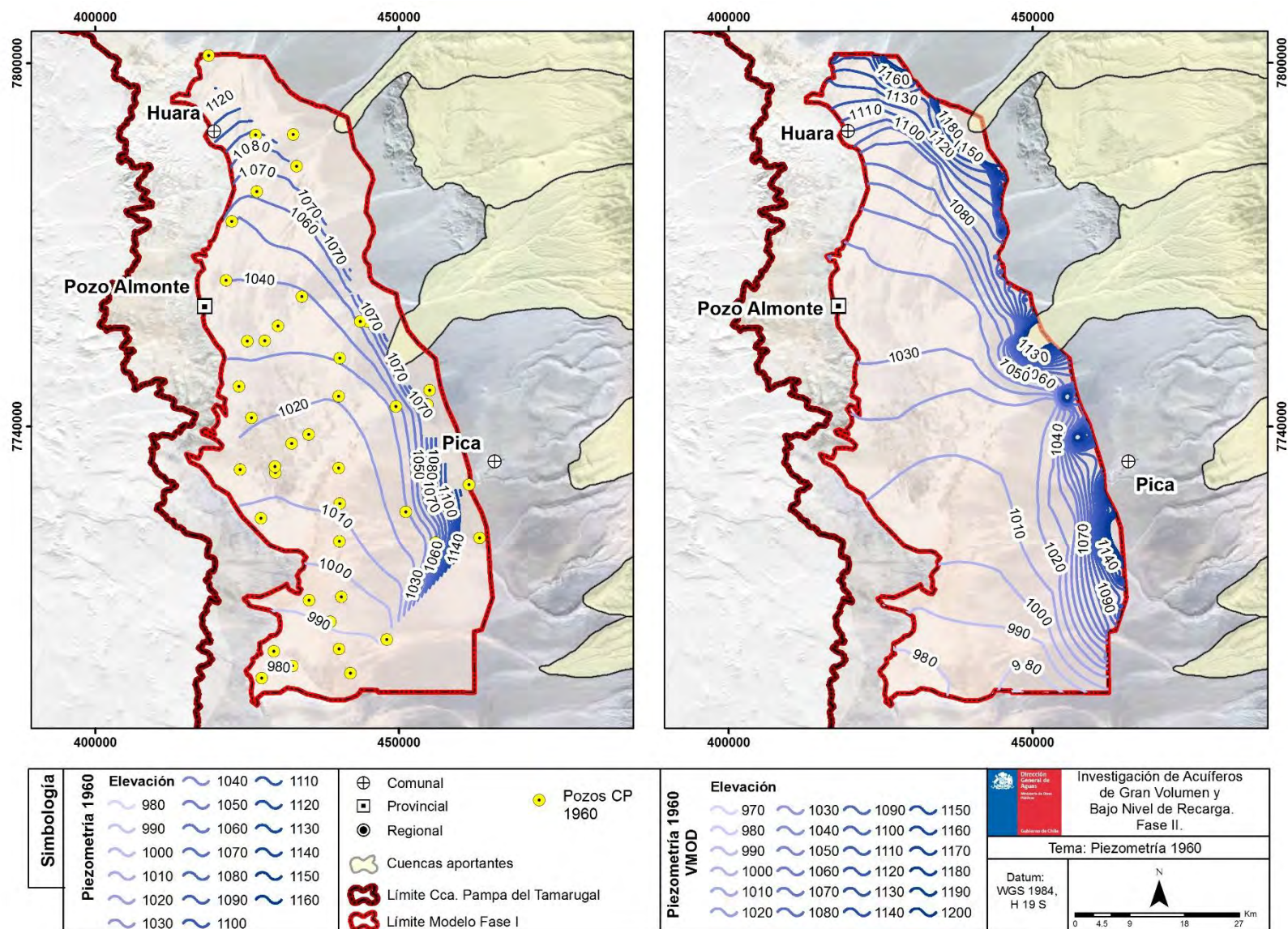
Fuente: Elaboración propia

8.5.3 Curvas equipotenciales.

En la Figura 8-20 se presenta una comparación de las curvas equipotenciales entregadas por el modelo y las obtenidas con los datos recopilados del estudio de Álamos y Peralta (1987), para el año 1960.

En la Figura 8-21 se presenta una comparación de los resultados entregados por el modelo para el año 2016 y los resultados de la piezometría realizada con los datos obtenidos en la campaña de terreno para el mismo año.

Figura 8-20 Piezometría mediciones para 1960 (Álamos y Peralta) versus resultado del Modelo Numérico.



Fuente: Elaboración propia

8.6 Calibración del Régimen Transiente.

El resultado obtenido con el régimen permanente corresponde a la situación inicial de la modelación transiente, por lo tanto, el modelo CNP corresponde a un input de niveles piezométrico iniciales para el modelo CAT (distribución espacial en todo el dominio de la altura piezométrica). Durante la calibración/validación se realiza un proceso iterativo, en donde los cambios a CNP afectan a CAT y si se realizan modificaciones en CAT estas significan correr nuevamente CNP para obtener la situación inicial.

Cuadro 8-7 Balance Hídrico año 2017, Flujos Modelo en régimen Transiente (CAT) (l/s)

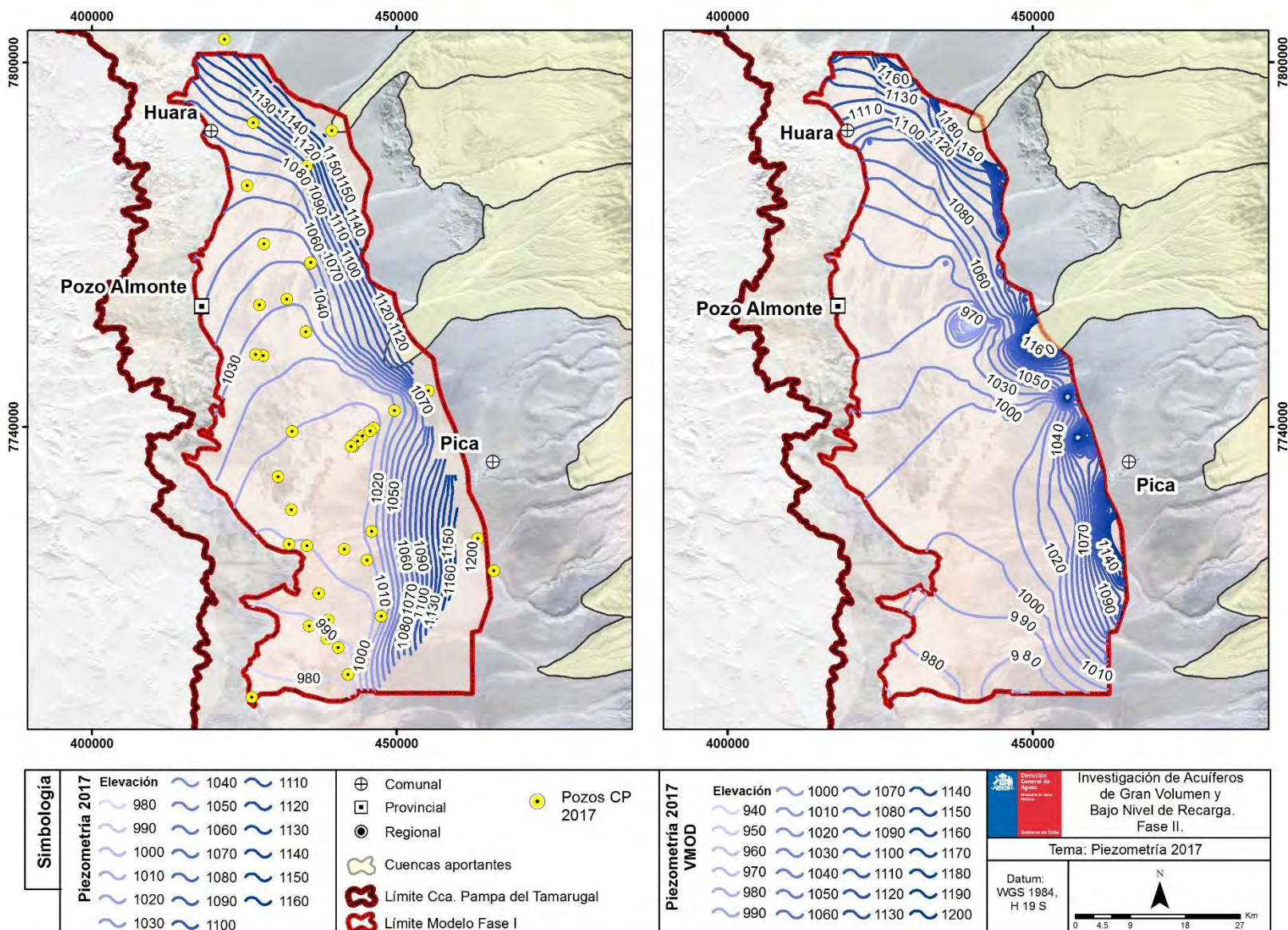
ENTRADAS			ERROR
Recarga Subterránea de Quebradas y otros	416	416	0,001%
SALIDAS			
Evaporación Salares	32,9	2.540,1	
Evapotranspiración	221,4		
Descarga Salar Sur Viejo	132,8		
Pozos de bombeo	2.255,1		
VARIACIÓN DEL ALMACENAMIENTO			
Desembalse	2.124,1	2.124,1	

Fuente: Elaboración propia

Existen 5 zonas de stress hídrico importante en el acuífero de la Pampa del Tamarugal, los que se encuentran en las zonas de:

- Zona de explotación de agua potable en sector Canchones.
- Zona de producción de agua potable en sector El Carmelo.
- Zonas de los salares de Bellavista y Pintados, correspondientes al proyecto Pampa Hermosa de la empresa SQM.
- Zona de derechos mineros e industriales ubicados a 6 km al norte de la zona El Carmelo.
- Zona de La Tirana, alrededor de 5 km en dirección sur de la ciudad.
- En la zona que se encuentra al norte del límite superior del modelo (límite Norte), en donde a la fecha se la DGA ha asignado del orden de 175 l/s, cantidad superior a lo estimado recarga la quebrada de Aroma.

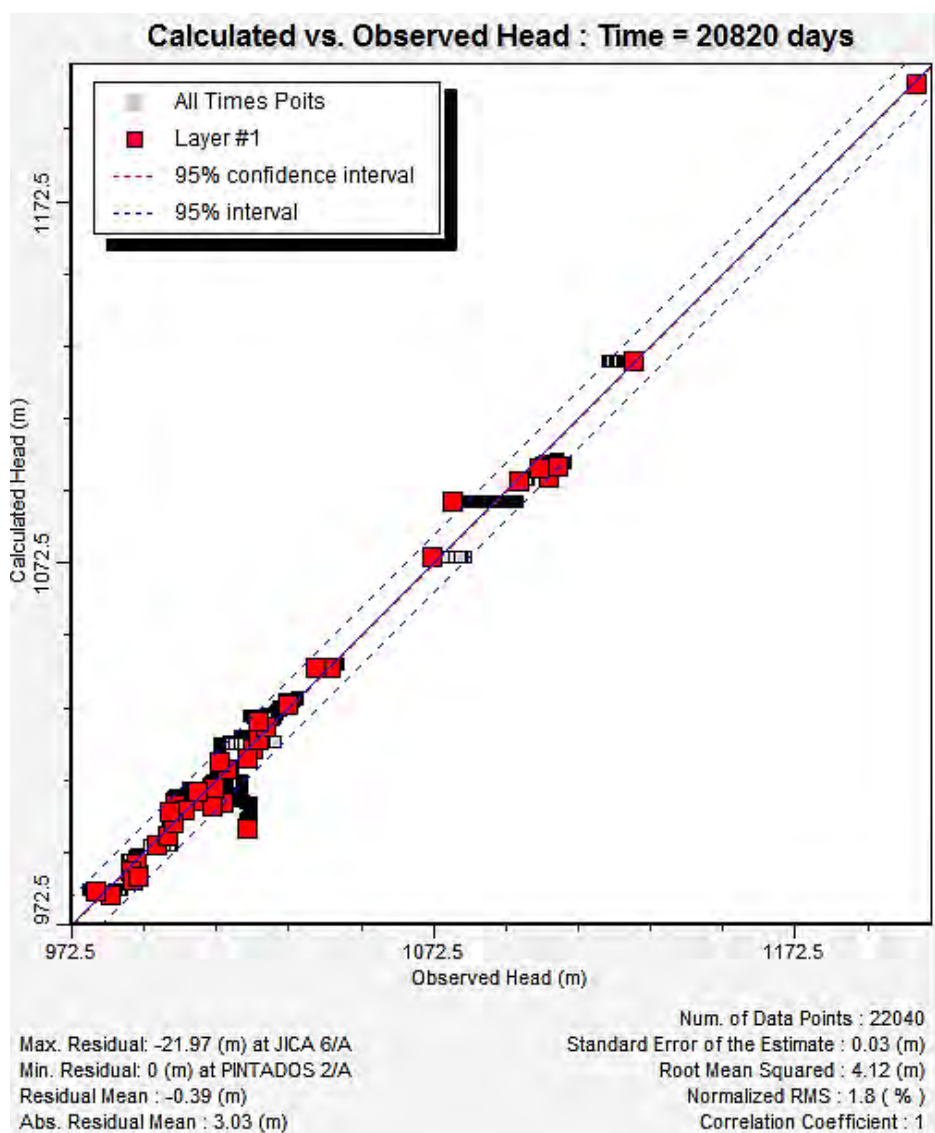
Figura 8-21 Piezometría mediciones campaña terreno(DGA 2017) versus resultado del Modelo Numérico



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8-22 se muestra el resultado de la calibración en régimen transiente para todos los pasos de tiempo, comparando niveles calculados versus observados. Cada cuadrado rojo corresponde a un pozo de observación para el tiempo correspondiente a 20.820 días (57 años), los cuadros grises corresponden a la comparación entre pozos observados y calculados para el resto de los pasos de tiempo. En la figura también se adjunta en la parte inferior un resumen de los estadígrafos, para una mejor visualización se muestran en el Cuadro 8-8

Figura 8-22 Resultados Gráficos de calibración del Modelo Numérico Transiente



Fuente: Elaboración propia

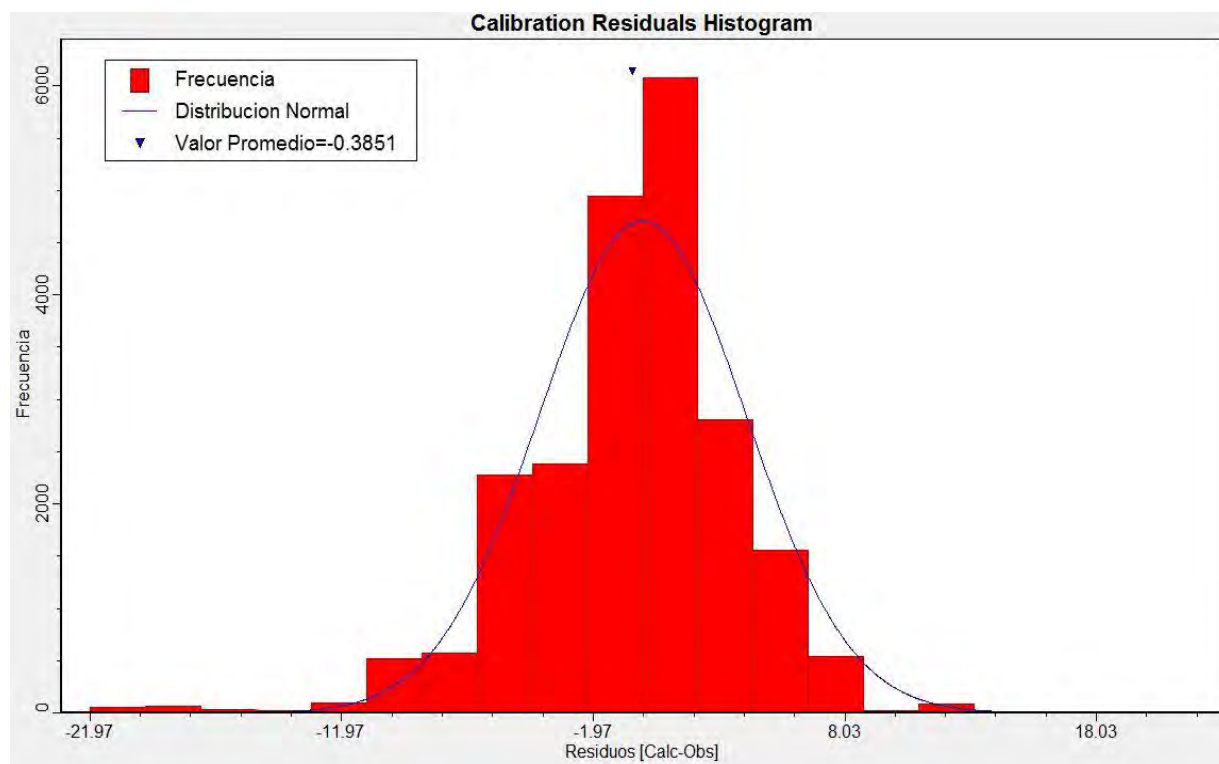
Cuadro 8-8 Estadígrafos de Calibración Obtenido en Modelo Transiente (CAT) para todos los tiempos.

Parámetro	Fórmula	Valor
Coeficiente de Correlación (R^2)	$1 - \frac{\sum (N_{OBS} - N_{SIM})^2}{\sum (N_{OBS} - \bar{N}_{OBS})^2}$	1
Error Medio (m)	$\frac{1}{n} \cdot \sum r_i$	-0.39
Error Absoluto Medio (MAE) (m)	$\frac{1}{n} \cdot \sum r_i $	3.03
Máximo Residual Absoluto (m)	$\max \{ N_{SIM} - N_{OBS} \}$	-21.97
Mínimo Residual Absoluto (m)	$\min \{ N_{SIM} - N_{OBS} \}$	0
Desviación Estándar (m)	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum (r_i - R)^2}$	0.03
RMS (m)	$\sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum r_i^2}$	4.12
RMS Normalizado (%)	$\frac{RMS}{\max(N_{OBS}) - \min(N_{OBS})}$	1.8

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8-23 se presenta el Histograma de residuos, correspondiente a la diferencia entre los valores simulados y observados para todos los tiempos de modelación. El histograma se encuentra centrado en torno a cero y se asemeja a una distribución normal. Los valores que se alejan más de 10 metros corresponden al pozo Jica 6, en el que los niveles observados se comportan de manera distinta a lo que debiese ocurrir con los estímulos impuestos en la modelación y al pozo Antonio Mendieta, el que se encuentra aguas abajo de la condición de recarga, como la recarga es constante, el nivel se mantiene constante al no existir pozos de extracción en la vecindad.

Figura 8-23 Resultados Gráficos de calibración del Modelo Numérico Transiente [Histograma de Residuos]



Fuente: Elaboración propia

De los resultados entregados por el modelo, teniendo en cuenta los pozos de observación presentados en la Figura 8-24 y en la Figura 8-25 utilizados, contrastado con los derechos de aguas declarados en la DGA, se puede afirmar lo siguiente:

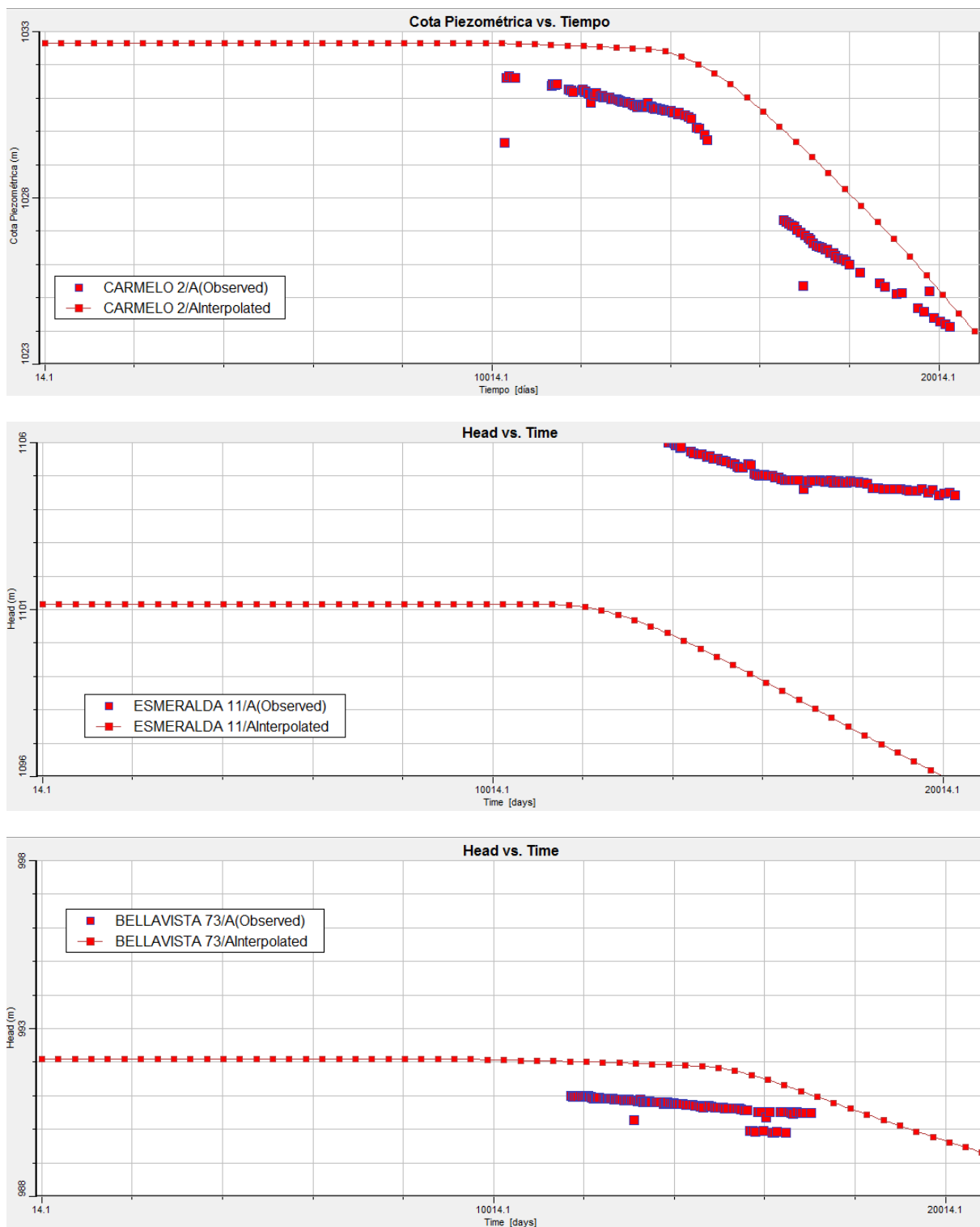
- La extracción en la vecindad del pozo El Carmelo 2 había comenzado antes de lo declarado (1990).

-
- En la zona de Esmeralda los conos de depresión de aguas subterráneas se encuentran sobreestimados, ya que la baja conductividad hidráulica responde a la pendiente del fondo impermeable, por lo que a bajos caudales se presenta un gran estrés.
 - En la zona sur, donde se encuentran los pozos de observación Jica F y Bellavista 73, el modelo muestra que aún no se explotan todos los derechos constituidos.
 - A lo largo de la línea que une los pozos de observación Jica D, Jica 5, Sara 3A, Salar Pintados 15 y Salar Pintados 72, se aprecia el descenso sostenido de los niveles piezométricos en la Pampa del Tamarugal.
 - En la zona aledaña al pozo Pintados 2, tampoco se ejerce aún la totalidad de derechos asignados.

De los resultados obtenidos la principal conclusión es que la variación del almacenamiento tiene relación directa con la cantidad bombeada, esto se debe a que la suma de la evaporación en la zona de salares más la evapotranspiración de los tamarugos y el caudal de salida hacia Sur Viejo son del mismo orden que la recarga, es decir, la explotación de aguas subterráneas se realiza a expensas del almacenamiento y no de la recarga, lo que representa una condición de explotación no sostenible. Resulta paradójico que la replantación de tamarugos aumenta la demanda hídrica de la cuenca y contribuye con el desbalance, asimismo, mayor cantidad de tamarugos ayuda a deprimir más rápido los niveles, generando que su índice de vitalidad disminuya. Además, la zona de donde se realizan labores de reforestación se ubica en el sector norte del dominio del modelo, en donde los niveles de aguas subterráneas se encuentran más profundos.

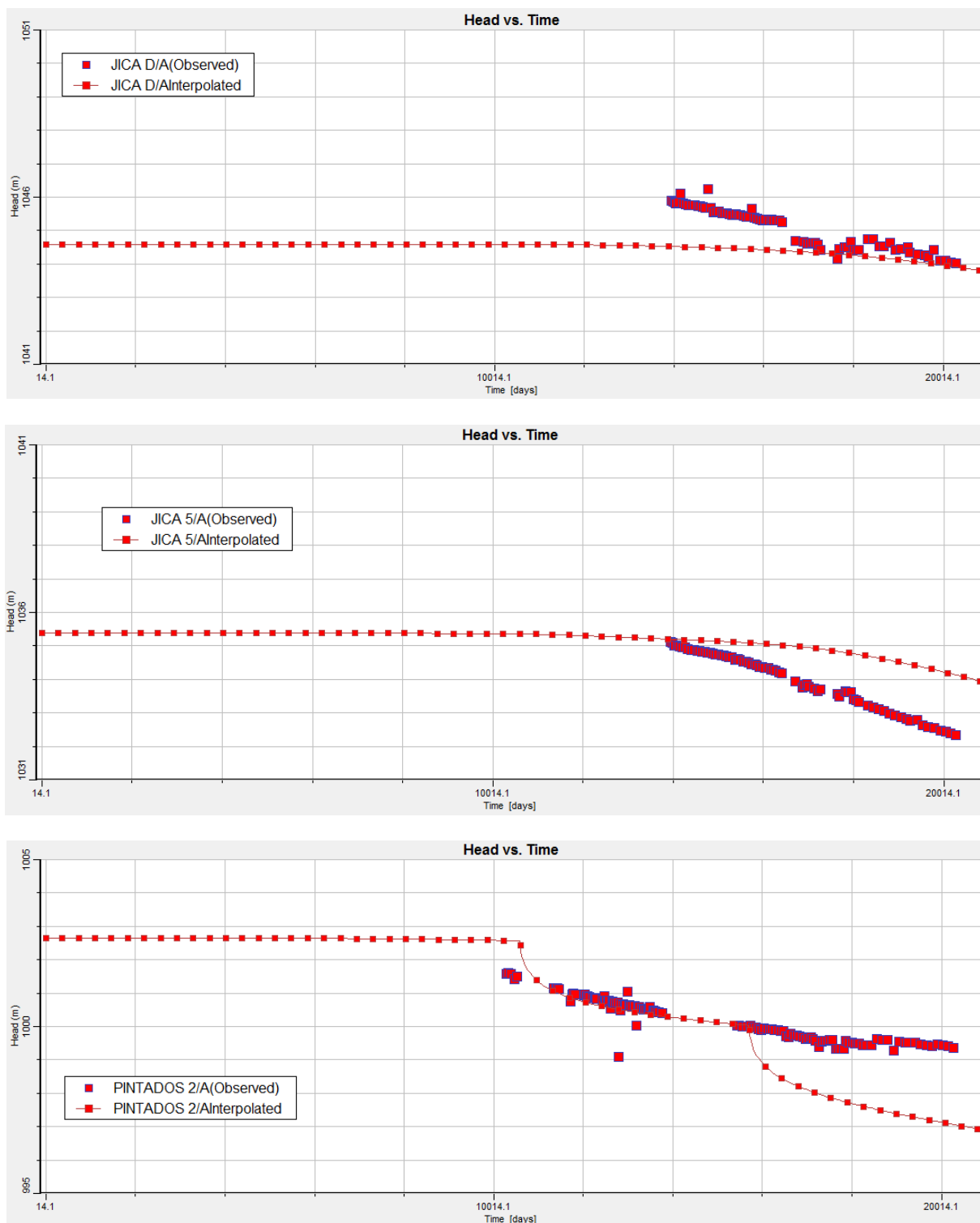
En el Anexo G se presenta la gráfica de los niveles piezométricos observados y calculados en función del tiempo, para todos y cada uno de los pozos utilizados para la calibración/validación del modelo numérico en régimen transiente.

Figura 8-24 Niveles piezométricos observados y calculados en función del tiempo, para distintos pozos.



Fuente: Elaboración propia

Figura 8-25 Niveles piezométricos observados y calculados en función del tiempo, para distintos pozos.



Fuente: Elaboración propia

8.7 Brechas de información.

Existe una serie de factores que hacen que el modelo tenga limitaciones con respecto a la calibración y, en consecuencia, con elementos más finos de predicción, esto es, piezometría a escala local, mas no el balance hídrico de largo plazo del sistema. Recomendaciones para que futuras modelaciones subsanen esta situación son:

- Mejorar la estimación de los mecanismos de recarga y la cuantificación de ésta. Modelos anteriores utilizan como recarga directamente el caudal medio anual traspuesto desde una cuenca a otra, sin tomar en cuenta cuánto de ese caudal infiltra. Esto corresponde a un escenario optimista en cuanto a la recarga, produciendo expectativas sobreestimadas de la cantidad de recurso hídrico disponible en el largo plazo.
- Mejorar la red de medición en las zonas de estrés producto del bombeo e identificar si los niveles medidos corresponden a niveles dinámicos o estáticos.
- Confeccionar el modelo en un software que permita utilizar malla no estructurada, para el refinamiento de ésta, ya sea en las zonas de estrés o en las zonas cercanas a condiciones de borde.
- Proponer una estratificación en sentido vertical e identificar de manera precisa el fondo impermeable, estratos confinantes, lentes de arcilla y otros elementos que hagan que el valor de la conductividad hidráulica obtenida corresponda al producto de una conductividad hidráulica por un factor de corrección a causa de la ausencia de esta información.
- Identificar el nivel de agua salobre, ya que, si bien existe un gran volumen de almacenamiento del recurso hídrico, este posee un volumen muerto de agua, no apta para el consumo humano y que hace que las proyecciones de durabilidad del recurso sean mayores a las reales.
- Obtener un valor certero para la evapotranspiración del tamarugo, delimitar zonas de tamarugo en buen y mal estado y otras mejoras, necesarias para tener mayor precisión de la evapotranspiración en función de la profundidad, y en la profundidad de extinción de ésta.

8.8 Modelación de Escenarios Futuros.

Una vez calibrado el modelo, este permite definir escenarios futuros, lo que implica imponerle distintos o los mismos impulsos ya utilizados, y que el modelo entregue respuestas de escenarios futuros en base a la calibración realizada. Es importante recalcar que en la realidad existen numerosas variables que no son factibles de reproducir en los modelos, por lo tanto, estos entregan el efecto que produce un estímulo a la calibración realizada, resolviendo ecuaciones físicas, en este caso en particular la ecuación general de las aguas subterráneas. El resultado de la calibración corresponde a un modelo de flujo desde un enfoque euleriano (descripción del campo de velocidad en un volumen de control).

Dicho lo anterior a continuación se describen los 6 escenarios CFT propuestos, que permitirán un mayor análisis de lo que ocurre en la Pampa del Tamarugal y que es lo que se espera a futuro.

- **[CFT E1] No se realiza ningún cambio operacional desde 2017:** se proyecta un escenario con la explotación tal y como ocurre en la actualidad, en donde no se ejerce la totalidad de los derechos constituidos y la recarga media no disminuye. Este escenario corresponde a un caso favorable, ya que no toma en cuenta variables de cambio climático (disminución de la recarga) ni el aumento de la demanda de agua potable. Permite visualizar el futuro del acuífero de la Pampa del Tamarugal si se siguiese explotando sin tomar ninguna medida.
- **[CFT E2] Dejan de operar los pozos de las empresas sanitarias:** es sabido el desbalance que posee el acuífero en estudio, en donde las extracciones superan del orden de 5 veces la recarga, en este escenario se eliminan las extracciones de las empresas sanitarias a partir del año 2017, pensando en una alternativa para la producción de agua potable, tal como la desalación de agua de mar, que permita disminuir el estrés hídrico al que se encuentra sometida la Pampa del Tamarugal. La recarga es la misma que el escenario anterior, permitiendo comparar si una alternativa de fuente de agua potable mejora o no la situación futura del acuífero.
- **[CFT E3] Dejan de operar todos los pozos de extracción en el dominio del modelo:** en este ejercicio de modelación, que se considera inviable de implementar, se bajarán las extracciones producto del bombeo a cero a partir del año 2017. Este escenario entrega nociones del tiempo que necesita el acuífero para recuperar los niveles iniciales y si el daño causado producto de la explotación de las aguas subterráneas es reversible o no.

- **[CFT E4] Operan todos los pozos con la totalidad de los derechos de agua asignados:** este escenario corresponde a uno pesimista, en el que desde el año 2017 en adelante se hace usufructo del total de los derechos de aguas asignados y la recarga se mantiene igual que en los 3 años anteriores. Con este escenario se muestra el futuro de la Pampa del Tamarugal con la actual asignación de derechos de agua consuntivos establecida.
- **[CFT E5] En el año 2017 disminuye la recarga en un 10%:** en este escenario se muestra la sensibilidad del modelo y del acuífero a la variación en la recarga (disminución y aumento), sin focalizarse exclusivamente en la actual fase de cambio climático (disminución de la recarga) y cómo afecta esto a la situación de largo plazo, es decir, a los niveles piezométricos y a la variación del almacenamiento en los periodos finales de la modelación.
- **[CFT E6] La recarga es variable de forma aleatoria en un rango de [-40%; 40%]:** se crea un vector de variación aleatoria dentro de ese rango para los 57 pasos de tiempo y se aplica a las recargas provenientes de las quebradas, este ejercicio muestra el comportamiento del acuífero frente a una recarga variable a escala anual y cómo ésta afecta a la variación del almacenamiento en el largo plazo. Es importante tener en cuenta que el promedio de la recarga es el mismo que en los 4 primeros escenarios, por lo que este escenario es comparable con el escenario 1.

En el Cuadro 8-9 se muestra el año de inicio y de fin para los escenarios de modelación, además el caudal inicial de extracción producto del bombeo y el valor de la recarga a lo largo de la modelación. Como ya se mencionó en el escenario E6 varía en torno a 416 l/s de manera aleatoria entre 40% y -40%.

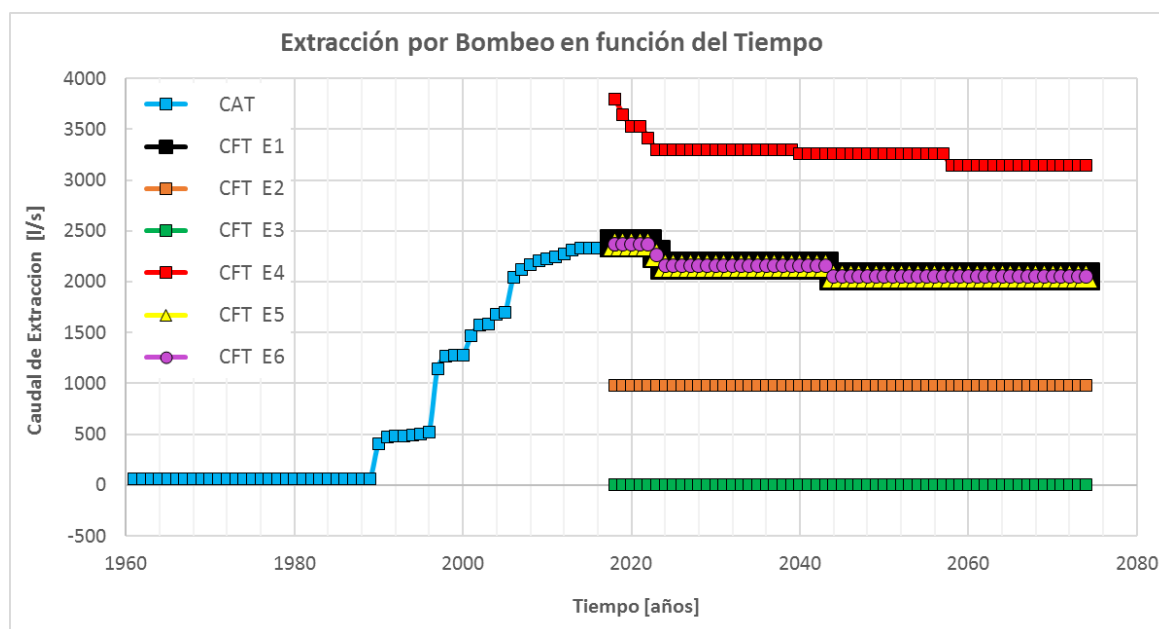
Cuadro 8-9 Resumen de Escenarios de Modelación.

Escenario	Inicio modelación [año]	Fin modelación [año]	Caudal de Bombeo [l/s]	Recarga [l/s]
CFT E1	2017	2074	2.369	416
CFT E2	2017	2074	979	416
CFT E3	2017	2074	0	416
CFT E4	2017	2074	3.790	416
CFT E5	2017	2074	2.369	374,4
CFT E6	2017	2074	2.369	variable

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8-26 se muestra la evolución en el tiempo de los caudales totales de extracción por bombeo en el modelo CAT y en los distintos escenarios modelados. A partir de 2017 (escenarios simulados) se observan disminuciones conforme avanza el tiempo, ese fenómeno corresponde a pozos “colgados”, es decir, el nivel freático está bajo el nivel inferior de las zonas de captación (cribas).

Figura 8-26 Extracción por bombeo en función del tiempo para los 6 escenarios modelados.



Fuente: Elaboración propia

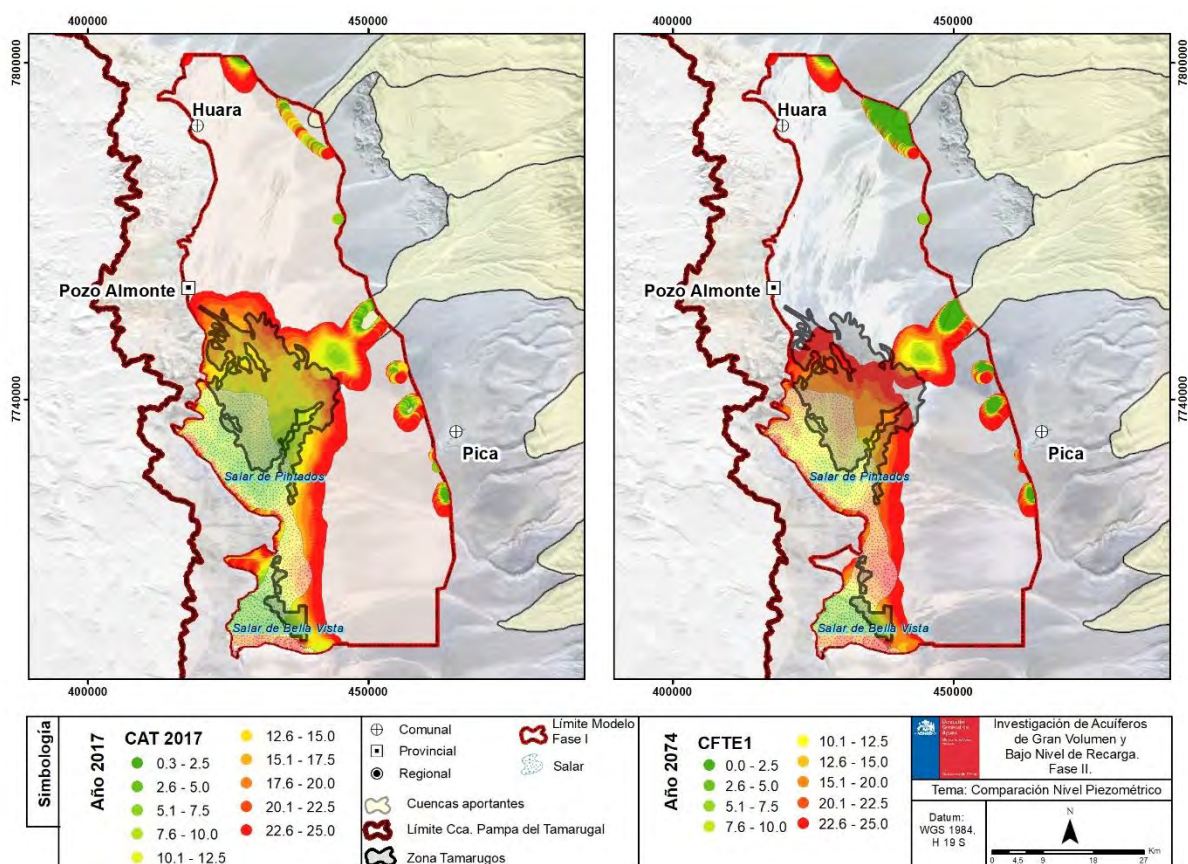
8.9 Análisis de los resultados.

Los resultados que se presentan a continuación dan cuenta de algunos elementos esperables. Es importante mencionar que las zonas más someras del acuífero se encuentran en donde existen salares y plantaciones de tamarugos. Esto significa que en algún momento fueron zonas de afloramiento de aguas subterráneas y, por lo tanto, permitió la existencia de flora en ellas. La replantación de tamarugos realizada en ambas ocasiones (1970 y 1985) se realizó al norte de la zona de tamarugos existentes; esto coincide con la dirección en que se profundiza el nivel freático. En consecuencia, los tamarugos nuevos, que aumentan la demanda de agua, además se encuentran en las zonas donde el espejo de agua se encuentra cada vez más profundo, es decir, en los sectores más desfavorables para su existencia.

Se presenta un set de figuras en las que se comparan distintos escenarios entre sí; en particular las zonas con nivel freático menor que 25 metros los que, tal como se menciona en el párrafo anterior, corresponden al lugar hacia donde confluyen las aguas subterráneas.

En la Figura 8-27 se comparan los resultados entre el estado actual del acuífero (resultado de modelo CAT para el año 2017) y el final de la simulación en el escenario 1 de los propuestos en el apartado anterior (modelo predictivo CFT para el año 2074).

Figura 8-27 Comparación Profundidad del nivel piezométrico situación CAT año 2017 vs CFT E1 año 2074.



Fuente: Elaboración propia

En la figura se observa en forma clara la profundización del espejo de agua, avanzando hasta más allá de la mitad del área de la zona de tamarugos, esto implica la imposibilidad de la existencia de los tamarugos que se encuentran en esa zona. La explicación de este fenómeno tiene dos cuasas principales: la primera corresponde al desarrollo de los conos de depresión producto de la extracción mediante bombeo en la zona de El Carmelo y en el sector de Canchones, la extracción de grandes caudales distribuidos en pocas zonas de

extracción va a producir el desarrollo de extensos y profundos conos de depresión y serán aún más grandes si ocurren en zonas de baja conductividad hidráulica. La segunda causa es producto del descenso generalizado de los niveles de aguas subterráneas en la Pampa del Tamarugal producto de su explotación, pues los derechos de agua concedidos sobrepasan al menos 8 veces la recarga estimada y los caudales de extracción por bombeo que están operando en este escenario (CFT E1) son del orden de 5 veces mayores que la recarga. La situación prevista es un escenario muy desfavorable para la sustentabilidad del acuífero de la Pampa del Tamarugal, considerando que el escenario planteado no aumenta la demanda de agua potable y no considera una disminución de la recarga en función del tiempo. Por lo tanto, si no se toman medidas se espera un escenario aún más crítico para el año 2074.

En la Figura 8-28 se presenta una comparación entre la situación final para el escenario 2 (modelo predictivo CFT para el año 2074) y la situación final para el escenario 4 (modelo predictivo CFT para el año 2074). El escenario 2 propone que dejen de operar las empresas sanitarias, ya que existe la posibilidad de obtener agua potable con medios alternativos, sujeto a un plan de inversión o a la compensación producto de las externalidades negativas que produce el uso minero e industrial en el acuífero. Se considera lo anterior dado que un proceso como la producción de Litio depende de la extracción de la salmuera y si bien es posible limitar los caudales de explotación, si se permite el desarrollo de esta industria, como es previsible, resulta infactible bajar las extracciones a cero.

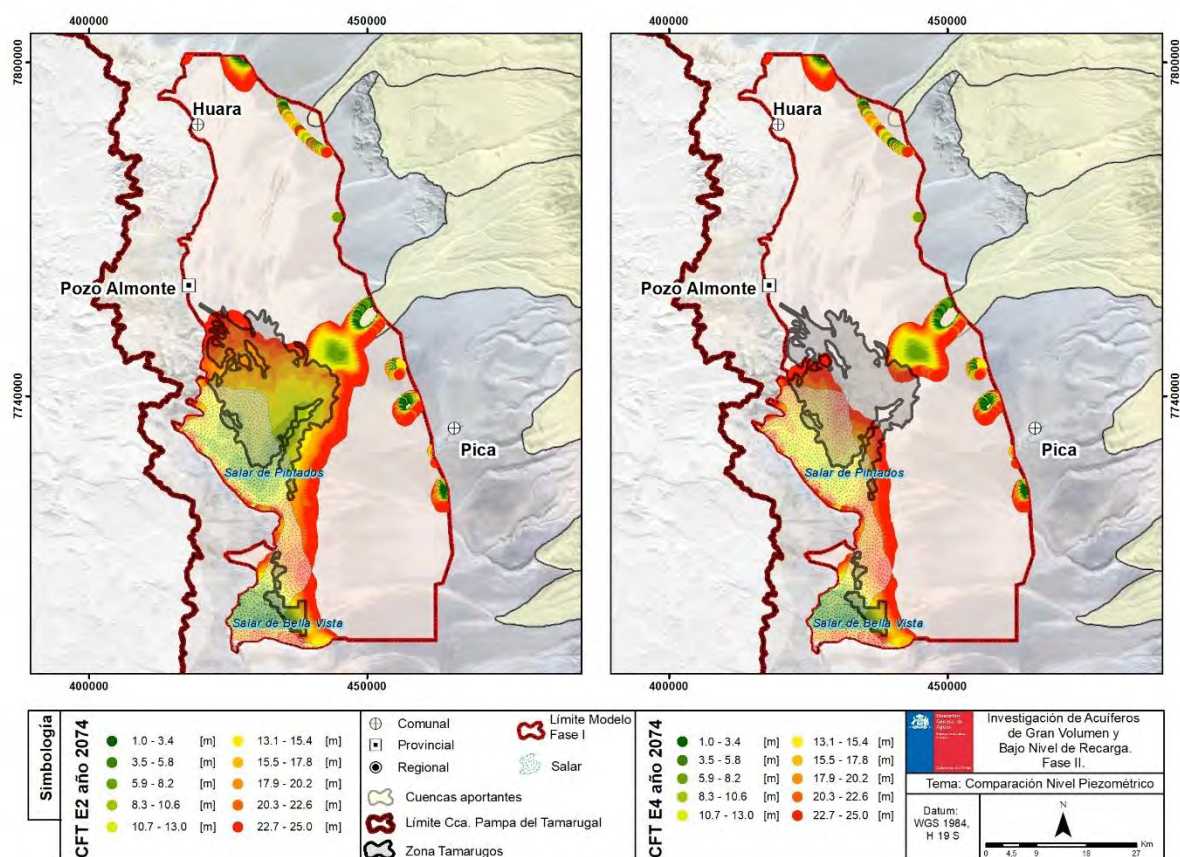
El escenario 4 por su parte corresponde a todos los derechos asignados por la DGA hasta el año 2017 operando, sin un factor de uso. Esto da cuenta del estado al que puede llegar la Pampa del Tamarugal si se opera con lo que ya se encuentra legalmente asignado. La situación del escenario 2 es menos crítico que para el escenario 1, ya que los conos de depresión producto de la extracción de agua de las empresas sanitarias no se desarrollan, pero aun así existe un desembalse importante en el acuífero.

El caudal extraído en el escenario 2 es el 41,33% del extraído en el escenario 1, por tanto, sin importar quien fuese el usuario que deja de extraer la situación futura mejora respecto al escenario 1, reiterando que el desembalse es relación directa de la extracción mediante bombeo, ya que la recarga apenas logra cubrir la evaporación en la zona de los salares, la evapotranspiración de los tamarugos y la salida por el límite sur.

En el escenario 4, en tanto, las extracciones producto del bombeo corresponden a un 160% de las utilizadas en el escenario 1, por lo tanto, los conos de depresión serán más profundos y extensos, producto de caudales mayores extraídos (no se aplica factor de uso) y la

explotación, al ser mayor, produce un desembalse mayor. En la Figura 8-28, la imagen de la derecha muestra el peor de los escenarios modelados, con los tamarugos del sector de Pintados extintos casi en su totalidad, en caso que no sean regados con recursos externos al modelo estudiado, sobreviviendo sólo los de la zona de Bellavista.

Figura 8-28 Comparación Profundidad del nivel piezométrico situación CFT E2 año 2074 vs CFT E4 año 2074.



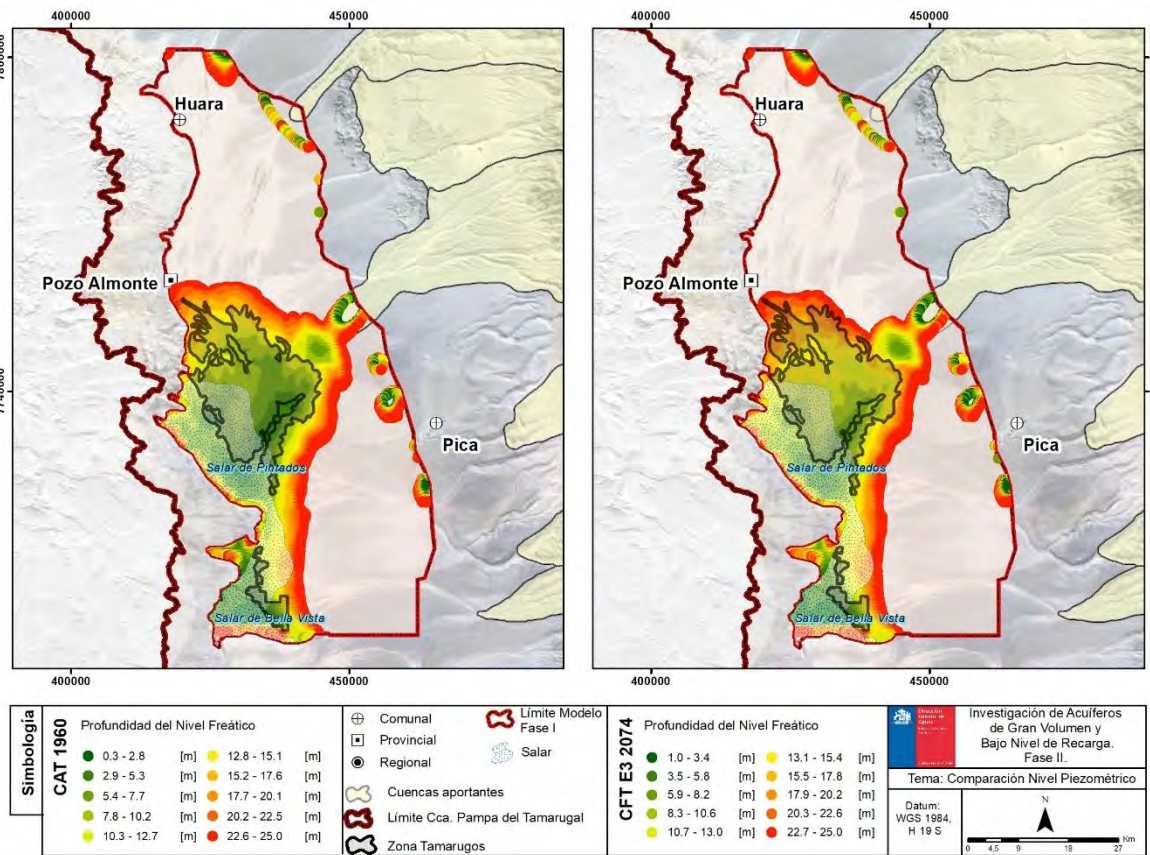
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8-29 se compara la condición natural del modelo CAT 1960 con la situación final para el escenario 3 (modelo predictivo CFT E3 para el año 2074). La intención de comparar estos resultados tiene que ver con la condición impuesta en el escenario 3, tal como se mencionó en la descripción de los escenarios, el caudal de extracciones producto del bombeo se lleva a cero. Transcurridos 57 años de modelación se esperaría que el acuífero recuperara sus niveles. Tal como lo muestra la figura, esta proyección no se cumple, si bien la situación mejora bastante: los conos de depresión desaparecen, pero no

se recupera el desembalse realizado al acuífero, lo que se observa es una distribución uniforme del descenso del nivel freático.

Con el argumento ya señalado del bajo valor de la recarga y su equilibrio con la evaporación, evapotranspiración y la salida por el límite sur, se puede afirmar que no existe un caudal sostenible de extracción, es decir, el acuífero se encuentra bajo un proceso de desembalse irreversible de no darse situaciones muy poco probables de darse en el corto o mediano plazo, como es el aumento de la recarga del modelo. Una consecuencia de ello sería la desaparición de los árboles que dan el nombre al acuífero estudiado.

Figura 8-29 Comparación Profundidad del nivel piezométrico situación CAT año 1960 vs CFT E3 año 2074.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se presenta en la Figura 8-30 una comparación entre la situación final para el escenario 5 (modelo predictivo CFT E5 para el 2074) y la situación final para el escenario 6 (modelo predictivo CFT E6 para el año 2074). Esta imagen muestra que la variación anual de la recarga en torno a una media no influye en los resultados de largo plazo y para el

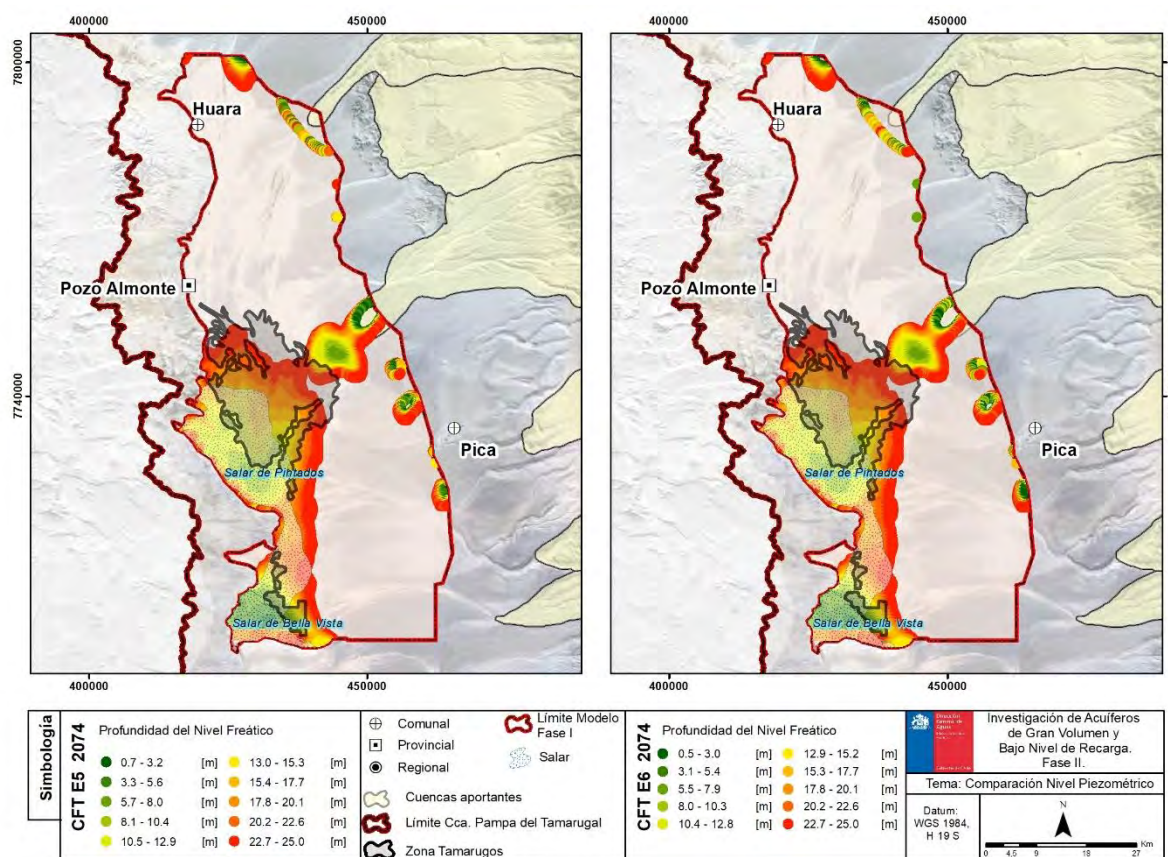
caso específico de este modelo, sólo cambia la variación del almacenamiento a escala anual. Por otra parte, el modelo no es sensible a una disminución del 10% en la recarga, esto se debe a que ese 10% corresponde a 42 l/s, es decir, es equivalente a menos del 2% del total de las extracciones por bombeo.

Con todos los escenarios contrastados se pueden plantear algunas conclusiones:

- la variación anual de la recarga no es relevante en el análisis de largo plazo,
- la variación de un 10% o un 20% e incluso un 30% en la recarga no serán relevantes en los efectos de largo plazo, ya que son una porción muy pequeña del caudal total de extracciones por bombeo.

La sobreexplotación realizada al acuífero de la Pampa del Tamarugal es de carácter irreversible y nos encontramos frente a un minado del acuífero. No existe un caudal mínimo sostenible. Por último, el parámetro dominante del fenómeno en estudio son las extracciones producto del bombeo, las que se recomienda reducir lo más posible debido a lo irreversible del minado.

Figura 8-30 Comparación Profundidad del nivel piezométrico situación CFT E5 año 2074 vs CFT E6 año 2074.

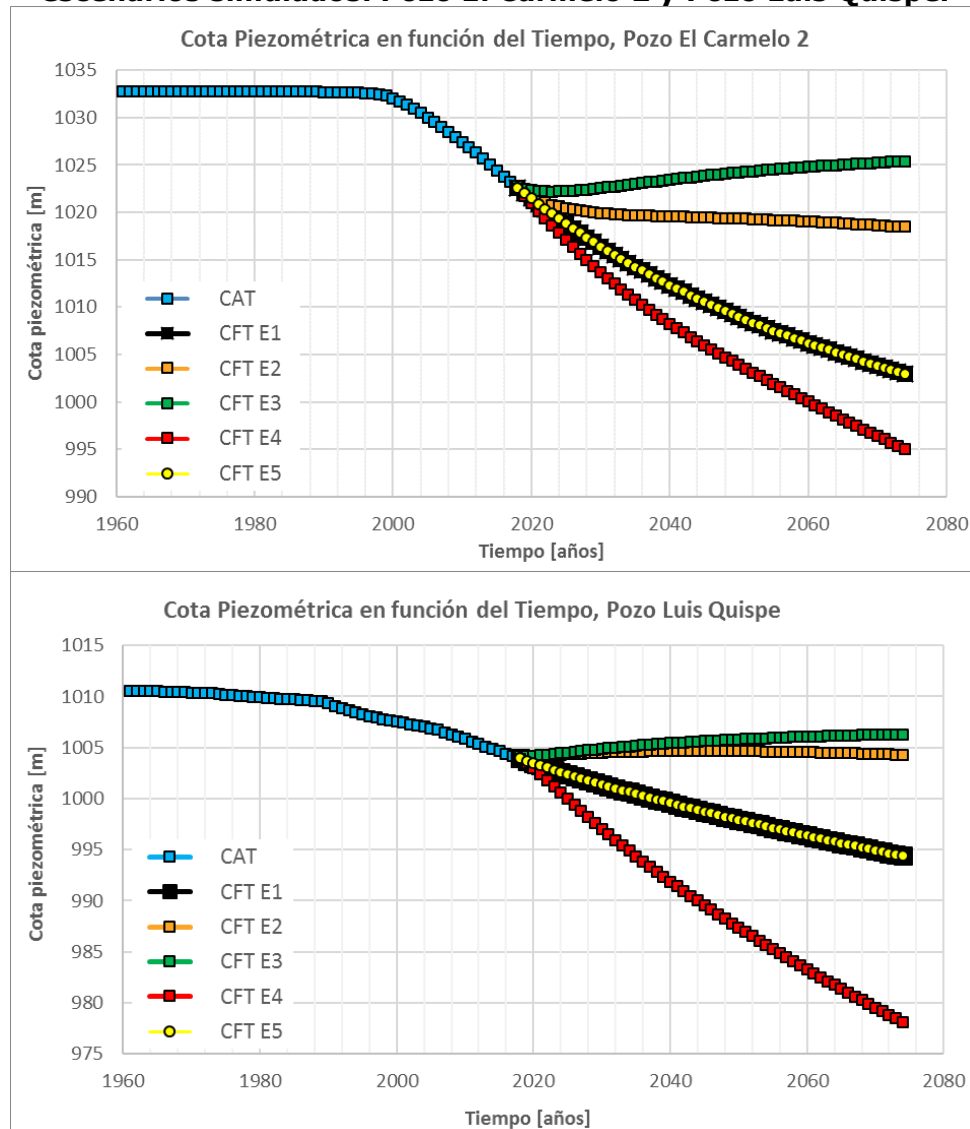


Fuente: Elaboración propia

Para complementar el análisis se muestra un set de gráficos de niveles piezométricos en función del tiempo para una serie de pozos. En cada figura se muestra la situación actual y 5 de los 6 escenarios proyectados. Se descarta mostrar el escenario 6 (CFT E6) ya que los resultados son los mismos que en el Escenario 1 (CFT E1). Incluso los gráficos mostrarán la similitud entre el escenario 1 (CFT E1) y el escenario 5 (CFT E5). Las observaciones se separan en 5 grupos, el primero corresponde a los pozos dentro del radio de influencia de los conos de depresión producto de la explotación de agua para uso sanitario. En el segundo grupo se muestra los pozos que por ubicación geográfica podrían estar influenciados por la explotación en la zona de El Carmelo. En tercer lugar, se muestra un par de pozos que por ubicación geográfica podrían estar influenciados por la extracción en el sector de Canchones. En cuarto lugar, se muestra un par de pozos ubicado en el sector del Salar bellavista, sujetos a la condición de borde de altura conocida en el límite sur y alejado de los sectores de explotación para el uso sanitario y, por último, se muestra un pozo en el sector del Salar de Pintados, muy cercano a una explotación minera de gran magnitud.

En la Figura 8-31 se aprecia que la principal fuente de descenso en estos pozos de observación corresponde a la extracción sanitaria, el argumento para afirmar esto la diferencia del comportamiento de los niveles entre los escenarios E1, E2 y E3. Se observa que cuando las sanitarias dejan de extraer caudal (E2 en color naranja) los niveles disminuyen notablemente su descenso y se comportan de forma bastante similar al escenario E3 en donde no existe ninguna extracción. Se puede afirmar que los descensos en el pozo Luis Quispe corresponden casi en su totalidad a la extracción sanitaria, en cambio en el sector de El Carmelo existe también una importante extracción asociada a otros usos.

Figura 8-31 Niveles Piezométricos en función del tiempo para 5 de los escenarios simulados. Pozo El Carmelo 2 y Pozo Luis Quispe.



Fuente: Elaboración propia

Es interesante destacar que, para la situación final, la diferencia de niveles entre el escenario E2 y el E1 es del orden de 15 metros para el pozo Carmelo 2 y del orden de 10 metros para el pozo Luis Quispe. En otras palabras, en las zonas de explotación intensiva se esperan descensos mucho mayores al promedio del resto de la Pampa del Tamarugal, esto se traduce en un problema muy grande, ya que la única zona somera de la Pampa del Tamarugal, corresponde a la zona de salares y donde se encuentran las plantaciones de tamarugos, en consecuencia, son los lugares más atractivos económicamente para bombear agua, pero la demanda para agua potable y el uso minero proyectado generarán

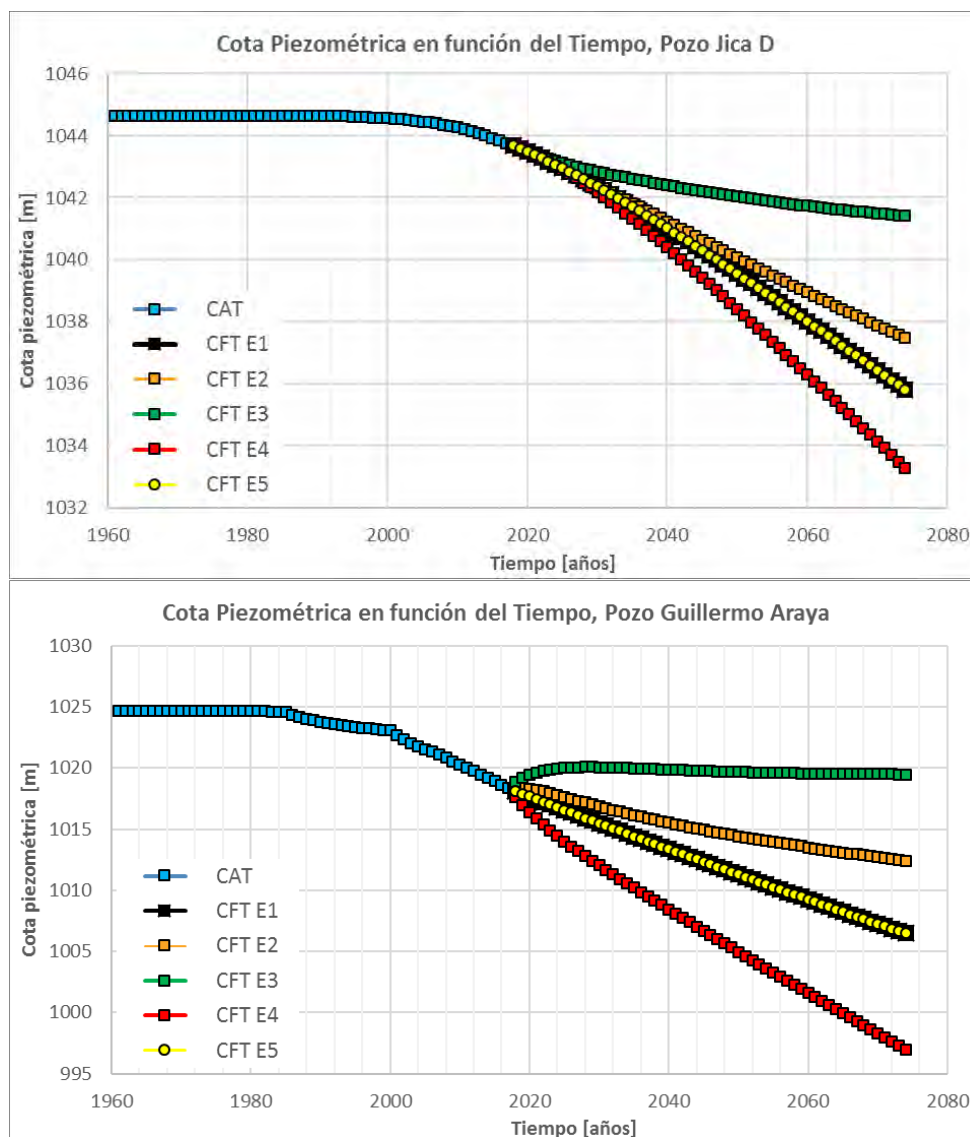
el desarrollo de grandes conos de depresión, lo que producirá la extinción de los tamarugos y terminará con la formación natural de los salares.

En la Figura 8-32 se muestra la evolución de los niveles modelados para los distintos escenarios, para el pozo Jica D, ubicado alrededor de 16 km en dirección norponiente del pozo El Carmelo 2. Los efectos del cono de depresión ya no se aprecian a esta distancia, la diferencia de nivel piezométrico al final de la modelación es del orden de 2 metros entre el escenario E2 y E1 es del orden de 2 metros, correspondiente a la diferencia de un descenso global de la Pampa del Tamarugal producto de la diferencia en el caudal de extracción por bombeo.

El pozo Guillermo Araya en tanto, ubicado aproximadamente a 8 km en la dirección surponiente del pozo El Carmelo 2 presenta una diferencia en niveles piezométricos para la situación final de la modelación es del orden de 5 metros entre el escenario E2 y E1. Se observa que además de estar dentro del radio de influencia de las extracciones sanitarias, se encuentra dentro del radio de influencia de una extracción de otro tipo con un caudal importante y mucho más cercana que las explotaciones sanitarias, esto se puede afirmar por la forma de los niveles en el escenario E3 (línea de color verde). Como información adicional el pozo Guillermo Araya se encuentra a una distancia aproximada de 16 km del pozo Luis Quispe, por lo que se debe considerar el principio de superposición lineal para los efectos de pozos de bombeo en el nivel de las aguas subterráneas al momento del análisis, es decir, existe una alta probabilidad que su descenso proyectado sea multifactorial.

Para todos los casos presentados el escenario E3 es el más favorable (algo obvio ya que no existen extracciones por bombeo), luego viene el escenario E2 (en donde las sanitarias no realizan extracciones, no se generan conos de depresión de gran magnitud, pero lo más importante, los caudales de bombeo se reducen a menos de la mitad que en el escenario 1), en tercer lugar, el escenario E1 (con la situación tal y como se presume es en el año 2017) que es prácticamente igual al E5 y finalmente como es de esperarse el peor de los casos cuando todos los derechos asignados por la DGA son extraídos del acuífero, sin considerar factor de uso.

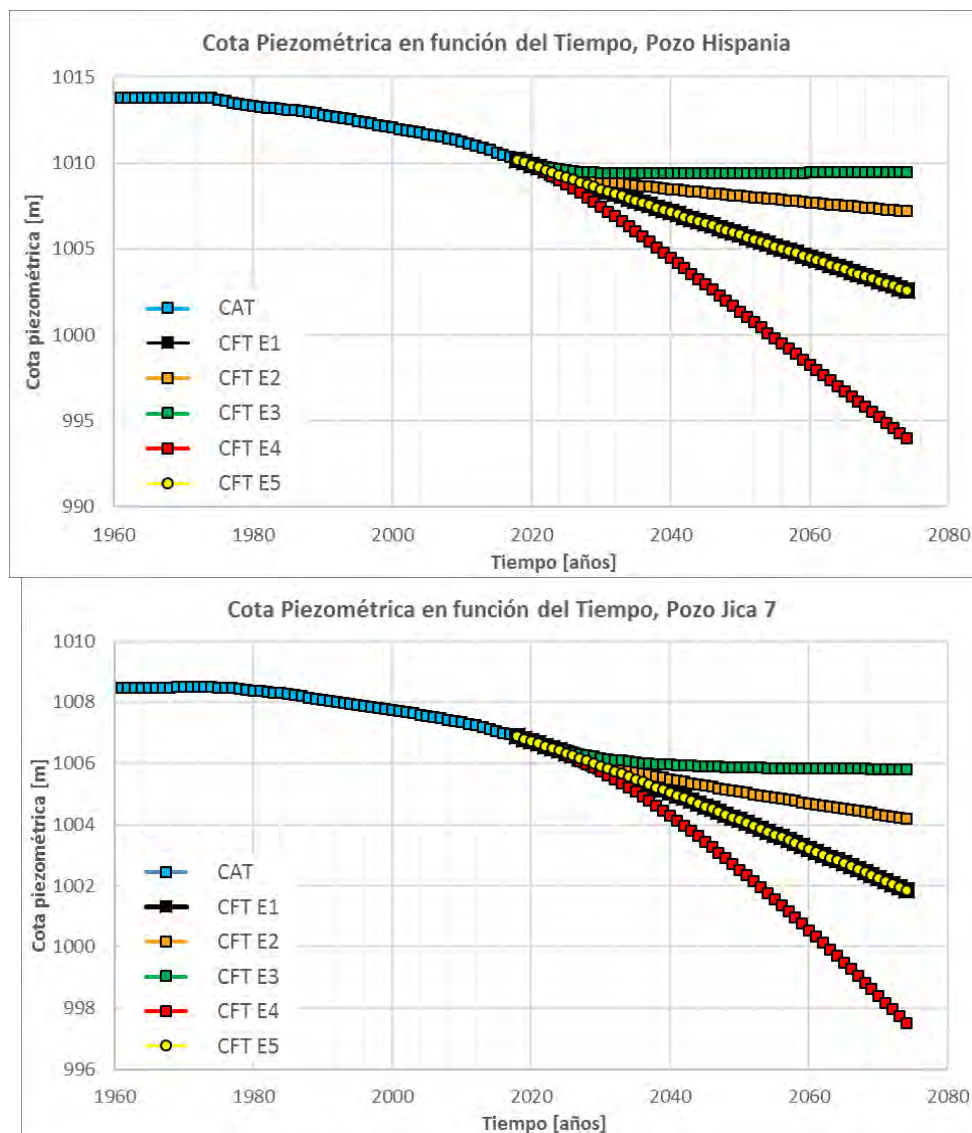
Figura 8-32 Niveles Piezométricos en función del tiempo para 5 de los escenarios simulados. Pozo Jica D y Pozo Guillermo Araya.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8-33 se presenta los niveles piezométricos en función del tiempo para el pozo Hispania y el pozo Jica 7. Estos se encuentran a una distancia de 8 y 10 km en dirección norponiente y surponiente respectivamente. La intención de esta figura es similar a la anterior, se observa una influencia producto de la extracción sanitaria, pero más asociada a la disminución del caudal total de extracción por bombeo, que, por encontrarse dentro del radio de influencia del cono de depresión, por lo demás se encuentran en una zona de alta demanda evapotranspirativa. Se debe tener en consideración que los descensos producto del bombeo disminuyen logarítmicamente en función de la distancia (radial en el caso ideal), superpuestos linealmente con el gradiente del flujo regional.

Figura 8-33 Niveles Piezométricos en función del tiempo para 5 de los escenarios simulados. Pozo Hispania y Pozo Jica 7.

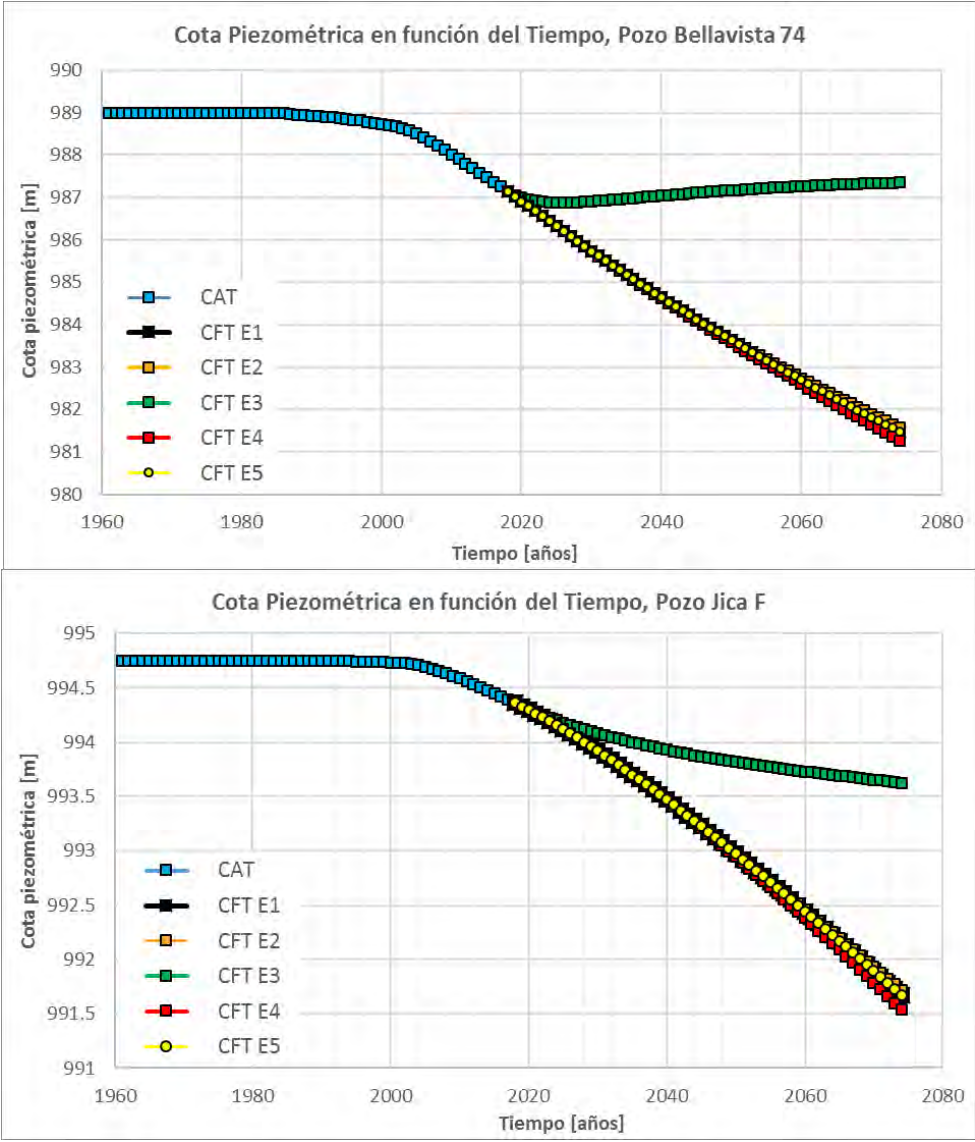


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 8-34 se muestran los niveles piezométricos para los 5 escenarios ya señalados en función del tiempo para el pozo Bellavista 74 y el pozo Jica F. Lo interesante de esta figura, es que a simple vista se nota lo insensible que es la cota piezométrica a todos los escenarios, con excepción del E3. Lo anterior indica que no se encuentra influenciada por las extracciones sanitarias, ni de forma local (desarrollo de conos de depresión), ni de manera global (descenso global producto de desembalse a raíz de grandes extracciones por bombeo). Es importante monitorear esta zona, que si bien se encuentra rodeada por pared impermeable y corresponde a la zona que alguna vez fue la de afloramiento natural de la Pampa del Tamarugal, puede haber otros motivos de esta invariabilidad en el tiempo, uno

de ellos es su cercanía a la condición de altura constante, el segundo es la piezometría oriente – poniente producto de la recarga constante y un tercero es su posible cercanía a una extracción y encontrarse dominada por una gran extracción distinta a la sanitaria. Es interesante verificar por qué esta zona no se ve beneficiada con el cese de funcionamiento de las extracciones del tipo sanitario.

Figura 8-34 Niveles Piezométricos en función del tiempo para 5 de los escenarios simulados. Pozo Bellavista 74 y Pozo Jica F.

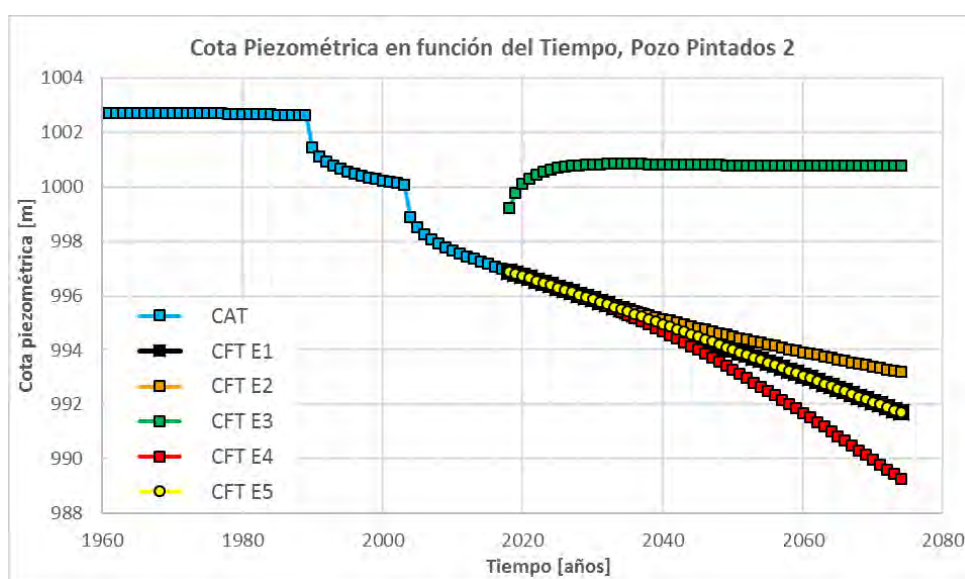


Fuente: Elaboración propia

Por último, en la Figura 8-35 se muestra el comportamiento de los niveles piezométricos en función del tiempo para el pozo Pintados 2, el que se encuentra a menos de 800 metros

de una extracción importante (70 l/s en un principio y 140 l/s luego). El pozo mide prácticamente niveles dinámicos, al activar el bombeo tiene un descenso bastante rápido (casi discontinuo) para luego tener un descenso sostenido en función del tiempo, esto ocurre en ambas ocasiones en que se activa el caudal de extracción. En la figura se observa la baja influencia de los caudales de extracción producto del bombeo sanitario, pero a diferencia de la figura anterior si existe este efecto. Por otro lado, al dejar de operar todos los pozos (escenario E3, color verde) ocurre un rápido ascenso discontinuo producto de la cercanía del pozo de observación con el de extracción, para luego recuperar logarítmicamente los niveles y mantener el equilibrio.

Figura 8-35 Niveles Piezométricos en función del tiempo para 5 de los escenarios simulados. Pozo Pintados 2.



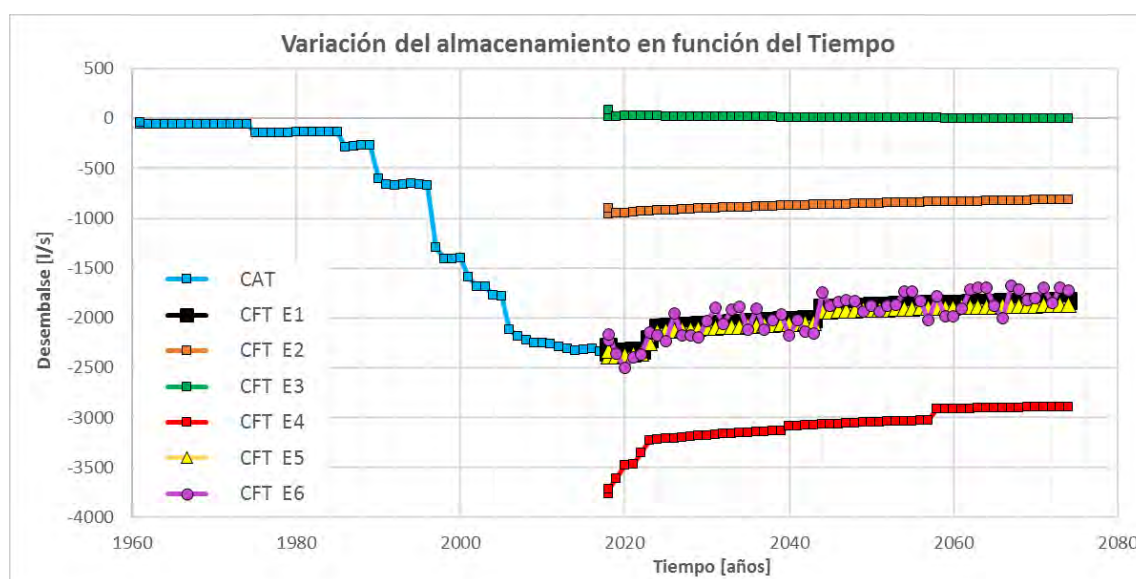
Fuente: Elaboración propia

Como elemento adicional de análisis en la Figura 8-36 se muestra la variación del almacenamiento en función del tiempo, tanto para el modelo CAT, como para los 6 escenarios de modelación propuestos. Se observa que para el escenario E3, en donde no existen extracciones producto del bombeo, la variación del almacenamiento es cercana a cero, este escenario correspondería a una extracción sostenible y conservadora.

Para todos los casos la variación del almacenamiento (en l/s en la figura) será del orden del total de los caudales de extracción producto del bombeo. Se aprecia también que los escenarios E1, E5 y E6 son bastante similares, con este resultado se verifica que la variación de la recarga a escala anual solamente produce una oscilación en torno al comportamiento

de una recarga media constante. La diferencia producto de una variación en un 10% en la recarga corresponde a un cambio del orden del 2% en los caudales de bombeo, por lo tanto, afecta en ese mismo orden de magnitud a la variación del almacenamiento.

Figura 8-36 Variación del almacenamiento en función del tiempo para todos los escenarios modelados.



Fuente: Elaboración propia

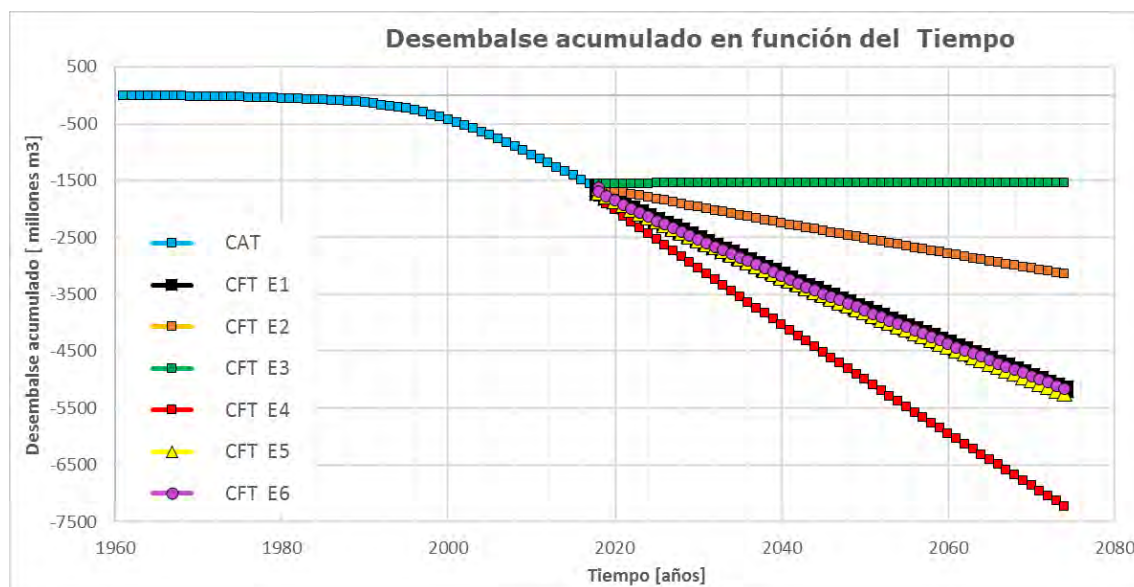
En la Figura 8-37 se muestra la variación del almacenamiento acumulada (desembalse acumulado en millones de metros cúbicos) en función del tiempo, se aprecia de forma clara como los desembalses importantes comienzan en la década del 90, esto coincide con el momento en que la variación del almacenamiento sobrepasa la barrera de los -500 l/s.

Para los escenarios en que el caudal no se disminuye a cero, se observa que la pendiente de la recta producida para los escenarios modelados, producto de simular escenarios con condiciones prácticamente constantes difiere bastante. En particular la pendiente del escenario E4 (peor de los casos en color rojo) es 1,5 veces mayor que el escenario E1 (en color negro, escenario conservador, teniendo en cuenta que no plantea aumento de demanda ni disminución en la recarga y que se comporta de la misma forma que el E5 y E6) y es 3,5 veces superior a la del escenario E2 (color naranja y sin extracciones para uso sanitario).

Esta diferencia se traduce que, para el estado final de modelación, correspondiente al año 2074, la diferencia del desembalse acumulado entre un escenario y otro (agrupando el

escenario E1, E5 y E6 en un solo escenario) es del orden de 2.000 millones de metros cúbicos de agua.

Figura 8-37 Variación del almacenamiento acumulada (desembalse acumulado) en función del tiempo para todos los escenarios modelados.



Fuente: Elaboración propia

En el Cuadro 8-10 se presenta la tasa de descenso de los niveles freáticos en el tiempo para una serie de pozos seleccionados. Se presentan los resultados para todos los escenarios simulados, además de un valor mínimo, máximo y promedio para cada uno de los escenarios. Si se continúa con el escenario actual de extracción durante todo el periodo de simulación (escenario E1) se espera una tasa promedio de descenso de la napa del orden de 15 cm/año, mientras que en el escenario en el que se extrae un caudal equivalente a todos los derechos de aguas asignados (escenario E4), la tasa de descenso promedio de los niveles freáticos asciende a 25 cm/año.

Las mayores tasas de descenso esperadas corresponden a las de los pozos El Carmelo 2 y Luis Quispe, ambas en el escenario E4. Esto producto que se encuentran en la superficie de influencia del cono de depresión producida por las zonas de extracción intensiva. Asimismo, las menores tasas de descenso, corresponden a tasas de recuperación, ambas en el escenario E3 y consistentemente en los pozos El Carmelo 2 y Luis Quispe. Lo último corresponde a la recuperación de niveles freáticos en la zona del cono de depresión.

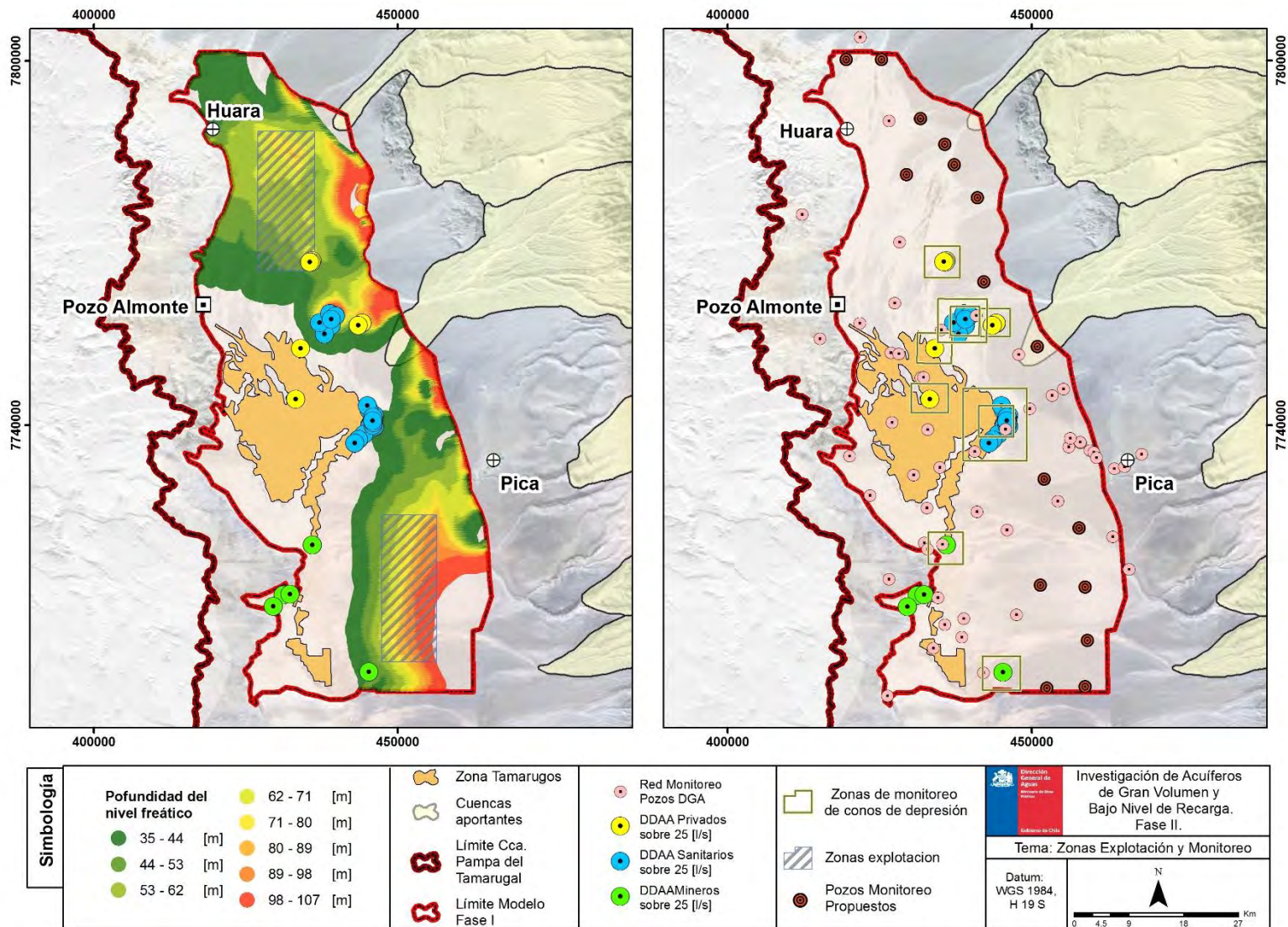
Cuadro 8-10 Tasa de descenso de niveles freáticos en los 6 escenarios de modelación para pozos analizados .

Pozo	Tasa de descenso [m/año]					
	Escenarios					
	CFT E1	CFT E2	CFT E3	CFT E4	CFT E5	CFT E6
El Carmelo 2	-0,345	-0,050	0,063	-0,474	-0,345	-0,345
Luis Quispe	-0,169	0,003	0,040	-0,462	-0,169	-0,169
Jica D	-0,143	-0,113	-0,038	-0,191	-0,143	-0,143
Hispania	-0,134	-0,048	-0,006	-0,298	-0,134	-0,134
Guillermo Araya	-0,208	-0,111	-0,005	-0,357	-0,208	-0,208
Jica 7	-0,090	-0,046	-0,016	-0,170	-0,090	-0,090
Bellavista 74	-0,101	-0,100	0,008	-0,105	-0,101	-0,101
Jica F	-0,049	-0,049	-0,012	-0,051	-0,049	-0,049
Pintados 2	-0,093	-0,066	0,009	-0,137	-0,093	-0,093
Mínimo	-0,049	0,003	0,063	-0,051	-0,049	-0,049
Máximo	-0,345	-0,113	-0,038	-0,474	-0,345	-0,345
Promedio	-0,148	-0,064	0,005	-0,249	-0,148	-0,148

Fuente: Elaboración propia

Figura 8-38

Zonas de explotación y de Monitoreo propuestas.



Fuente: Elaboración propia

9 Capacitación a Funcionarios de la DGA

Se desarrollaron capacitaciones a nivel Central y en Región, ambas en dependencias de la DGA, los asistentes fueron funcionarios de la DGA.

La capacitación fue de carácter teórico – práctico, con dos módulos expositivos estilo cátedra y uno práctico enfocado en la creación de un modelo básico en VMOD Classic. Los contenidos corresponden a introducción a la hidrogeología e hidráulica de aguas subterráneas, conocimientos básicos de modelación numérica; introducción al software, su interfaz gráfica e infraestructura de archivos; en el último módulo se combina lo teórico y lo práctico para abordar el contexto de la Pampa del Tamarugal, el modelo conceptual utilizado, el modelo numérico realizado, funcionamiento y uso de PEST como herramienta complementaria y el uso de Python como herramienta complementaria.

Con respecto a la estación meteorológica, se realizó un módulo expositivo sobre su ubicación, características, parámetros que mide, la configuración utilizada, la instrumentación que posee con sus respectivos detalles técnicos y se comentó sobre su mantención. Además, se realizó la entrega en región y una visita a terreno acompañados del director de la DGA Región de Tarapacá.

En el Anexo I, se presenta el programa de la capacitación, la lista de asistentes y fotografías del curso desarrollado.

10 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

10.1 Introducción

A continuación, se presenta la descripción técnica y metodológica del Sistema de Información Geográfica, en adelante SIG, construido para el estudio "Investigación De Acuíferos De Gran Volumen Y Bajo Nivel De Recarga, Fase II." Este SIG permite almacenar, gestionar, actualizar, visualizar y representar los resultados de la revisión bibliográfica de las componentes requeridas, la caracterización hidrológica a nivel de la Cuenca Pampa del Tamarugal, y las subcuencas contenidas y tributarias cercanas, entre otras.

10.2 Objetivo

"Construir un Sistema de Información Geográfica (SIG) que contenga y estructure de una forma lógica tanto la información de carácter espacial que se recopiló en la fase de gabinete, como también, la información generada en la fase de levantamiento en terreno, modelación y elaboración de resultados".

Con la finalidad de hacer de este SIG un conjunto robusto de información consolidada y pertinente al objetivo del estudio, se pretende incorporar toda la información secundaria relevante, recopilada y factible de ser espacializada, y que constituya antecedente relativo al área de estudio de naturaleza hidrológica, geológica, hidrogeológica, geomorfológica, geofísica, de uso, gestión y monitoreo del recurso hídrico superficial y subterráneo, infraestructura asociada, suelo (de carácter Bidimensional).

10.3 Materiales

Sobre la Estructura de Datos: se utilizará como Estructura de Datos una "File Geodatabase" (.gdb), que permite contener datos en formatos y lenguajes diversos (raster, vector, tablas), con relaciones topológicas, junto a librerías o catálogos, que permitan la interacción con gestores de Bases de Datos, la importación-exportación desde y hacia distintos entornos, así como la utilización de rutinas y programaciones (geoprocesos), así como el despliegue y salida de productos para la presentación de resultados.

Sobre el Software necesario: Se utiliza ArcGis 10.2© (Esri) en su versión Desktop ArcInfo.

Los requisitos de Software ya han sido declarados en puntos anteriores, que manejarán datos e información geográfica en el Sistema de Coordenadas y Elipsoide de Referencia WGS 84, Huso 19 Sur, Proyección UTM.

10.4 Características

Todo Sistema de Información debe ser eficiente en el manejo, edición, despliegue, consulta y salida de datos, mediante una estructura relacional robusta y lógica. el diseño metodológico debe ser flexible e iterativo y, de esta manera, permitir representar distintos escenarios y elementos de acuerdo a los resultados esperados. recogiendo las sugerencias provenientes de documentos y/o guías (públicos y reconocidos) -que buscan establecer criterios y procedimientos para el tratamiento y despliegue de la información geográfica este sistema de información debe cumplir con los principios de replicabilidad (en condiciones de acceso igualitario a la información), adaptabilidad (vertical y horizontal con otros sistemas o infraestructuras de datos), trazabilidad y seguimiento (de procedimientos y manejo de la información), accesibilidad (minimizar asimetrías o brechas en el conocimiento técnico necesario para su uso).

10.5 Actividades

- Identificación de toda información secundaria disponible, de acuerdo a los requerimientos mínimos (contenidos) y fuentes a considerar (instituciones privadas y públicas).
- Delimitación del área de estudio mediante geoprosos (superposición, intersección, corte, álgebra de mapas) en ambiente ArcMap 10.2.
- Revisión y filtrado de Información Secundaria disponible, para discriminar aquella que es factible y apta para ser representada en un Sistema de Coordenadas (x,y,z). (Filtro 1).
- Diseño de la geodatabase (.gdb) en ambiente ArcCatalog 10.2 considerando geometrías (puntuales, areales, lineales), formatos de escrituras de las entidades (raster, vector, tabla), atributos de las BD asociadas, relaciones espaciales y reglas de representación (topologías).
- Normalización de BD disponibles. Ajuste por geoprosos (proyección, reproyección, conversión desde otros formatos nativos).
- Diseño de visualización en ArcMap 10.2 y composición de salida gráfica (Layout).
- Elaboración de informe final y respaldos digitales de entregables.

10.6 Estructura del Directorio SIG

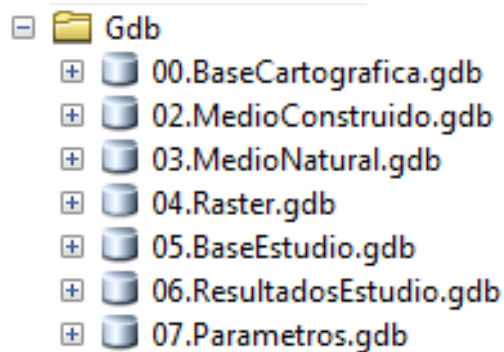
La estructura del Directorio entregado consta de 3 ámbitos:



Una carpeta denominada "Salidas": Para el estudio se ha sistematizado la información en varios proyectos temáticos, obteniendo figuras o mapas correspondientes a las diferentes variables evaluadas. El producto cartográfico comprende a su vez, un diseño y formato que se ajustó a las normas de publicación, incluyendo simbologías básicas y temáticas, ubicación relativa local y nacional, así como el resto de elementos propios de un mapa: escala gráfica y numérica, cuadrícula, orientación norte, título y fuente.

Una segunda carpeta, denominada **"Proyectos": esta carpeta contiene la información** organizada en proyectos de extensión .mxd archivos nativos de la interfase ArcMap, software ArcGis. Cada proyecto .mxd es el correlato editable de cada una de las figuras o mapas contenidos en el informe y los nombres de los mismos, guardan similitud asociativa.

Una tercera y última carpeta, denominada "GDB": acá se encuentra almacenada la Geodatabase que, como se explicó anteriormente, corresponde al tipo de estructura de datos escogida para almacenar la información espacial recopilada, consolidada y elaborada en el transcurso de este estudio.



La información relativa al SIG se encuentra en Anexo digital.

11 ACTIVIDADES DESARROLLADAS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

11.1 Actividades Desarrolladas

11.1.1 Caracterización Hidrogeológica

- Se efectuó una campaña de terreno catastrando 51 pozos en el área del estudio, midiendo niveles freáticos en 48 de ellos. Se constató la depresión de niveles en sectores de alta explotación de aguas subterráneas.
- Se definieron y materializaron 3 Sondajes para la implementación de Pozos de Monitoreo (S-1, S-2 y S-3) totalizando 150m totales de perforación, dado que la roca fundamental (impermeable) se alcanzó a profundidades menores a lo originalmente planificado.
- Se constata, a partir de los resultados obtenidos de las perforaciones (S-1 a S-3), que no se presenta un flujo subterráneo permanente que recargue desde la quebrada Aroma hacia la Pampa del Tamarugal

11.1.2 Caracterización Hidrológica

- Se identificaron las principales cuencas aportantes (Quebradas Principales).
- Se efectuó un detallado estudio hidrológico que permitió determinar, mediante relaciones de precipitación escorrentía y métodos indirectos, los caudales medios y caudales máximos de crecidas para cada una de las 6 cuencas que tributan a la Pampa del Tamarugal.
- Se construyó e implementó una completa estación meteorológica satelital de transmisión en tiempo real en la zona alta de la cuenca de la Quebrada Chacarillas (Estación Quebrada Caya). De esta forma se logrará monitorear las principales variables meteorológicas del sector sur de la Pampa del Tamarugal, zona que no se encontraba cubierta por la red hidrometeorológica de la DGA. Esta estación transmite cada 1 hora, variables almacenadas cada 30 min, asociadas a temperatura, velocidad y dirección del viento, humedad, presión atmosférica, radiación solar, precipitación instantánea, precipitación acumulada líquida y sólida,

11.1.3 Implementación de Modelo Numérico Hidrogeológico de la Pampa del Tamarugal

- Se identificaron las quebradas aportantes al modelo y se propuso una metodología para estimar los caudales medios anuales y la recarga media estimada.
- Para el cálculo de la recarga, en primer lugar, se estimó la recarga en la quebrada de Tarapacá y se trabajó bajo el supuesto de que el resto de las cuencas infiltran al acuífero de forma similar. Finalmente, se estimó una recarga menor y se rectificaron los caudales de bombeo propuestos en estudios anteriores (DGA, 2016).
- Para las unidades hidrogeológicas, se propuso una zonificación distinta a la propuesta por las exploraciones geológicas para la distribución de la conductividad hidráulica, esto debido a que el basamento rocoso utilizado en esas exploraciones no coincide con la interfaz entre unidades permeables e impermeables; por otra parte, el modelo propuesto es de una sola capa en la vertical, por lo tanto, la conductividad hidráulica corresponde a una propiedad **promediada en la vertical. Se propone entender el K del modelo como un K' que** corrige este componente (propiedad promediada en la vertical y gradiente hidráulico real).
- Tras realizar un análisis crítico del modelo anterior, se modificaron algunos supuestos del modelo conceptual y se implementó satisfactoriamente un nuevo modelo numérico, con una malla de elementos más pequeños que en el modelo anterior, lo que permitió realizar un estudio más detallado.
- Se consideró un modelo no lineal para la evaporación y otro para la evapotranspiración, se implementaron ambos correctamente con el módulo ETS del solver MODFLOW 2000.
- Se caracterizaron espacial y temporalmente los DAA asignados por la DGA, se identificó el tipo de uso y la producción media en las plantas de agua potable de las empresas sanitarias en la zona.
- Se identificaron las zonas de estrés hídrico de la Pampa del Tamarugal, ubicando espacialmente extracciones sobre 8 l/s (extracciones intensivas).
- Se calibró satisfactoriamente el modelo en régimen permanente utilizando 43 pozos de observación distribuidos en el dominio del modelo. Se alcanzó un RMS normalizado de 0,85%, porcentaje mucho menor que el recomendado por la **"Guía para el uso de modelos de aguas subterráneas en el SEIA"**, que indica

que debe ser menor al 5%. Por otro lado, el porcentaje de error en el balance de masas correspondió al 0,1%

- Una vez construido el modelo en régimen permanente, se construyó el modelo correspondiente al régimen transiente entre los años 1961 y 2017, se calibró satisfactoriamente utilizando los 38 pozos de observación de la red DGA con mayor cantidad de registros. Se obtuvo un RMS normalizado 1,8% para todos los pasos de tiempo modelados. El error asociado al balance de masas fue de 0,001%.
- Se implementó satisfactoriamente un modelo de simulación de escenarios futuros, en base al modelo transiente calibrado. Se proyectaron 6 escenarios futuros que pueden permitir la discusión de distintos análisis e hipótesis. Un ejemplo de esto es la afirmación de que trabajar con una recarga promedio produce el mismo efecto a largo plazo que una recarga variable a escala anual en torno al mismo promedio.
- En el escenario más desfavorable de los estudiados, se esperaría que dentro de 50 años en la Pampa del Tamarugal se registre un descenso promedio general del nivel freático del orden de los 12 m.

11.1.4 Elaboración de un SIG

- Se elaboró un completo Sistema de Información geográfica (SIG), que permite presentar en detalle los resultados de este estudio.
- Se han recopilado bases de datos, coberturas y mapas que conforman la estructura del SIG desarrollado.

11.2 Conclusiones

- Los resultados del estudio son consistentes e indican que el acuífero está sometido a una explotación intensiva no sostenible, dado que las extracciones, asociadas a los derechos de agua otorgados, son un orden de magnitud mayor que la recarga global estimada del acuífero.
- El cálculo de la evapotranspiración de los tamarugos corresponde a una brecha de información a cubrir, existe bastante bibliografía al respecto, pero desde el enfoque agronómico y no desde el enfoque de un balance hídrico, es decir, se concentra en descripciones de la especie, índices de vida o mecanismos de succión y no a la demanda evapotranspirativa en particular; no se encuentra un valor de

evapotranspiración potencial asociada al cultivo o experimentaciones realizadas con lisímetros o instrumentos similares.

- Desde el punto de vista del balance hídrico enfocado en la producción de aguas subterráneas, no aparece recomendable la reforestación de tamarugos, realizada hace algún tiempo, ya que el aumento de ejemplares genera un aumento de la descarga del acuífero, en detrimento de la explotación de aguas subterráneas (mucho menor a las extracciones actuales, pero si importante en la época en que se realizó). Si bien en la época que se propuso esta iniciativa no existían las herramientas adecuadas para esta toma de decisiones, la ubicación espacial en donde se realizó la reforestación también aparece como no recomendable, pues se plantaron los nuevos tamarugos en sectores en los que el nivel freático se profundiza en forma natural, tendencia que se acentúa debido a la producción de agua potable.
- Las tasas medidas y las calculadas de descenso de los niveles del agua subterránea no son homogéneas en el dominio del modelo, es decir, hay sectores con tasas mayores (en especial en los radios de influencia de los conos de depresión que producen las extracciones de gran caudal), zonas de menor variación (en particular en las zonas cercanas a las condiciones de contorno, esto es, abanicos de recarga de las quebradas y condición de altura conocida impuesta en el modelo) y las zonas que representan el descenso generalizado de la Pampa del Tamarugal.
- Por las condiciones particulares del acuífero, la variación del almacenamiento en el tiempo se encuentra determinada principalmente por el caudal de extracción por bombeo, por lo que los resultados de los distintos escenarios quedan notoriamente sujetos a la variable bombeo por sobre cualquier otra.
- Los resultados de la simulación de escenarios futuros realizada mediante el modelo numérico implementado, en los que, o bien se mantiene la situación actual de explotación, o bien, se extrae un caudal igual a todos los derechos de aguas asignados a la fecha, entregan como resultado un descenso sostenido del acuífero y un desarrollo de importantes conos de depresión en las zonas de explotación intensiva. Esto provocará un descenso de los niveles freáticos, lo que impactaría en primera instancia los pozos menos profundos (usuarios agrícolas), y afectaría las zonas de niveles someros donde se encuentran los tamarugos, provocando una pérdida de cobertura vegetal irreversible en el contexto de los escenarios simulados.
- Se confirmó que, en el contexto de los escenarios futuros simulados, el descenso de los niveles del agua subterránea del acuífero de la Pampa del Tamarugal es irreversible, dado que las extracciones de ese recurso sobrepasan las recargas. Asimismo, se constató que la variable que domina el descenso de niveles

corresponde a las extracciones por bombeo, las que son un orden de magnitud mayor a la recarga, a la evaporación, a la evapotranspiración y al caudal de salida por el límite sur; es decir, se extrae al menos 7 veces más aguas subterráneas de lo que ingresa al acuífero como recarga.

- Toda reducción en la extracción de agua mediante el bombeo es una mejora a la situación actual y futura. Para mejorar la situación futura de las zonas someras sin tener que disminuir la explotación, se propone trasladar las zonas de extracción intensiva a lugares donde los conos de depresión no afecten los niveles someros como lo hacen en la actualidad. Lo anterior implica trasladar estas extracciones a las zonas alejadas de los abanicos de las quebradas y de las zonas someras, por tanto, los lugares disponibles tendrán el espejo de agua a mayor profundidad que en la actualidad.
- Los resultados de la variación del 10% en el valor de la recarga es equivalente a la variación del 2% en el caudal de extracción por bombeo para el escenario E1, esto se traduce en que los efectos de aumentar un 50% la recarga es equivalente a disminuir un 10% los caudales de extracción de bombeo. Y si bien es muy importante determinar la recarga del acuífero, las extracciones por bombeo dominan el comportamiento del acuífero.
- En cuanto al volumen de desembalse acumulado, continuar la explotación tal como ocurre en la situación actual (Escenario E1) durante 57 años, produciría un desembalse mayor del orden de 4.000 Mm³ que el escenario de extracción cero (Escenario E3).
- Si a partir del año 2017 se bombeara un caudal equivalente a todos los derechos de agua asignados al año 2018 (Escenario E4), el desembalse acumulado al final de la modelación es del orden de 7.500 Mm³, es decir, un 136% más que en el escenario de continuar la situación actual (escenario E1).
- Respecto de las tasas de descenso de nivel freático, se determinó que, para el escenario más desfavorable, la tasa de descenso promedio del nivel freático será de 25 cm/año, lo que significa un descenso promedio esperado de al menos 12 metros en los próximos 50 años, 5 metros más que si se continua con la regla de operación actual. Específicamente en el sector de El Carmelo (pozo el Carmelo 2) estos descensos serán mayores, del orden de los 23 m al igual que en el sector de Canchones (pozo Luis Quispe).
- El escenario más favorable de los estudiados, correspondiente al cese de las extracciones sanitarias CFTE2 (en que las empresas sanitarias producirían agua potable mediante la desalación de agua de mar), se esperaba que dentro de 50 años

los descensos promedios fuesen del orden de los 5 m. Se esperaría que, en el sector de El Carmelo, los descensos sean del orden de los 3 m y que en el sector de Canchones sean prácticamente nulos.

- Con respecto a las consecuencias de la actividad minera, en el sector del Salar de Pintados se esperan descensos del orden de los 6 m (pozo Pintados 2) y de 5 m en el sector del Salar Bellavista (pozo Bellavista 74), en los escenarios en donde estas extracciones no existen, los descensos se reducen a cero.

11.3 Recomendaciones

11.3.1 Recomendaciones Técnicas

- Si bien el enfoque principal tiene que ver con la gestión, se propone instalar estaciones meteorológicas y fluviométricas en las quebradas aportantes, que permitan registrar tanto condiciones medias como eventos extremos. Las condiciones medias permitirán alimentar modelos con datos suficientes en cantidad y calidad, dimensionando con mayor precisión el aporte de las quebradas tributarias a la recarga del acuífero de la Pampa del Tamarugal. La medición de los eventos extremos y el monitoreo de las precipitaciones en tiempo real, permitirán a la región implementar un sistema de alerta temprana de efectos aluvionales, e implementar medidas de adaptación a los efectos del cambio climático.
- Con respecto a la modelación de aguas subterráneas, se propone realizar un modelo con estratificación en la vertical y con malla no estructurada, con posibilidad de refinamiento local. Una herramienta de modelación idónea es Groundwater Vistas (GWV) o similar. Se hace la salvedad que los resultados de largo plazo no cambiarían con un nuevo modelo, pero sí permitiría simular escenarios de corto plazo con mayor detalle, analizar operaciones de extracción local, y simular efectos puntuales en los conos de depresión.
- Con respecto a la instrumentación, se recomienda monitoreo de niveles en el perímetro de las zonas de extracción intensivas, que acompañen a la política de control de extracciones. Con respecto al monitoreo de niveles para futuros modelos numéricos, se recomienda instalar pozos de observación a la entrada y a la salida del modelo, como también monitorear el ingreso de caudales en las quebradas (condiciones de entrada y salida e inputs del modelo).
- Se recomienda implementar un monitoreo regular de las extracciones y descensos de las napas, ejerciendo un mayor control y fiscalización por parte de la autoridad en las zonas de extracción intensiva asociada a usuarios sanitarios e industriales.

-
- Se recomienda la instalación de estaciones de monitoreo de niveles piezométricos en las zonas de extracción intensiva (se sugiere realizar el monitoreo de niveles a ritmo mensual o semanal, para inferir las fluctuaciones producto de las reglas operacionales), con el fin de identificar, estudiar y cuantificar los conos de depresión generados producto de la extracción. Asimismo, se recomienda definir puntos de control y de alerta respecto a tasas de descenso.
 - Se propone que la implementación de elementos de monitoreo por parte de privados sea, al menos, un sensor en cada vértice del cuadrilátero inserto en el mapa correspondiente.
 - Adicionalmente, se propone instalar pozos de monitoreo de niveles en los abanicos fluviales de las quebradas para estimar la recarga que ingresa a la Pampa del Tamarugal e investigar como varían las condiciones de contorno del acuífero. También se propuso mejorar el monitoreo en la salida hacia el salar Sur Viejo, para conocer apropiadamente todas las condiciones de borde.

11.3.2 Recomendaciones Administrativas y de Gestión

- Las conclusiones de este estudio indican que el acuífero se encuentra sobreotorgado, por lo tanto, si bien mediante Resolución DGA N° 245, de 30 de diciembre de 2009, se declaró área de restricción para nuevas extracciones de aguas subterráneas el sector hidrogeológico de aprovechamiento común denominado Pampa del Tamarugal, en atención a los resultados de este estudio se propone declarar este sector como Zona de Prohibición para nuevas explotaciones de aguas subterráneas.
- A partir de los resultados de este estudio es posible anticipar que, en un mediano plazo, y de acuerdo con las hipótesis de los diversos escenarios simulados, se generará un aumento en los conflictos entre los usuarios (agrícolas, industriales, sanitarios), dados los significativos descensos que experimentarían los niveles freáticos en diferentes sectores dentro del acuífero.
- Se recomienda enfocar los esfuerzos en la gestión sostenible del acuífero, con la participación e involucramiento de todos los usuarios, priorizando un uso que permita minimizar los efectos negativos sobre el sector agrícola y la densidad de tamarugos.
- Lo anterior hace imprescindible la organización legal de una Comunidad de Aguas Subterráneas (CASUB), de manera de que los distintos usuarios se involucren y coordinen para realizar una gestión eficiente del sector acuífero. Las principales tareas que la Comunidad de Aguas Subterráneas debería desarrollar son:
 - Mesas de trabajo (CASUB y Autoridades)

-
- Evaluación de medidas de reducción temporal de extracciones
 - Control y monitoreo de extracciones
 - Se propone realizar mesas de trabajo con todos los actores involucrados, para anticiparse a la aparición de escenarios críticos y buscar soluciones para que las extracciones intensivas no afecten a ninguno de los usuarios actuales.
 - Tal como se mencionó, las soluciones pueden apuntar a un cambio de los puntos actuales de extracción intensiva del acuífero, o el cambio gradual de la fuente de abastecimiento de los principales usuarios (Sanitarios e Industriales), desde esas aguas subterráneas al uso de agua de mar, mediante desalinización.