

Capítulo 04: Línea de Base

# Estudio de Impacto Ambiental Plan de Reducción de Extracciones en el Salar de Atacama Región de Antofagasta

## Capítulo 4 Línea de Base

GEOB.SQMSL689.CAP04.REVO.Estudio de Impacto Ambiental Plan de Reducción de Extracciones en el Salar de Atacama

Rev.	Id	Ejecutor	Revisor	Aprueba	Descripción
B	Nombre	LV	IZL	IZL	Tomo Recursos Hídricos Continentales. (B)
	Fecha	20.12.2021	24.12.2021	27.12.2021	
0	Nombre	LV	IZL	IZL	Tomo Recursos Hídricos Continentales. (0)
	Fecha	18.01.2022	20.01.2022	20.01.2022	



## Contenido

4	CARACTERIZACIÓN Y LÍNEA DE BASE DE COMPONENTES AMBIENTALES .....	21
4.1	Introducción.....	21
4.2	Descripción y Ubicación General del Proyecto .....	21
4.3	Medio físico .....	24
4.3.6	Hidrología e Hidrografía .....	24
4.3.7	Hidrogeología.....	73
4.3.8	Cambio Climático .....	324
4.3.9	Calidad de Agua .....	398

## Tablas

Tabla 4-1:	Características de zonas morfométricas del Salar de Atacama .....	30
Tabla 4-2:	Estaciones pluviométricas en la cuenca Salar de Atacama.....	35
Tabla 4-3:	Estadígrafos de series de precipitación anual .....	39
Tabla 4-4:	Precipitación media mensual para el periodo 1986 a 2020 .....	41
Tabla 4-5:	Porcentaje de distribución temporal de las precipitaciones (%) .....	43
Tabla 4-6:	Precipitaciones máximas en 24 hrs, Período 1986-1997 (mm) .....	44
Tabla 4-7:	Precipitaciones máximas en 24 hrs, Período 1998-2009 (mm) .....	44
Tabla 4-8:	Precipitaciones máximas en 24 hrs, Período 2010-2018 (mm) .....	45
Tabla 4-9:	Número de días con registro de lluvias, considerando años con información completa ....	45
Tabla 4-10:	Número de días con registro de lluvias, considerando años con información completa .	46
Tabla 4-11:	Número de días con registro de lluvias, considerando años con información completa .	46
Tabla 4-12:	Distribución Porcentual de los Días con Lluvia por Mes .....	47
Tabla 4-13:	Índice de Ubicación y Altura para las estaciones meteorológicas en estudio .....	47
Tabla 4-14:	Precipitación promedio anual para los puntos de amarre.....	49
Tabla 4-15:	Coordenadas de las estaciones fluviométricas y aforos .....	55
Tabla 4-16:	Caudales medios mensuales y medios anuales de las estaciones (L/s).....	57
Tabla 4-17:	Estaciones meteorológicas de evaporación .....	61
Tabla 4-18:	Tasa de evaporación en bandeja promedio mensual (mm/d).....	63

Tabla 4-19: Resumen caudal de derechos superficiales en la cuenca Salar de Atacama. ....	66
Tabla 4-20: Caudal de derechos superficiales en la cuenca Salar de Atacama .....	66
Tabla 4-21. Extensión del DEM_WGS84_BaseCANO-Extendido (EPSG: 32719). ....	83
Tabla 4-22. Resumen del tipo y cantidad de puntos de extracción y reinyección considerados. ....	86
Tabla 4-23. Resumen de información geofísica lineal revisada e integrada para la conceptualización de la geología subsuperficial. ....	91
Tabla 4-24. Resumen de información geofísica de pozos revisada e integrada para la conceptualización de la geología subsuperficial. ....	91
Tabla 4-25. Características de las principales unidades morfoestructurales reconocidas en la cuenca del Salar de Atacama. ....	98
Tabla 4-26. Resumen unidades geológicas superficiales.....	103
Tabla 4-27. Resumen de las unidades geológicas en subsuperficie .....	108
Tabla 4-28. Parámetros hidráulicos por unidad geológica. ....	110
Tabla 4-29. Límites de fluidos definidos para el Salar de Atacama. ....	123
Tabla 4-30. Bombeo máximo de salmuera por año de operación según RCA 226/2006 .....	140
Tabla 4-31. Resumen derechos extracción Salmuera SQM Salar S.A. RCA 226/2006. ....	141
Tabla 4-32. Resumen derechos extracción salmuera Albemarle RCA 21/2016. ....	141
Tabla 4-33. Parámetros hidráulicos por unidad hidrogeológica. Se incluyen datos de SQM y antecedentes de terceros. ....	171
Tabla 4-34: Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo preoperacional. ....	179
Tabla 4-35: Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo operacional. ....	180
Tabla 4-36: Resumen de balance de salmuera en el periodo preoperacional.....	181
Tabla 4-37: Resumen de balance de salmuera en el periodo operacional. ....	181
Tabla 4-38. Conductividad hidráulica por unidad geológica en el Sistema Soncor. ....	182
Tabla 4-39. Coeficiente de almacenamiento por unidad geológica en el Sistema Soncor.....	185
Tabla 4-40. Estaciones de aforo. ....	194
Tabla 4-41. Superficies lacustres generadas en el PSA de SQM desde el 2007 a 2020.....	198
Tabla 4-42. Estimación de caudal disponible a Zona Este- Agua.....	216
Tabla 4-43. Factor de ajuste para estimar caudales de entrada y evaporación desde el acuífero para dominio sistema local Soncor. ....	216

Tabla 4-44. Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo preoperacional Sistema Soncor.....	219
Tabla 4-45. Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo operacional Sistema Soncor.....	220
Tabla 4-46. Valores promedio mensuales para componentes del balance en laguna Barros Negros. ....	223
Tabla 4-47. Valores de conductividad hidráulica por unidad geológica en el Sistema Aguas de Quelana. ....	224
Tabla 4-48. Valores de almacenamiento por unidad geológica en el Sistema Aguas de Quelana. ..	226
Tabla 4-49. Factor de ajuste para estimar caudales de entrada para dominio sistema local Aguas de Quelana. ....	248
Tabla 4-50. Factor de ajuste para estimar caudales de salida por evaporación desde el acuífero para dominio sistema local Aguas de Quelana. ....	249
Tabla 4-51. Factor de ajuste para estimación de caudal disponible a Zona Este- Agua para dominio sistema local Aguas de Quelana. ....	249
Tabla 4-52. Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo preoperacional Sistema Aguas de Quelana. ....	252
Tabla 4-53. Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo operacional Sistema Aguas de Quelana. ....	253
Tabla 4-54. Parámetros hidráulicos por unidad geológica en el Sistema Peine. ....	254
Tabla 4-55. Superficies lacustres generadas en el PSA de SQM desde el 2007 a 2020.....	261
Tabla 4-56. Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo preoperacional y operacional.....	278
Tabla 4-57. Valores promedio por mes para componentes del balance en laguna Saladita. ....	281
Tabla 4-58. Valores de conductividad hidráulica por unidad geológica en el Sistema Tilopozo. ....	282
Tabla 4-59. Valores de almacenamiento por unidad geológica en el Sistema Tilopozo. ....	287
Tabla 4-60. Superficies lacustres promedio anual generadas en el PSA de Albemarle desde el 2015 a 2020.....	293
Tabla 4-61. Factor de ajuste para estimar caudales de entrada para dominio sistema local Tilopozo. ....	306
Tabla 4-62: Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo preoperacional.....	308
Tabla 4-63: Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo operacional. ....	309

Tabla 4-64. Puntos con información por sistema local .....	312
Tabla 4-65. Modelos climáticos preseleccionados. Fuente: Elaboración propia, con base en Fuente especificada no válida.....	329
Tabla 4-66. Modelos climáticos CMIP5.....	331
Tabla 4-67. Estaciones Meteorológicas con registros de precipitación en la cuenca del Salar de Atacama. ....	334
Tabla 4-68. Estaciones patrón asociada a cada estación pluviométrica. Fuente: Elaboración propia. ....	337
Tabla 4-69. Estaciones Meteorológicas con registros de temperatura media en la cuenca del Salar de Atacama. ....	340
Tabla 4-70. Ejemplo de modelos climáticos que aprueban criterio de tendencia anual para la variable precipitación en estación KCL, asociado a tipo de escalamiento espacial del primer nodo más cercano. ....	349
Tabla 4-71. Ejemplo de matriz binaria resultante del criterio A para la variable precipitación (utilizando escalamiento espacial inverso a la distancia). ....	358
Tabla 4-72. Ejemplo de matriz binaria resultante de los 4 criterios para la variable precipitación (utilizando escalamiento espacial de primer nodo más cercano) .....	360
Tabla 4-73. Ejemplo de matriz binaria resultante de los 4 criterios para la variable temperatura media (utilizando escalamiento espacial de tercer nodo más cercano). ....	360
Tabla 4-74. Resumen de modelos seleccionados asociados al tipo de escalamiento espacial. Fuente: Elaboración propia.....	361
Tabla 4-75. Resumen de tipo de escalamiento espacial escogido para cada estación pluviométrica y GCM seleccionado .....	368
Tabla 4-76. Resumen de tipo de escalamiento espacial escogido para cada estación de temperatura media y GCM seleccionado .....	368
Tabla 4-77. Coeficientes R <sup>2</sup> de las curvas de duración anual (CD) y curvas de variación estacional (CVE), asociado al tipo de escalamiento espacial escogido para cada estación pluviométrica y GCM seleccionado .....	370
Tabla 4-78. Coeficientes R <sup>2</sup> de las curvas de duración anual (CD) y curvas de variación estacional (CVE), asociado al tipo de escalamiento espacial escogido para cada estación de temperatura media y GCM seleccionado .....	370
Tabla 4-79. Clasificación de GCM según cantidad de estaciones que presentan ajuste aceptable con respecto a las precipitaciones .....	376
Tabla 4-80. Valor promedio de variación porcentual de precipitación media anual en cuenca del Salar de Atacama .....	377

Tabla 4-81. Valor promedio de variación de temperatura media anual en cuenca del Salar de Atacama. Fuente: .....	377
Tabla 4-82. Rango precipitación media anual por cada período de análisis.....	388
Tabla 4-83. Rango aumento de temperatura por cada período de análisis.....	388
Tabla 4-84. Rango evaporación de bandeja por cada período de análisis.....	389
Tabla 4-85. Balance hídrico sistema agua – escenario operacional (1994- 2019), período histórico .....	390
Tabla 4-86. Balance hídrico sistema agua – escenario operacional, 2021-2030.....	392
Tabla 4-87. Balance hídrico sistema agua – escenario operacional, 2031-2065.....	393
Tabla 4-88. Balance hídrico sistema agua – escenario operacional, 2066-2100.....	394
Tabla 4-89: Cantidad de muestras por fuente de información.....	403
Tabla 4-90. Número de puntos de monitoreo.....	405
Tabla 4-91 Sectores de monitoreo y largo estadístico resumido .....	414
Tabla 4-92 Parámetros históricos monitoreados. Se informa la cantidad de datos por parámetro y unidad geomorfológica.....	417
Tabla 4-93 Resultado global de control de calidad .....	420
Tabla 4-94 Resumen de caracterización histórica por pozo de los sistemas ambientales.....	428
Tabla 4-95 Clasificación de fluidos.....	492

## Figuras

Figura 4-1. Ubicación General del Proyecto .....	23
Figura 4-2: Cuenca del Salar de Atacama .....	26
Figura 4-3: Área de influencia definida para la componente Hidrología, sector pozos de monitoreo .27	
Figura 4-4: Área de influencia definida para la componente Hidrología, sector tubería.....	28
Figura 4-5: Zonificación morfométrica del Salar de Atacama.....	32
Figura 4-6: Red hidrográfica de la Cuenca Salar de Atacama .....	34
Figura 4-7: Ubicación de las estaciones pluviométricas .....	37
Figura 4-8: Disponibilidad de información según año hidrológico en cada estación meteorológica ...	38
Figura 4-9: Serie de precipitación anual, estación meteorológica Río Grande.....	39
Figura 4-10: Serie de precipitación anual, estación meteorológica Peine.....	40

Figura 4-11: Serie de precipitación anual, estación meteorológica KCL .....	40
Figura 4-12: Mapa de los dos tipos de comportamiento de las precipitaciones .....	41
Figura 4-13: Precipitación mensual en la estacione Río Grande, Peine y KCL .....	42
Figura 4-14: IUA contra precipitación promedio anual (mm/año) .....	48
Figura 4-15: Mapa de isoyetas (mm/año) estimado en estudio hidrológico, 1986-2019 .....	50
Figura 4-16: Cota 4.700 m.s.n.m. en la cuenca del Salar de Atacama .....	52
Figura 4-17: Estaciones fluviométricas y puntos aforo .....	56
Figura 4-18: Disponibilidad de información según año en cada estación fluviométrica .....	57
Figura 4-19: Caudal medio mensual de las estaciones en cauces del sector norte y precipitación media mensual en la estación San Pedro de Atacama .....	59
Figura 4-20: Curva de variación estacional en puntos de aforo en quebradas (L/s) .....	60
Figura 4-21: Curva de variación estacional en punto de aforo Vertiente Peine en Peine (L/s) .....	60
Figura 4-22: Caudal medio mensual en estaciones fluviométricas en canales (L/s) .....	61
Figura 4-23: Estaciones meteorológicas con medición de evaporación de bandeja .....	62
Figura 4-24: Disponibilidad de información estaciones meteorológicas de evaporación .....	64
Figura 4-25: Relación entre el coeficiente de corrección por densidad y la densidad del agua y salmuera de la cuenca del Salar de Atacama .....	65
Figura 4-26. Polígono de Contexto General Hidrogeología. ....	75
Figura 4-27: Área de Influencia componente hidrogeología .....	77
Figura 4-28. DEM utilizado en el estudio. ....	85
Figura 4-29. Catastro de pozos utilizados para la definición de unidades hidrogeológicas y análisis de parámetros hidráulicos. Se distinguen los puntos de acuerdo con la unidad geológica a la cual se asocia la medición. ....	87
Figura 4-30. Catastro de pozos utilizados para la confección de mapas piezométricos. Se distinguen los puntos de acuerdo con la fuente de la cual se obtuvo la información de niveles. ....	88
Figura 4-31. Catastro de pozos utilizados para el análisis de química e isótopos. Se indica el parámetro medido en cada uno de estos puntos. ....	89
Figura 4-32. Distribución de puntos de extracción, puntos de extracción equivalente y de reinyección para SQM, y puntos de extracción de ABL. ....	90
Figura 4-33. Tipo de geofísica lineal realizada en el Salar de Atacama.....	92
Figura 4-34. Ejemplos de secciones geofísicas utilizadas para la caracterización geológica e hidrogeológica del Salar de Atacama, ubicación en Figura 4-33. (a) Sección sísmica 1g022 (ENAP)	

interpretada por Jordan et al. (2007). (b) Sección TEM levantada por Geodatos (2017) para SQM en Sector de Quelana. ....	93
Figura 4-35. Salar de Atacama, indicando los principales rasgos morfológicos y estructurales. Arriba: Mapa geomorfológico. Abajo: Transecta que destaca los principales rasgos morfoestructurales y sistemas de falla. La traza se indica en el mapa.....	100
Figura 4-36. Mapa geológico del Salar de Atacama, indicando unidades geológicas simplificadas y estructuras. ....	102
Figura 4-37 . Catastro de pozos cuyos datos fueron utilizados para la caracterización geológica en subsuperficie. Se distinguen los pozos según la fuente de la cual se obtiene la información.....	107
Figura 4-38. Box Plot de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento de unidades geológicas. ....	111
Figura 4-39. Distribución de permeabilidades en unidad Cloruros Superiores. ....	113
Figura 4-40. Distribución de permeabilidades en unidad Evaporitas con Materia Orgánica. ....	114
Figura 4-41. Distribución de permeabilidades en unidad Cloruros Inferiores. ....	115
Figura 4-42. Distribución de permeabilidades en unidades Depósitos No Consolidados, Delta del Río San Pedro y Depósitos Cuaternarios Evaporíticos (facies Sulfato, Sulfato con limos y Carbonato con limos). ....	117
Figura 4-43. Sección esquemática oeste-este que representa la variación de transmisividad desde el núcleo hasta la zona aluvial. Los valores son consistentes con lo observado en la actualidad. ....	118
Figura 4-44. Distribución de coeficiente de almacenamiento. ....	119
Figura 4-45. Esquema de la zona de interacción salmuera-agua en el Salar de Atacama. ....	120
Figura 4-46 Correlación entre Densidad Terreno (g/mL, color azul, eje izquierdo) vs NaCl (eq/L) e Índices de saturación en Halita (Verde, eje derecho). ....	121
Figura 4-47 Correlación entre Conductividad Terreno ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ , color azul en eje izquierdo) vs NaCl (eq/L) e Índices de saturación en Halita (color verde, eje derecho). ....	122
Figura 4-48 Ubicación isolíneas de densidad que indican el afloramiento de la interfaz salina. ....	125
Figura 4-49 Ubicación de perfiles de estudios Geofísicos (TEM) y pozos de monitoreo compilados e integrados en delimitación de interfaz salina. ....	127
Figura 4-50 Ubicación de puntos con perfiles de CE medidos por SQM y otros autores (Albemarle, MEL). ....	128
Figura 4-51 Perfiles CE en sistema Soncor para seguimiento de la interfaz y clasificación de los fluidos que intersecta cada pozo (AD: Agua Dulce, ZT: Zona transición, SS Salmuera Subsaturada y SE: Salmuera próxima a equilibrio NaCl. Las líneas discontinuas representan el error en la delimitación de cada una de las zonas (10% respecto del valor de CE calculado). ....	129

Figura 4-52 Perfiles CE en sistema Aguas de Quelana para seguimiento de la interfaz y clasificación de los fluidos que intersecta cada pozo (AD: Agua Dulce, ZT: Zona transición, SS Salmuera Subsaturada y SE: Salmuera próxima a equilibrio NaCl. Las líneas discontinuas representan el error en la delimitación de cada una de las zonas (10% respecto del valor de CE calculado). .....	130
Figura 4-53 Perfiles CE en sistema Peine para seguimiento de la interfaz y clasificación de los fluidos que intersecta cada pozo (AD: Agua Dulce, ZT: Zona transición, SS Salmuera Subsaturada y SE: Salmuera próxima a equilibrio NaCl. Las líneas discontinuas representan el error en la delimitación de cada una de las zonas (10% respecto del valor de CE calculado). .....	131
Figura 4-54 Perfilajes CE realizados en Peine por Albemarle.....	132
Figura 4-55 Perfilajes CE realizados en Tilopozo por Albemarle. ....	133
Figura 4-56 Perfiles geofísica realizados por MEL en Tilopozo.....	134
Figura 4-57 Mapa de distribución en superficie de distintos tipos de fluidos y perfiles para caracterizar la profundidad, pendiente, forma y volumen de la interfaz salina en distintos sectores. ....	136
Figura 4-58 Perfiles de la profundidad de la interfase salina (densidad 1.065 g/mL) y su pendiente en distintos sectores del Salar.....	137
Figura 4-59. Ubicación de cuerpos lagunares Salar de Atacama.....	139
Figura 4-60. Ubicación zonas SOP y MOP .....	143
Figura 4-61. Extracciones históricas de salmuera anuales de SQM .....	144
Figura 4-62 Reinyecciones históricas de salmuera anuales de SQM .....	144
Figura 4-63 Extracción neta de salmuera SQM .....	145
Figura 4-64 Ubicación zonas y pozos de extracción Albemarle. ....	146
Figura 4-65 Extracciones de salmuera históricas anuales de ALB .....	147
Figura 4-66 Ubicación pozos de agua de SQM.....	148
Figura 4-67 Extracciones históricas de agua SQM.....	149
Figura 4-68 Ubicación pozos de agua Albemarle .....	150
Figura 4-69 Extracciones históricas de agua ALB .....	151
Figura 4-70. Pozos con información de nivel piezométrico. ....	152
Figura 4-71. Ubicación puntos representativos sistema salmuera.....	154
Figura 4-72. Series de nivel en los puntos representativos del sistema salmuera, series de precipitación de la estación de KCL y caudales de bombeo salmuera SQM.....	155
Figura 4-73. Ubicación puntos representativos sistema agua. ....	157
Figura 4-74. Series de nivel puntos representativos sistema agua (Zona Marginal).....	158



Figura 4-75. Ejemplo de pozos con comportamiento sistema agua (Planicie Aluvial) .....	159
Figura 4-76. Piezometría corregida por densidad para el año 1986. Corrección realizada a salmuera (1,23 g/mL).....	162
Figura 4-77. Piezometría corregida por densidad para diciembre de 2020. Corrección realizada a salmuera (1,23 g/mL). .....	163
Figura 4-78. Mapa de unidades hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama. Se incluyen aquellos sondeos utilizados para la construcción de las secciones hidrogeológicas y las trazas en planta de dichas secciones.....	168
Figura 4-79. Secciones hidrogeológicas regionales A-A' y B-B'. Trazas de las secciones en Figura 4-78. ....	169
Figura 4-80. Secciones hidrogeológicas regionales C-C' y D-D'. Trazas de las secciones en Figura 4-78. ....	170
Figura 4-81. Diagrama de Caja y Bigotes de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento de unidades hidrogeológicas. Datos obtenidos a partir de mediciones de SQM. ....	171
Figura 4-82: Esquema de flujo entre zonas de balance.....	174
Figura 4-83: Zonas de balance de agua y salmuera utilizadas. ....	175
Figura 4-84. Distribución espacial de valores de conductividad hidráulica estimados en unidades geológicas del sistema Soncor. ....	184
Figura 4-85. Distribución espacial de valores de almacenamiento estimados en unidades geológicas del sistema Soncor. ....	186
Figura 4-86. Ubicación puntos de monitoreo e isolíneas de densidad que indican afloramiento interfaz salina en sistema Soncor. ....	188
Figura 4-87 Perfil 2D den sector Norte del sistema Soncor. ....	189
Figura 4-88 Perfil 2D en sector este del sistema Soncor.....	190
Figura 4-89 Pendiente de la isolínea de densidad 1,065g/mL para las secciones de Soncor Norte y Soncor Este. ....	190
Figura 4-90. Puntos donde se realiza aforo en el sistema Soncor.....	192
Figura 4-91. Activación Desborde Cola de Pez y Sur (el valor 1 corresponde a la activación de Desborde Cola de Pez y -1 a la activación de Desborde Sur). ....	193
Figura 4-92. Medidas de aforos en estaciones APSA 2, 3, 4 y 5.....	195
Figura 4-93. Medidas de aforos en estaciones Puente San Luis y Barros Negros.....	195
Figura 4-94. Medidas de aforos en los desbordes Barros Negros Cola de Pez y Barros Negros Sur.....	197
Figura 4-95. Arriba: Batimetría de la Laguna Chaxa. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para la Laguna Chaxa e información del levantamiento realizado. ....	199

Figura 4-96. Arriba: Batimetría de la Laguna Puilar. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para la Laguna Puilar e información del levantamiento realizado. ....	200
Figura 4-97. Arriba: Batimetría de la Laguna Barros Negros y zonas de desborde. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para la Laguna Barros Negros y zonas de desborde e información del levantamiento realizado. ....	201
Figura 4-98. Pozos con información de nivel piezométrico Soncor. ....	203
Figura 4-99. Puntos representativos de nivel piezométrico Soncor. ....	204
Figura 4-100. Series de nivel en los puntos representativos del sistema salmuera Soncor y eventos de precipitación registrados en la estación meteorológica de Chaxa. ....	205
Figura 4-101. Niveles representativos de agua dulce en la zona marginal en el sector de Soncor. ....	206
Figura 4-102. Registro de niveles de los puntos de observación de agua dulce en planicie aluvial de Sistema Soncor. ....	207
Figura 4-103. Piezometría sector Soncor, año 1986. ....	209
Figura 4-104. Piezometría sector Soncor, año 2020. ....	211
Figura 4-105. Mapa de unidades hidrogeológicas del sistema local Soncor. ....	213
Figura 4-106. Sección hidrogeológica E-E'. Traza de la sección en Figura 4-105. ....	214
Figura 4-107. Zonas de balance de agua y salmuera utilizadas Sistema Soncor. ....	217
Figura 4-108. Zonas aportantes a zonas más bajas Sistema Soncor. ....	218
Figura 4-109. Esquema conceptual de la dinámica de flujos de entrada y salida del sistema lagunar Barros Negros. ....	222
Figura 4-110. Distribución espacial de valores de conductividad hidráulica estimados en unidades geológicas del sistema Aguas de Quelana. ....	226
Figura 4-111. Distribución espacial de valores de almacenamiento estimados en unidades geológicas del sistema Aguas de Quelana. ....	228
Figura 4-112. Ubicación puntos de monitoreo e isolíneas de densidad que indican afloramiento interfaz salina en sistema Aguas de Quelana. ....	230
Figura 4-113 Perfil 2D para la caracterización de pendiente, forma, profundidad y volumen de la interfaz salina en el sistema Aguas de Quelana. ....	231
Figura 4-114. Definición de cuerpos lagunares Aguas de Quelana. ....	233
Figura 4-115: Evolución de cobertura de cuerpos de agua. ....	234
Figura 4-116 Pozos con información de nivel piezométrico Aguas de Quelana. ....	236
Figura 4-117 Puntos representativos de nivel piezométrico Aguas de Quelana. ....	237
Figura 4-118. Registro de los niveles representativos en el sector de Quelana. ....	239

Figura 4-119. Registro de los niveles representativos del sistema salmuera y sistema agua en zona marginal en el sector de Quelana y eventos de precipitación registrados en la estación meteorológica de Camar. ....	240
Figura 4-120. Piezometría sin corrección por densidad interpretada para el año 1986. ....	242
Figura 4-121. Piezometría sin corrección por densidad interpretada para diciembre de 2020. ....	244
Figura 4-122. Mapa de unidades hidrogeológicas del Sistema local Aguas de Quelana. ....	246
Figura 4-123. Sección hidrogeológica G-G'. Traza de la sección en Figura 4-122. ....	247
Figura 4-124. Zonas de balance de agua y salmuera utilizadas Sistema Agua de Quelana. ....	250
Figura 4-125. Zonas aportantes a Zona Este- Agua Sistema Agua de Quelana. ....	251
Figura 4-126. Distribución espacial de valores de conductividad hidráulica estimados en unidades geológicas del sistema Peine. ....	254
Figura 4-127. Ubicación puntos de monitoreo e isolíneas de densidad que indican afloramiento interfaz salina en sistema Peine. ....	256
Figura 4-128 Perfil 2D para la caracterización de pendiente, forma, profundidad y volumen de la interfaz salina en sistema Peine. ....	257
Figura 4-129. Puntos de aforo existentes en el sistema Peine. ....	259
Figura 4-130. Valores de aforos medidos en el Sistema Peine. ....	260
Figura 4-131. Arriba: Batimetría de las lagunas del Sistema Peine. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para las lagunas del Sistema Peine e información del levantamiento realizado. ...	262
Figura 4-132 Pozos con información de nivel piezométrico Peine. ....	264
Figura 4-133 Puntos representativos de nivel piezométrico Peine. ....	265
Figura 4-134. Registro de los niveles representativos del sector de Peine. ....	267
Figura 4-135. Niveles representativos del sistema de salmuera en el sector de Peine. ....	268
Figura 4-136. Piezometría sin corrección por densidad interpretada para el año 1986. ....	270
Figura 4-137. Piezometría sin corrección por densidad interpretada para diciembre de 2020. ....	272
Figura 4-138. Mapa de unidades hidrogeológicas del Sistema local Peine. ....	274
Figura 4-139. Sección hidrogeológica H-H'. Traza de la sección en Figura 4-138. ....	275
Figura 4-140. Zonas de balance de agua y salmuera utilizadas Sistema Peine. ....	277
Figura 4-141. Ubicación de cuerpos lagunares en el sistema local Peine. ....	280
Figura 4-142. Esquema conceptual de la dinámica de flujos de entrada y salida del sistema lagunar de Saladita e Interna. ....	281

Figura 4-143. Distribución espacial de valores de conductividad hidráulica estimados en unidades geológicas del sistema Tilopozo. ....	286
Figura 4-144. Distribución espacial de valores de almacenamiento estimados en unidades geológicas del sistema Tilopozo. ....	288
Figura 4-145. Ubicación puntos de monitoreo e isolíneas de densidad que indican afloramiento interfaz salina en sistema Tilopozo. ....	290
Figura 4-146 Perfil 2D NW-SE del volumen ocupado por la interfaz salina para el sector de Tilopozo. ....	291
Figura 4-147. Arriba: Batimetría de Laguna La Brava. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para Laguna La Brava e información del levantamiento realizado. ....	294
Figura 4-148 Pozos con información de nivel piezométrico Tilopozo. ....	296
Figura 4-149 Puntos representativos de nivel piezométrico Tilopozo.....	297
Figura 4-150. Registro de niveles representativos en el sector de Tilopozo. ....	298
Figura 4-151. Piezometría sin corrección por densidad interpretada para el año 1986. ....	300
Figura 4-152. Piezometría sin corrección por densidad interpretada para diciembre de 2020. ....	302
Figura 4-153. Mapa de unidades hidrogeológicas del Sistema local de Tilopozo.....	304
Figura 4-154. Sección hidrogeológica I - I'. Traza de la sección en Figura 4-153. ....	305
Figura 4-155. Zonas de balance de agua y salmuera utilizadas sector Tilopozo. ....	307
Figura 4-156. Ubicación general del Salar de Atacama.....	326
Figura 4-157. Esquema metodología utilizada para generar proyecciones climáticas bajo escenarios de cambio climático.....	327
Figura 4-158. Emisiones de CO2 para diferentes escenarios de trayectorias de concentración representativas.....	328
Figura 4-159. Esquema de representación de sistema acoplado Atmósfera – Océano – Suelo en GCMs. ....	333
Figura 4-160. Localización de las Estaciones Meteorológicas consideradas para la evaluación de la precipitación.....	336
Figura 4-161. Curva doble acumulada en estación Camar (DGA), periodo 1975 – 2019. ....	339
Figura 4-162. Curva doble acumulada en estación Chaxa, periodo 1975 – 2019.....	339
Figura 4-163. Comparación entre precipitación anual original (rellenada) y corregida mediante curva doble acumulada en estación Chaxa, periodo 1975 – 2019.....	340
Figura 4-164. Localización de las Estaciones Meteorológicas consideradas para la evaluación de la temperatura. ....	342

Figura 4-165. Esquema método inverso a la distancia. Fuente: Elaboración propia.....	343
Figura 4-166. Temperatura media mensual de valores observados (negro), datos escalados espacialmente desde CR2MET (rojo) y posteriormente corregidos a través de QDM (verde) en estación Chaxa, periodo 1979 - 2019. ....	344
Figura 4-167. Temperatura media mensual de valores observados (negro), datos escalados espacialmente desde CR2MET (rojo) y posteriormente corregidos a través de QDM (verde) en estación El Tatio, periodo 1979 - 2019. ....	344
Figura 4-168. Ejemplo de la resolución espacial y los pixeles considerados para el escalamiento en todas las estaciones meteorológicas. Modelos CCSM4 (a) y IPSL-CM5A-LR (b). ....	346
Figura 4-169: Representación del método QDM. ....	348
Figura 4-170. Ejemplo de precipitación anual y tendencia de GCMs (utilizando escalamiento espacial de primer nodo más cercano) y datos observados en estación KCL. Periodo 1975 - 2005. ....	350
Figura 4-171. Ejemplo de temperatura media anual y tendencia de GCMs (utilizando escalamiento espacial de primer nodo más cercano) y datos observados en estación KCL. Periodo 1979 - 2005 .....	351
Figura 4-172. Ejemplo de relación entre precipitación anual observada y modelada por GCMs (utilizando escalamiento espacial de segundo nodo más cercano) en estación Rio Grande (DGA). Periodo 1975 - 2005 .....	352
Figura 4-173. Ejemplo de relación entre temperatura media anual observada y modelada por GCMs (utilizando escalamiento espacial de segundo nodo más cercano) en estación San Pedro de Atacama (DGA). Periodo 1979 - 2005 .....	353
Figura 4-174. Ejemplo de coeficientes de Pardé de GCMs (utilizando escalamiento espacial de tercer nodo más cercano) y datos observados de precipitación en estación Chaxa. Periodo 1975 - 2005.....	355
Figura 4-175. Ejemplo de coeficientes de Pardé de GCMs (utilizando escalamiento espacial de tercer nodo más cercano) y datos observados de temperatura media en estación Chaxa. Periodo 1979 - 2005.....	355
Figura 4-176. Ejemplo de correlación de las curvas de duración de las precipitaciones mensuales observadas en estación Peine (DGA) y escaladas por cada GCM en la misma estación (utilizando escalamiento espacial de cuarto nodo más cercano). Periodo 1975 - 2005 .....	357
Figura 4-177. Ejemplo de correlación de las curvas de duración de las temperaturas medias mensuales observadas en estación Peine (DGA) y escaladas por cada GCM en la misma estación (utilizando escalamiento espacial de cuarto nodo más cercano). Periodo 1979 - 2005 .....	357
Figura 4-178. Ejemplo de comparación entre la curva de duración anual de precipitación observada (línea negra) y valor corregido mediante QDM para cada GCM en estación Chaxa. Periodo 1975 - 2005 .....	363

Figura 4-179. Ejemplo de comparación entre la curva de variación estacional de precipitación observada (línea negra) y valor corregido mediante QDM para cada GCM en estación Chaxa. Periodo 1975 – 2005 .....	364
Figura 4-180. Ejemplo de comparación entre la curva de duración anual de temperatura media observada (línea negra) y valor corregido mediante QDM para cada GCM en estación Chaxa. Periodo 1979 – 2005 .....	365
Figura 4-181. Ejemplo de comparación entre la curva de variación estacional de temperatura media observada (línea negra) y valor corregido mediante QDM para cada GCM en estación Chaxa. Periodo 1979 – 2005 .....	366
Figura 4-182. Resumen de cantidad de estaciones para cada modelo que cumplen con un ajuste aceptable respecto a lo observado en el periodo histórico .....	367
Figura 4-183. Esquema sobre los enfoques para caracterizar de forma explícita y reducir la multitud de incertidumbres en las evaluaciones de los impactos hidrológicos del cambio climático y el desarrollo de historias hidrológicas cuantitativos representativos para aplicaciones específicas.....	372
Figura 4-184. Ejemplo de precipitación anual de valores simulados corregidos según modelo CNRM-CM5 en estación Socaire (DGA) para el periodo 1975 – 2100 y valores observados en dicha estación durante el intervalo de tiempo 1975 – 2005.....	374
Figura 4-185. Ejemplo de precipitación anual de valores simulados corregidos según modelo MIROC-ESM en estación Socaire (DGA) para el periodo 1975 – 2100 y valores observados en dicha estación durante el intervalo de tiempo 1975 – 2005.....	374
Figura 4-186. Ejemplo de temperatura media anual de valores simulados corregidos según modelo CNRM-CM5 en estación Socaire (DGA) para el periodo 1979 – 2100 y valores observados en dicha estación durante el intervalo de tiempo 1979 – 2005.....	375
Figura 4-187. Ejemplo de temperatura media anual de valores simulados corregidos según modelo MIROC-ESM en estación Socaire (DGA) para el periodo 1979 – 2100 y valores observados en dicha estación durante el intervalo de tiempo 1979 – 2005.....	375
Figura 4-188. Variación porcentual de precipitación media anual distribuida en la cuenca Salar de Atacama para el corto (1995 – 2005 vs 2020 – 2030), mediano (1975 – 2005 vs 2020 – 2050) y largo plazo (1925 – 2005 vs 2020 – 2100) en modelos CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, MIROC-ESM y NorESM1-M.....	378
Figura 4-189. Variación de temperatura media anual distribuida en la cuenca Salar de Atacama para el corto (1995 – 2005 vs 2020 – 2030), mediano (1975 – 2005 vs 2020 – 2050) y largo plazo (1925 – 2005 vs 2020 – 2100) en modelos CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, MIROC-ESM y NorESM1-M. ...	380
Figura 4-190. Distribución espacial de precipitaciones proyectadas por modelo MIROC-ESM, Enero 2026.....	383
Figura 4-191. Distribución espacial de zonas de recarga.....	384

Figura 4-192. Ejemplo de serie de recarga período 1986-2100 Centroide 32 para GCM MIROC-ESM .....	385
Figura 4-193. Zonas de balance cuenca del Salar de Atacama .....	387
Figura 4-194. Contexto General de línea base de calidad de agua .....	402
Figura 4-195 Puntos con muestras química en Salar Atacama y su relación con las unidades geomorfológicas.....	407
Figura 4-196. Puntos con muestras de isótopos H <sub>2</sub> O y su relación con las unidades geomorfológicas .....	408
Figura 4-197: Puntos de monitoreo asociados al Sistema Soncor .....	409
Figura 4-198. Puntos de monitoreo asociados al Sistema Aguas de Quelana .....	410
Figura 4-199. Puntos de monitoreo asociados al de Sistema Peine .....	411
Figura 4-200: Puntos de monitoreo asociados al Sistema Tilopozo .....	412
Figura 4-201. Distribución espacial de CE Terreno por punto de monitoreo y gráficas boxplot por zona para las aguas subterráneas y salmueras .....	422
Figura 4-202. Distribución espacial de densidad por punto de monitoreo y graficas boxplot de parámetros físico-químicas para los distintos sectores .....	424
Figura 4-203. Distribución espacial de CE Terreno en aguas superficiales de diferentes sectores del Salar y graficas boxplot de parámetros físico-químicos .....	426
Figura 4-204. Evolución temporal CE Terreno en distintos cuerpos de agua superficial .....	427
Figura 4-205. Evolución temporal CE Terreno de aguas subterráneas y salmueras en los distintos sectores del Salar Atacama .....	427
Figura 4-206. Evolución histórica de la calidad del agua en el Sistema Soncor .....	435
Figura 4-207. Evolución histórica de la calidad del agua en el Sistema Aguas de Quelana .....	436
Figura 4-207. Evolución histórica de la calidad del agua en el Sistema Peine .....	437
Figura 4-208. Evolución histórica de la calidad del agua en pozos de agua .....	439
Figura 4-209. Evolución histórica de la calidad del agua en sistemas lacustres del Sistema Soncor .....	441
Figura 4-210. Evolución histórica de la calidad del agua en sistemas lacustres del Sistema Peine .....	442
Figura 4-211. Diagramas Schröeller Berkaloff para las distintas unidades geomorfológicas en verano (diciembre a marzo) e invierno (junio a agosto) Ceq: Concentración equivalente en (meq/L).....	444
Figura 4-212. Diagrama de piper por unidad geomorfológica, muestras subterráneas y superficiales. (ene-nov 2020) .....	445
Figura 4-213 Evolución cloruros en cuerpos agua superficial y zona transición marginal - lagunar	446

Figura 4-214. Evolución temporal cloruros en aguas subterráneas y salmueras en los distintos sectores del Salar Atacama .....	447
Figura 4-216. Análisis isotópicos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de agua subterránea .....	449
Figura 4-217. Análisis isotópicos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de agua superficial .....	450
Figura 4-218 Mediana isótopo $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$ en puntos subterráneos y gráficos tipo boxplot por zona .....	452
Figura 4-219 Mediana isótopo $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$ en puntos superficiales y gráficos tipo boxplot por sector geomorfológico .....	454
Figura 4-218. Evolución temporal aguas superficiales en Salar Atacama. ....	455
Figura 4-219 Ubicación de perfiles de conductividad eléctrica analizados. Isopiezas año 2020 ....	457
Figura 4-220. Ubicación de perfiles de CE Terreno analizados en Sector Soncor. Isopiezas año 2020 .....	459
Figura 4-221. Evolución temporal de la conductividad eléctrica de terreno de Sistema Soncor en perfil Norte, entre L7-3 y SOPM-7(L2-6) .....	460
Figura 4-222. Evolución temporal de la CE de Terreno de Sistema Soncor, entre L7-3 y SOPM-7(L2-6) (acercamiento a valores bajos de CE de Figura 4-221) .....	461
Figura 4-223. Evolución temporal CE de terreno, Sistema Soncor en perfil Sur, entre L2-4 y SOP-7 (L2-6).....	461
Figura 4-224. Evolución temporal de CE de Terreno de Sistema Soncor, entre L2-4 y SOPM-7(L2-6) (acercamiento a valores bajos de CE de Figura 4-223) .....	462
Figura 4-225. Distribución espacial de CE Terreno de aguas superficiales del Sistema Soncor .....	463
Figura 4-226. Evolución temporal CE Terreno en lagunas Sistema Soncor .....	464
Figura 4-227. Diagrama Piper del sector Soncor por unidad geomorfológica (2020) .....	465
Figura 4-228. Análisis isotópicos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de agua subterránea sector Soncor .....	467
Figura 4-229. Ubicación de perfil de Conductividad Eléctrica analizado en los sectores Aguas de Quelana y Zona Marginal. Isopiezas año 2018 .....	469
Figura 4-230. Evolución temporal de la conductividad eléctrica de terreno de sector Aguas de Quelana .....	470
Figura 4-231. Evolución temporal de la conductividad eléctrica de terreno de terreno de sector Aguas de Quelana. (Detalle a valores bajos de CE de Figura 4-230).....	470
Figura 4-232. Distribución espacial de CE Terreno de aguas superficiales del sector Quelana .....	471
Figura 4-233. Diagramas de Piper de sector Aguas de Quelana por unidad geomorfológica (2020) .....	473



Figura 4-234. Isótopos H <sub>2</sub> O ( <sup>18</sup> O y deuterio), sector aguas de Quelana en Planicie Aluvial, Zona Marginal y Núcleo .....	474
Figura 4-235. Ubicación de perfil de CE analizado en el sector Peine. Isopiezas año 2018 .....	476
Figura 4-236. Evolución temporal de la conductividad eléctrica de terreno de sector Peine .....	477
Figura 4-237 Distribución espacial de CE Terreno de aguas superficiales del sector Peine.....	479
Figura 4-238. Evolución temporal CE Terreno en lagunas sector Peine.....	480
Figura 4-239. Diagrama de Piper de sector Peine por unidades geomorfológicas (2019-2020).....	481
Figura 4-240. Isótopos de H <sub>2</sub> O ( <sup>18</sup> O y deuterio) Planicie Aluvial, Zona Marginal y Núcleo del sector Peine .....	482
Figura 4-241. Ubicación de perfil de Conductividad Eléctrica analizado en sector Tilopozo. Isopiezas año 2018.....	485
Figura 4-242. Evolución temporal de la conductividad eléctrica de terreno de sector Tilopozo. ....	486
Figura 4-243. Evolución temporal de la conductividad eléctrica terreno de sector Tilopozo (acercamiento a valores bajos de CE de Figura 4-242) .....	486
Figura 4-244. Distribución espacial de CE Terreno de aguas superficiales del sector Tilopozo .....	488
Figura 4-245. Evolución temporal CE Terreno en lagunas sector Tilopozo.....	489
Figura 4-246. Diagrama de Piper de sistema Tilopozo por unidades geomorfológicas (2019-2020) .....	490
Figura 4-247. Isótopos de H <sub>2</sub> O, <sup>18</sup> O vs deuterio en Planicie Aluvial, Zona Marginal y Núcleo .....	491
Figura 4-248. Clasificación en agua, transición y salmuera para las aguas subterráneas .....	493
Figura 4-249. Clasificación en agua, transición y salmuera para las aguas superficiales .....	494

## Anexos

- Anexo 1. Precipitaciones (digital)
- Anexo 2. Caudales medios mensuales (digital)
- Anexo 3. Evaporación de bandeja (digital)
- Anexo 4. Análisis de consistencia
- Anexo 5. Relleno de Temperatura Media Mensual
- Anexo 6. Macroescala GCMs
- Anexo 7. Selección GCMs - Criterio A: TENDENCIA Anual
- Anexo 8. Selección GCMs - Criterio B: CORRELACIÓN Anual

- Anexo 9. Selección GCMs - Criterio C: Estacionalidad
- Anexo 10. Selección GCMs - Criterio D Variabilidad
- Anexo 11. Matrices binarias resultantes de cada criterio de selección evaluado
- Anexo 12. Series de precipitación anual (1979 - 2100)
- Anexo 13. Series de temperatura media anual (1975 - 2100)
- Anexo 14. Series de recarga
- Anexo 15. Base de Datos de Calidad de Aguas Original
- Anexo 16.. Certificados de Laboratorio
- Anexo 17.. Puntos de Monitoreo
- Anexo 18.. Largo Estadístico y frecuencia de monitoreo
- Anexo 19.. Base de Datos de Calidad de Aguas depurada
- Anexo 20.. Evolución histórica de parámetros fisicoquímicos por sector de estudio

## 4 CARACTERIZACIÓN Y LÍNEA DE BASE DE COMPONENTES AMBIENTALES

### 4.1 Introducción

Conforme a lo establecido en el artículo 18 literal letra e) del D.S. N° 40/2012 del Ministerio del Medio Ambiente que aprueba el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (en adelante, RSEIA), respecto a los contenidos mínimos, se indica que el EIA deberá considerar la “línea de base, que deberá describir detalladamente el área de influencia del proyecto o actividad, a objeto de evaluar posteriormente los impactos que pudieren generarse o presentarse sobre los elementos del medio ambiente. Deberán describirse aquellos elementos del medio ambiente que se encuentren en el área de influencia del proyecto o actividad y que dan origen a la necesidad de presentar un Estudio de Impacto Ambiental, en consideración a los efectos, características o circunstancias a que se refiere el artículo 11 de la Ley”.

De acuerdo con lo anterior, en las siguientes secciones se caracteriza el estado actual de cada uno de los elementos del medio ambiente o componentes indistintamente, que se encuentran en el área del Proyecto, permitiendo contar con una descripción de un área o espacio geográfico del cual se obtiene información esencial para predecir y evaluar los impactos directos e indirectos en los elementos del medio ambiente, o bien para descartar su afectación. Lo anterior en contexto con lo establecido en el literal a) del artículo 2 del D.S. N° 40 Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), y literal b.1) del mismo artículo del citado Decreto. De acuerdo con lo anterior, para aquellos elementos del medio ambiente en las cuales se predicen impactos ambientales por ubicación de las partes u obras asociadas o donde se ejecuten las acciones del Proyecto, el área o espacio geográfico caracterizado se denominará Área de Influencia (en adelante, AI). Por otra parte, para aquellos elementos del medio ambiente donde no se prevén impactos ambientales por la ubicación de las partes, obras y/o acciones del Proyecto no se define un AI, no obstante, de igual forma se realiza una caracterización general, ya que su descripción es necesaria por ser atributos relevantes para un mayor entendimiento de otros elementos del medio ambiente o bien para descartar su afectación.

Para un mayor detalle y entendimiento en la definición del AI, en el Capítulo 3 de este EIA, se entrega la definición y criterios que justifican el AI para cada una de las componentes analizadas.

Por otra parte, en el siguiente Capítulo se identifican aquellos Proyectos que han sido evaluados ambientalmente en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y que tienen Resolución de Calificación Ambiental (RCA) favorable, de manera de poder establecer la relación con los impactos ambientales del Proyecto contemplando los términos en los que fueron evaluados y aprobados, de acuerdo con lo establecido en el RSEIA, en su Título III, Párrafo 2°, artículo 18, letra e.11.

### 4.2 Descripción y Ubicación General del Proyecto

Tal como se describe en el Capítulo 02, el Proyecto, “Plan de Reducción de Extracciones en el Salar de Atacama”, corresponde a la modificación de un proyecto existente y actualmente operativo el cual cuenta con Resolución de Calificación Ambiental (RCA), Res. Exenta N° 226/2006 de la Comisión Regional del Medio Ambiente, Región de Antofagasta.

El Proyecto, tiene por objeto reducir la cantidad máxima de salmuera a bombear desde las zonas de extracción autorizadas en el núcleo del Salar y de agua a extraer desde pozos ubicados en la zona aluvial en el margen este del Salar; implementar ajustes en el plan de seguimiento ambiental y, en los planes de alerta temprana, y adoptar medidas asociadas a la pérdida de ejemplares de Algarrobo en el sector del pozo Camar 2.

Las reducciones a implementar en el bombeo de salmuera y agua consisten en la reducción progresiva de la extracción de salmuera que se realiza desde las zonas de extracción autorizadas en el núcleo del Salar (sectores MOP y SOP), alcanzando un bombeo promedio anual máximo de 822 l/s al año 2028, y en la limitación del suministro de agua a un máximo total de 120 l/s a extraer en conjunto desde los pozos Mullay 1, Allana, Socaire 5B y CA-2015, a partir de la aprobación del Proyecto.

Adicional a las reducciones de extracciones, planteadas en el Plan de Desarrollo Sustentable de SQM (2020) e incorporadas como compromiso en el Programa de Cumplimiento propuesto en el procedimiento sancionatorio F-041-2016 de la Superintendencia del Medio Ambiente, el Proyecto considera las siguientes materias igualmente comprometidas en el programa de cumplimiento:

Actualización de los Planes de Alerta Temprana aplicables a los sistemas Soncor, Aguas de Quelana, Peine y Vegetación Borde Este, incluyendo indicadores, condiciones de activación y desactivación, y medidas a aplicar en caso de activación.

Actualización del Plan de Seguimiento Ambiental, tanto hidrogeológico (PSAH) como biótico (PSAB), incluyendo nuevos parámetros y variables, optimizando la cobertura y frecuencia de algunos parámetros y variables, e incorporando mecanismos de revisión y comunicación de resultados.

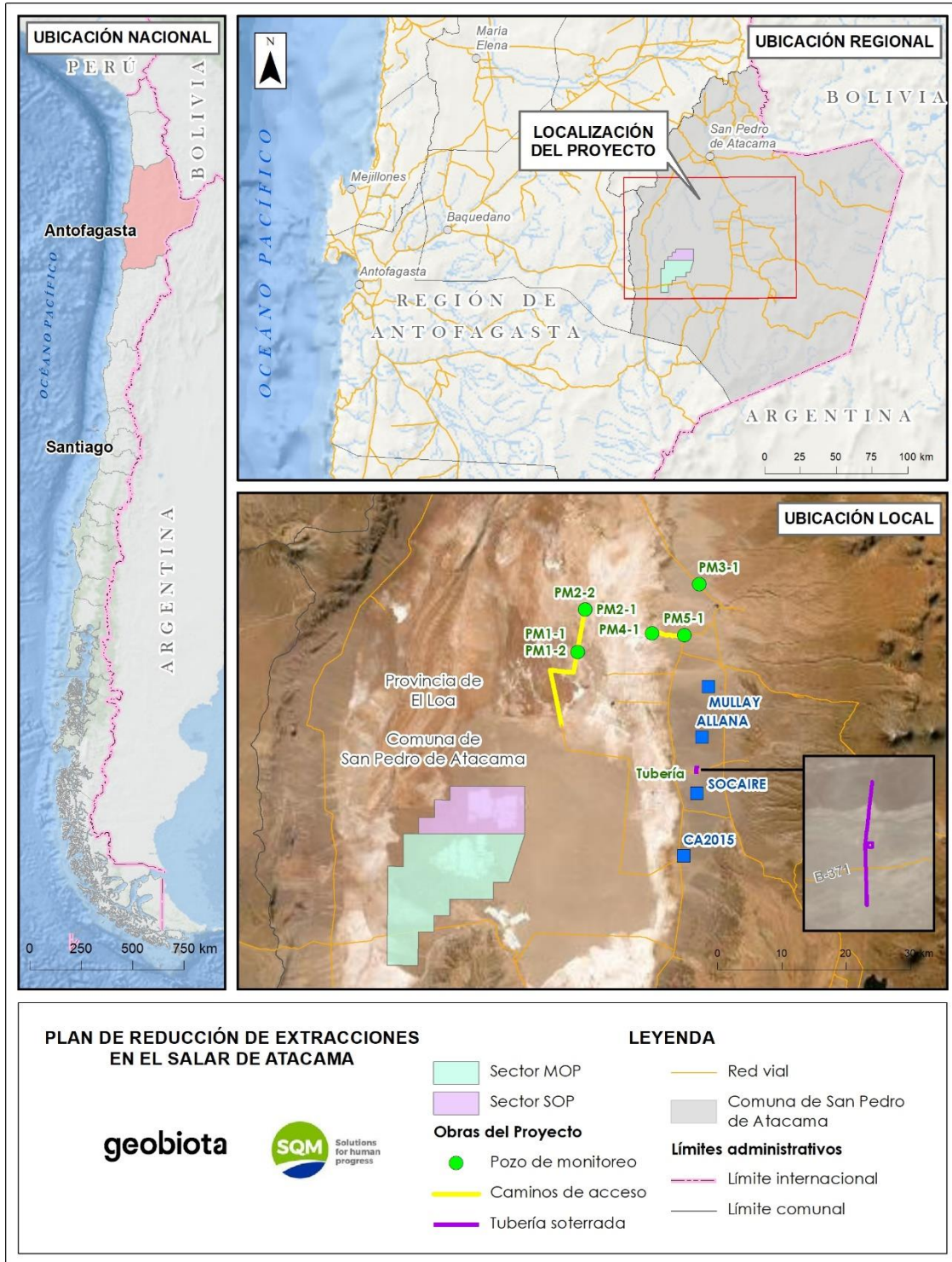
Plan de medidas asociados a la pérdida de ejemplares de Algarrobo presentes en el sector del pozo Camar 2, objeto de seguimiento conforme a la RCA N° 226/2006, incluyendo la reforestación de algarrobos

El Proyecto corresponde a una modificación de proyecto existente, calificado favorablemente mediante RCA N° 226/2006, que calificó el proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”.

El Proyecto no considera ningún otro cambio, ajuste o modificación en la operación minera de SQM Salar S.A. en el Salar de Atacama. De esta manera, el proceso productivo (salvo el flujo máximo anual de salmuera y el caudal total máximo de agua), el área definida para bombeo de salmuera, la vida útil de la operación, y los demás aspectos operacionales y de seguimiento que forman parte de la actual operación minera de SQM en el Salar de Atacama que no son modificados por el presente Proyecto, se mantienen en los mismos términos bajo los cuales fueron evaluados y calificados favorablemente por la RCA N° 226/2006 y demás autorizaciones vigentes.

El Proyecto se localiza en la Región de Antofagasta, provincia de El Loa, comuna de San Pedro de Atacama, en el Salar de Atacama. En la Figura 4-1 se indica la ubicación referencial del Proyecto

Figura 4-1. Ubicación General del Proyecto



Fuente: Elaboración propia

## 4.3 Medio físico

### 4.3.6 Hidrología e Hidrografía

#### 4.3.6.1 Introducción

La presente sección da cuenta de los antecedentes que caracterizan la línea de base de la componente hidrología del Proyecto “Plan Reducción de Extracciones en el Salar de Atacama” (en adelante, el Proyecto), en conformidad con lo establecido en el D.S. N° 40/2012 “Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental” del Ministerio del Medio Ambiente (Artículo N° 18, literal e.1).

Este documento de línea de base presenta la revisión y análisis de los antecedentes disponibles que permiten caracterizar las variables involucradas en el ciclo hidrológico, como son la hidrografía, la precipitación, la evaporación y los escurrimientos, lo que permite entender el comportamiento hídrico de la zona.

El Salar de Atacama está ubicado en la Región de Antofagasta y es el mayor depósito salino de Chile. El clima del Salar de Atacama se corresponde con las características áridas y semiáridas que presenta el norte de Chile. Las precipitaciones sobre el salar son escasas, sin embargo, las lluvias se incrementan hacia el este, donde se encuentran las cumbres de la cordillera de los Andes. Estas precipitaciones se registran mayoritariamente durante el llamado “invierno altiplánico”, que va de diciembre a marzo. Por otro lado, en el Salar de Atacama se registran altas tasas de evaporación y se destaca la presencia de cauces con escorrentía permanente en el norte de la cuenca.

#### 4.3.6.2 Objetivos

##### 4.3.6.2.1 Objetivo general

El objetivo general del presente informe es caracterizar y describir la componente Hidrología en la zona de emplazamiento del Proyecto, con la finalidad de describir el comportamiento hídrico de la cuenca del Salar de Atacama y sus alrededores.

##### 4.3.6.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos se señalan los siguientes:

- Caracterizar la hidrografía de la cuenca del Salar de Atacama, considerando las subcuencas que contienen las partes, obras y acciones del Proyecto, identificando los puntos de cruce con esteros, ríos y quebradas.
- Analizar las precipitaciones de la cuenca del Salar de Atacama, con la finalidad de caracterizar su comportamiento, su variabilidad temporal y su distribución espacial.
- Caracterizar el comportamiento de los escurrimientos de la cuenca del Salar de Atacama.
- Caracterizar la evaporación de bandeja y la evaporación desde superficie de agua libre.

#### 4.3.6.3 Contexto general y Área de Influencia



#### 4.3.6.3.1 Contexto general

El Salar de Atacama se localiza en la Región de Antofagasta, a 55 km al sur de San Pedro de Atacama y 316 km al noreste de Antofagasta (capital regional). La cuenca del Salar de Atacama comprende un área total de 16.998 km<sup>2</sup>, y la delimita la Cordillera de los Andes en sus márgenes norte, este y sur, y la Cordillera de Domeyko por su margen oeste.

La parte más baja de la cuenca (correspondiente a las zonas geomorfológicas núcleo, zona de transición este y zona marginal) se encuentra a una altura aproximada de 2.300 m.s.n.m., tiene unos 100 km de largo y 80 km de ancho aproximadamente, abarcando un área aproximada de 3.100 km<sup>2</sup>. El núcleo del Salar, donde se ubican las faenas extractivas de salmuera, posee una superficie aproximada de 1.100 km<sup>2</sup>, y está rodeado por una zona marginal y zona de transición de unos 2.000 km<sup>2</sup> de extensión aproximadamente (ver línea Base de Geología y Geomorfología).

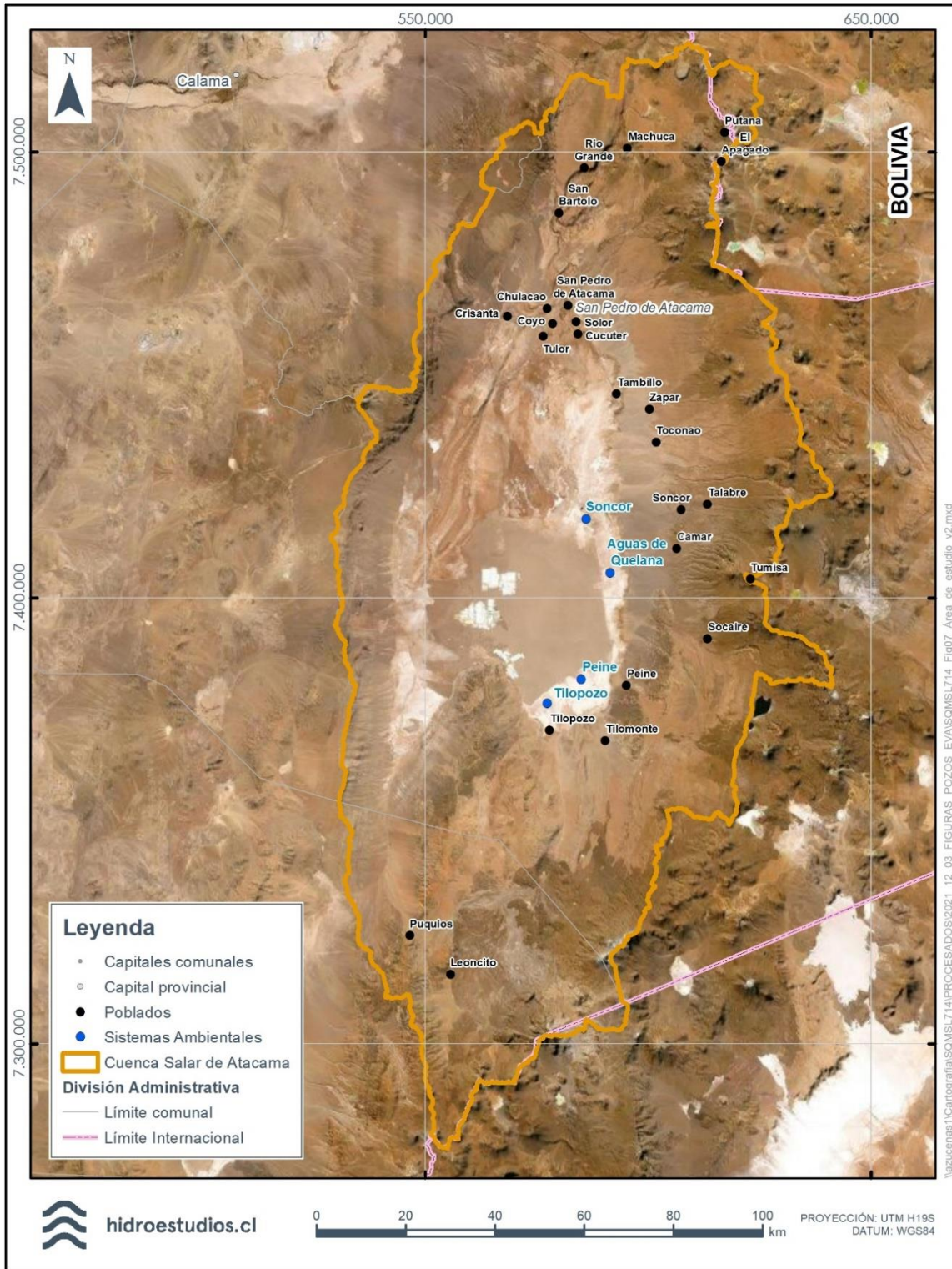
En la zona marginal del Salar de Atacama se han identificado cinco sistemas con valor ambiental, los que de norte a sur son: Sistema Soncor, Sistema Aguas de Quelana, Sistema Peine, Sistema Tilopozo (Lagunas La Punta y La Brava) y Sistema de Vegetación Borde Este.

El valor ambiental de estos sistemas está vinculado a la diversidad biológica, así como a la presencia y abundancia de especies silvestres en estado de conservación. Estos hábitats dependen de la ocurrencia de un nivel freático somero y la presencia de cuerpos lagunares, algunos estables y otros estacionales, en la zona de afloramiento de la interfaz salina.

Con base en lo anterior, la delimitación del sector estudiado en la presente línea de base corresponde a la totalidad de la cuenca del Salar de Atacama, la que se ha determinado considerando la dinámica de los sistemas de interés ambiental y el carácter regional que tiene la componente hidrología, asociado al comportamiento de las precipitaciones, caudales y la evaporación (ver Figura 4-2).

Por último, es pertinente mencionar que existe una estrecha relación entre los sistemas lagunares y las aguas subterráneas someras de la zona marginal del Salar de Atacama, ya que los sistemas lagunares se alimentan de afloramientos de aguas subterráneas y/o de escurrimientos superficiales generados por afloramientos de agua subterránea. Se puede indicar que estos cuerpos de agua presentan una dependencia con la componente hidrogeológica por sobre la componente hidrológica. Por lo tanto, se ha optado incluir la caracterización de estos sistemas lagunares en la línea base hidrogeología (Capítulo 4.1.10 del presente EIA).

Figura 4-2: Cuenca del Salar de Atacama



Fuente: Elaborado por Hidroestudios.

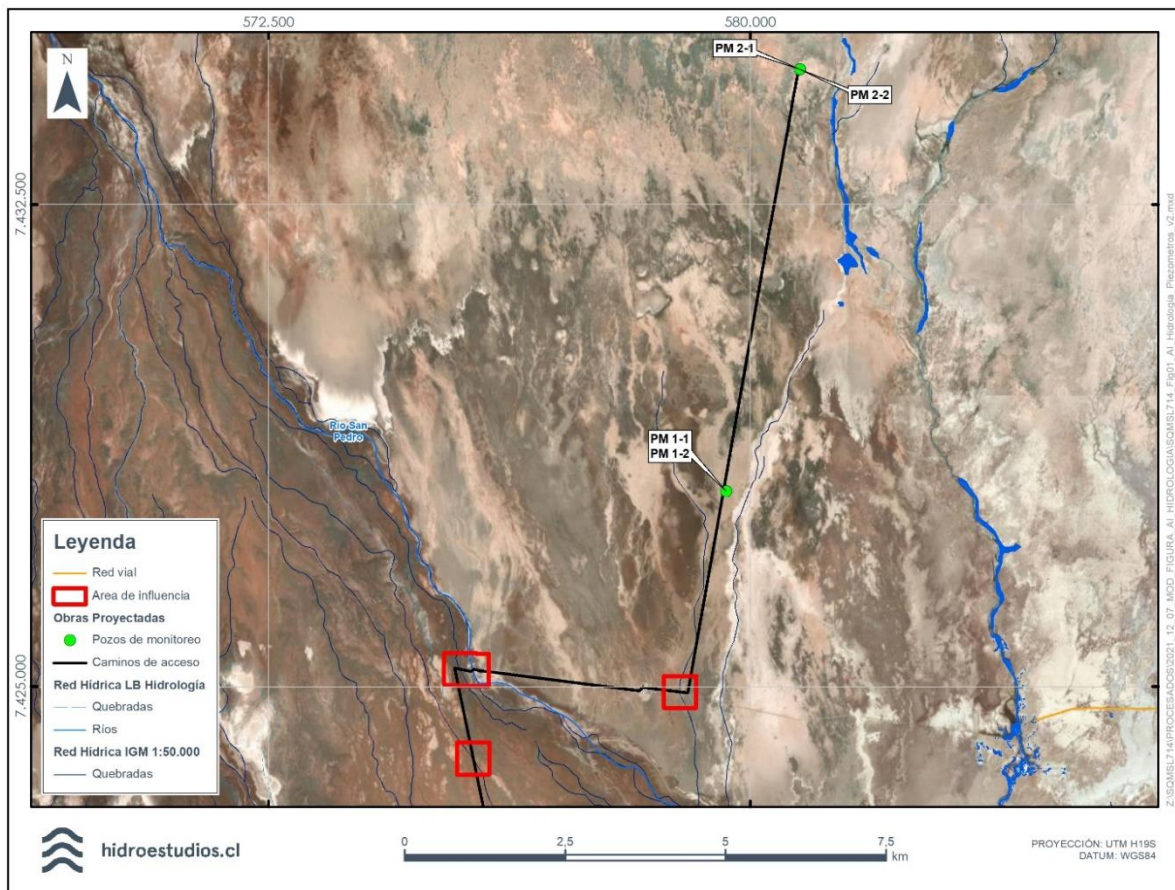


4.3.6.3.2 Área de Influencia

De acuerdo con el literal a) del capítulo 2 del Reglamento del SEIA (RSEIA), el área de influencia se define como “El área o espacio geográfico cuyos atributos, elementos naturales o socioculturales deben ser considerados con la finalidad de definir si el Proyecto o actividad genera o presenta alguno de los efectos, características o circunstancias del artículo 11 de la Ley N° 19.300, o bien para justificar la inexistencia de dichos efectos, características o circunstancias”. Por otra parte, la “Guía para la Descripción del Área de Influencia en el SEIA”, establece que “el área de Influencia deberá considerar el espacio geográfico en el cual se emplazan las partes, obras y/o acciones del Proyecto o actividad, así como aquel comprendido por los elementos del medio ambiente receptores de impactos potencialmente significativos y de sus atributos”.

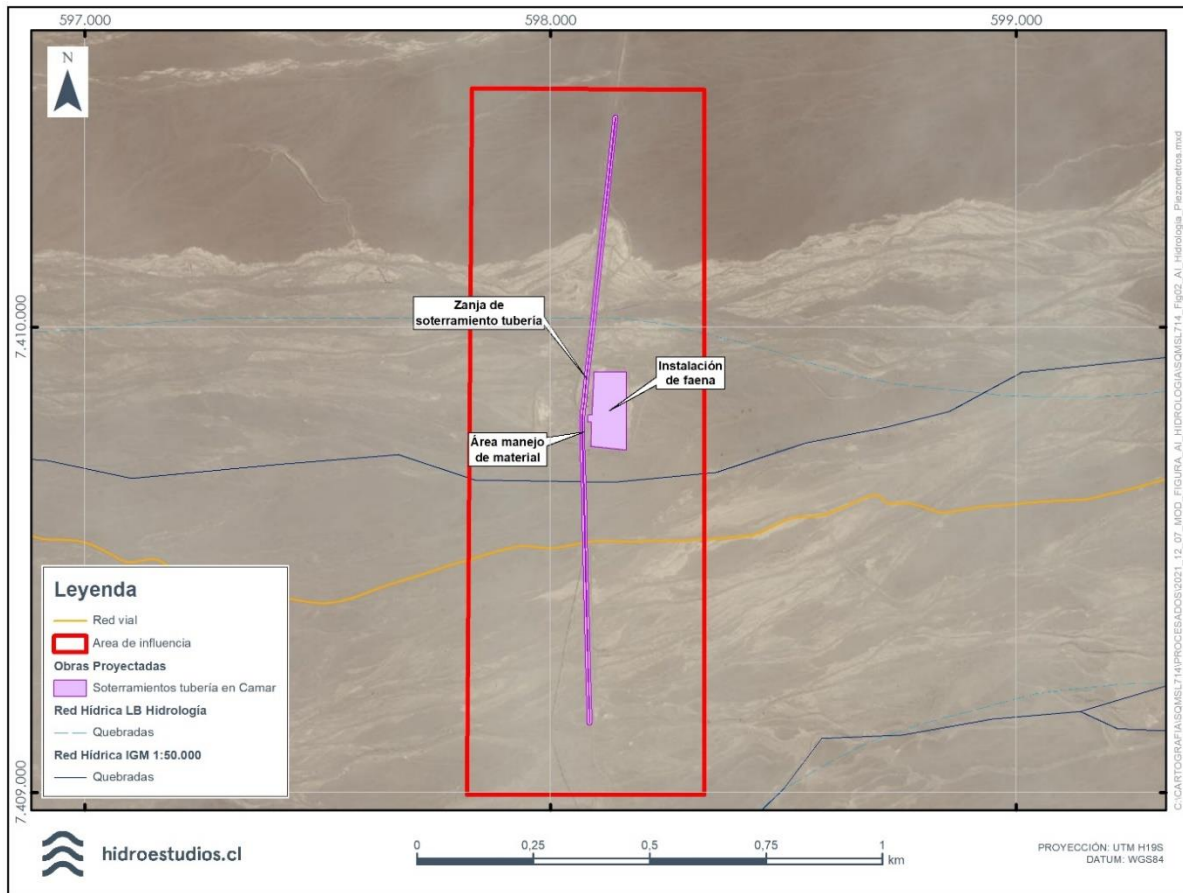
Con base en lo anterior, se definió el área de influencia como las zonas en donde se emplazan las partes, obras y/o acciones del Proyecto que potencialmente pudiesen afectar a los sistemas hídricos de forma directa o indirecta, lo cual corresponde a los cruces entre las obras del Proyecto y el lecho de los cauces definidos en la red drenaje de la Dirección General de Aguas (DGA). La Figura 4-3 y Figura 4-4 presentan el área de influencia de la componente hidrología.

Figura 4-3: Área de influencia definida para la componente Hidrología, sector pozos de monitoreo



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-4: Área de influencia definida para la componente Hidrología, sector tubería



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.6.4 Metodología

##### 4.3.6.4.1 Caracterización hidrográfica

Para poder identificar las subcuencas que son posibles de distinguir a través de la red hidrográfica del Instituto Geográfico Militar se realiza un estudio morfométrico con el objetivo de definir la máxima subdivisión de zonas en la cuenca bajo criterios hidrológicos y de relieve. A partir de este análisis se obtiene la delimitación de la cuenca principal, la cual queda a su vez, subdividida en 257 subcuencas o unidades hidrológicas agrupadas en cinco zonas.

##### 4.3.6.4.2 Caracterización de la precipitación

La precipitación en la cuenca del Salar de Atacama ocurre principalmente producto de las masas de aire húmedo provenientes del Océano Atlántico, que ocasionan tormentas en los meses de verano (fenómeno conocido como invierno altiplánico o boliviano).

La caracterización de la precipitación que cae en la cuenca del Salar de Atacama se realiza a partir de los registros de lluvia en estaciones meteorológicas que se emplazan dentro de ella.

Para la caracterización de la superficie cubierta por nieve se definió las superficies cubiertas por nieve con base en la estimación del índice de nieve por diferencia normalizada (NDSI), el cual relaciona 2 de las bandas espectrales Verde (B3) y la de Onda Corta Infrarroja SWIR (B11), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Índice de nieve por diferencia normalizada (NDSI)} = \frac{\text{Banda3} - \text{Banda11}}{\text{Banda3} + \text{Banda11}}$$

Dado que la disponibilidad de imágenes Sentinel-2 solo abarca desde mediados de 2015, se seleccionaron imágenes desde 2016 hasta diciembre del 2019, obteniendo una imagen por mes, para aquellos meses en los que no había nubosidad que dificultase la visión de la superficie terrestre. En el caso de las fechas estudiadas, se correlacionaron los eventos importantes de precipitación ocurridos en la estación invernal, con temperaturas promedio cerca de 0°C en estaciones relativamente elevadas de la zona, para seleccionar aquellas imágenes que permitieran establecer una superficie máxima cubierta por nieve.

#### 4.3.6.4.3 Caracterización de los escurrimientos

En la cuenca del Salar de Atacama es posible identificar quebradas y cauces, los que en general poseen flujo esporádico con dirección al núcleo del salar. Los cauces más importantes y con escurrimiento permanente corresponden a los ríos San Pedro y Vilama, ambos emplazados en la parte norte de la cuenca. El resto de los cauces superficiales se desarrollan fundamentalmente en el borde este y sur del Salar de Atacama, los que en su mayoría sólo presentan flujo ante eventos de precipitación importantes, mientras que otros presentan un caudal permanente en ciertos tramos de cauce, cuya alimentación proviene desde las aguas subterráneas que se infiltran en la parte alta de la cuenca, afloran en la parte media y que nuevamente infiltran al llegar a la zona aluvial.

La escorrentía ocurre principalmente en las zonas altas de la cuenca y eventualmente alcanza las zonas más bajas cuando los eventos de precipitación son importantes. En general el caudal sobrante se infiltra hacia la zona más baja; por el norte, principalmente a través de los abanicos aluviales del río San Pedro y Vilama, por el este y sur, a través de los depósitos aluviales que rodean la zona marginal.

La caracterización de la escorrentía superficial en la cuenca del Salar de Atacama se realiza a partir de los registros en estaciones de propiedad de la DGA.

#### 4.3.6.4.4 Caracterización de la evaporación

La caracterización de la evaporación en la cuenca del Salar de Atacama se realizó a partir de los registros en estaciones meteorológicas que se emplazan dentro de ella, tanto de SQM Salar como de DGA, para luego calcular la evaporación desde superficie de agua libre de la zona y finalmente incluir el efecto de la salinidad.

#### 4.3.6.4.5 Derechos de agua superficiales

Para el análisis de los derechos de aguas superficiales de la cuenca del Salar de Atacama, se llevó a cabo una revisión de estudios hidrológicos realizados en la zona, junto a la información contenida en el Catastro Público de Aguas (CPA) de la DGA y la Biblioteca CIREN.

#### 4.3.6.5 Resultados

##### 4.3.6.5.1 Caracterización hidrográfica

La cuenca del Salar de Atacama se define como una cuenca endorreica, en donde la escorrentía superficial, originada en las partes altas de la cuenca, escurre a través de quebradas, ríos o vertientes que se infiltran, escurriendo de forma subsuperficial y subterráneamente en dirección hacia el Salar ubicado en el depocentro de la cuenca.

La escorrentía superficial se encuentra condicionada por la morfología de la cuenca del Salar de Atacama, por lo cual, es necesario realizar un análisis que identifique en mayor detalle la zona, para así determinar de forma precisa el comportamiento de los flujos superficiales.

En el estudio IDAEA-CSIC (2017) se realizó una delimitación de la cuenca (estudio morfométrico) con el objetivo de definir la máxima subdivisión de zonas en la cuenca bajo criterios hidrológicos y de relieve. Este estudio definió 257 subcuencas o unidades hidrológicas agrupadas en cinco zonas, de acuerdo con lo indicado en la Tabla 4-1 y en la Figura 4-5. De esta manera, la superficie de la cuenca del Salar de Atacama sería de 16.998 km<sup>2</sup>.

**Tabla 4-1: Características de zonas morfométricas del Salar de Atacama**

<b>Zona Núcleo</b>	
Superficie: 1.328,1 km <sup>2</sup>	N° Unidades: 1
Se caracteriza por presentar poca variación altitudinal, siendo prácticamente una superficie totalmente plana, sin escorrentía superficial durante todo el año. La litología de esta zona es prácticamente costra salina de Cloruro de Sodio. Se considera que esta superficie representa la cota más baja de la cuenca.	
<b>Zona Marginal</b>	
Superficie: 1.648 km <sup>2</sup>	N° Unidades: 4
Se caracteriza por presentar gradientes topográficos muy bajos, sin escorrentía superficial durante todo el año, salvo por el Canal de Burro Muerto originado por la surgencia de agua subterránea. La litología de esta zona es fundamentalmente de tipo carbonatada, sulfatada, clorurada y detrítica tipo arena fina, limo y arcilla más materia orgánica, con contenidos de humedad perceptibles en una imagen satelital producto de niveles someros de agua subterránea, lo que en algunos sectores puede justificar la presencia de cuerpos lagunares debido a la dinámica con la interfaz agua-salmuera.	
<b>Zona Aluvial</b>	
Superficie: 2.219,4 km <sup>2</sup>	N° Unidades: 14
Se caracteriza por presentar gradientes topográficos bajos a medios, sin escorrentía superficial durante la mayor parte del año, salvo durante eventos de crecidas. La litología de esta zona es de tipo detrítico aluvial y en pequeñas proporciones de tipo eólico. En esta zona, la escorrentía proveniente de las subcuencas se infiltra recargando los acuíferos asociados.	
<b>Zona de Subcuencas</b>	
Superficie: 11.550,4 km <sup>2</sup>	N° Unidades: 222
Presenta dos dominios divididos por un eje norte sur: la subzona Andina (este) se caracteriza por presentar gradientes topográficos medios a altos, con escorrentía superficial permanente o intermitente durante el año. En esta subzona se encuentran las quebradas y ríos que recargan el Salar, cuyo recurso proviene de las precipitaciones en las zonas altas y medias de la cuenca. En la subzona	

---

Domeyko (oeste) los gradientes son generalmente altos, sin escorrentía permanente durante todo el año, salvo en eventos de precipitación considerables.

---

#### Zona Arreica

---

Superficie: 252,3 km<sup>2</sup>

N° Unidades: 16

---

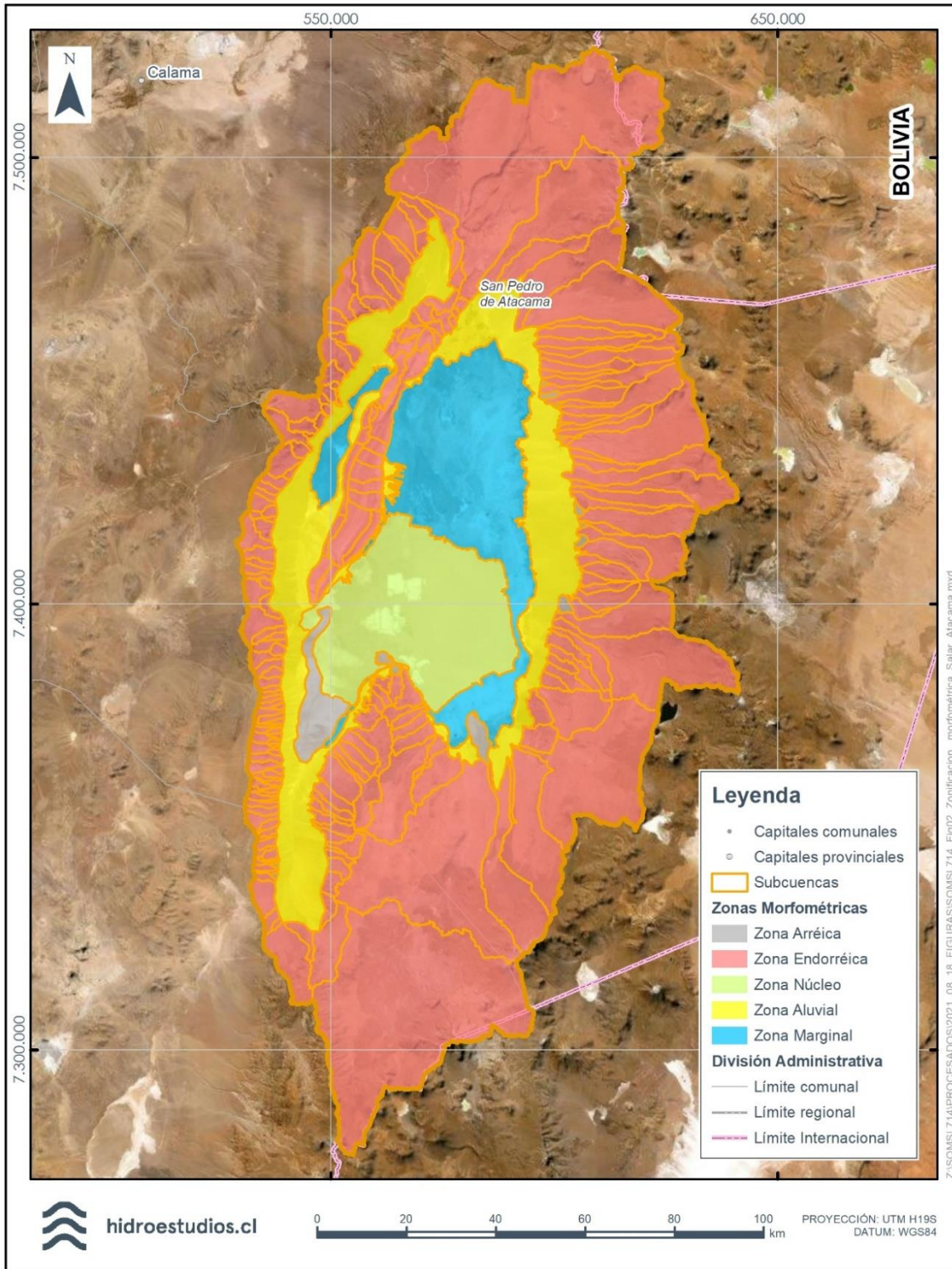
Se caracteriza por presentar características topográficas y litológicas combinadas que impiden ser agrupadas en la clasificación anterior y, a su vez, no permiten la generación de algún tipo de escorrentía durante el año.

---

*Fuente: Modificado de IDAEA-CSIC (2017).*



Figura 4-5: Zonificación morfométrica del Salar de Atacama



Fuente: Modificado de IDAEA-CSIC (2017).

Con base en la delimitación obtenida del análisis morfométrico, y considerando la hidrografía del Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:50.000, en la Figura 4-6 se muestra la red hidrográfica principal de la cuenca del Salar de Atacama.

Los principales ríos de la cuenca son los ríos San Pedro y Vilama, que escurren con dirección suroeste en la parte norte de la cuenca y presentan un escurrimiento permanente. Los principales tributarios del río San Pedro son el río Grande y el río Salado, mientras el principal tributario del Vilama es el río Puritama. Ambos ríos descargan en el Salar en las cercanías de la localidad de San Pedro de Atacama.

En el margen este de la cuenca es posible identificar numerosas quebradas, las cuales tienen una marcada orientación de este a oeste, son prácticamente paralelas entre sí y presentan áreas aportantes comparativamente menores que la de los ríos San Pedro y Vilama. Algunas de las quebradas presentan escurrimiento permanente en las zonas más altas, dado que funcionan como vertientes que descargan agua subterránea. Entre las quebradas que poseen escurrimiento permanente se pueden mencionar la quebrada de Zapar, Hamar, Potor, Aguas Blancas, Camar, Socaire, Peine, Talabre, Jerez.

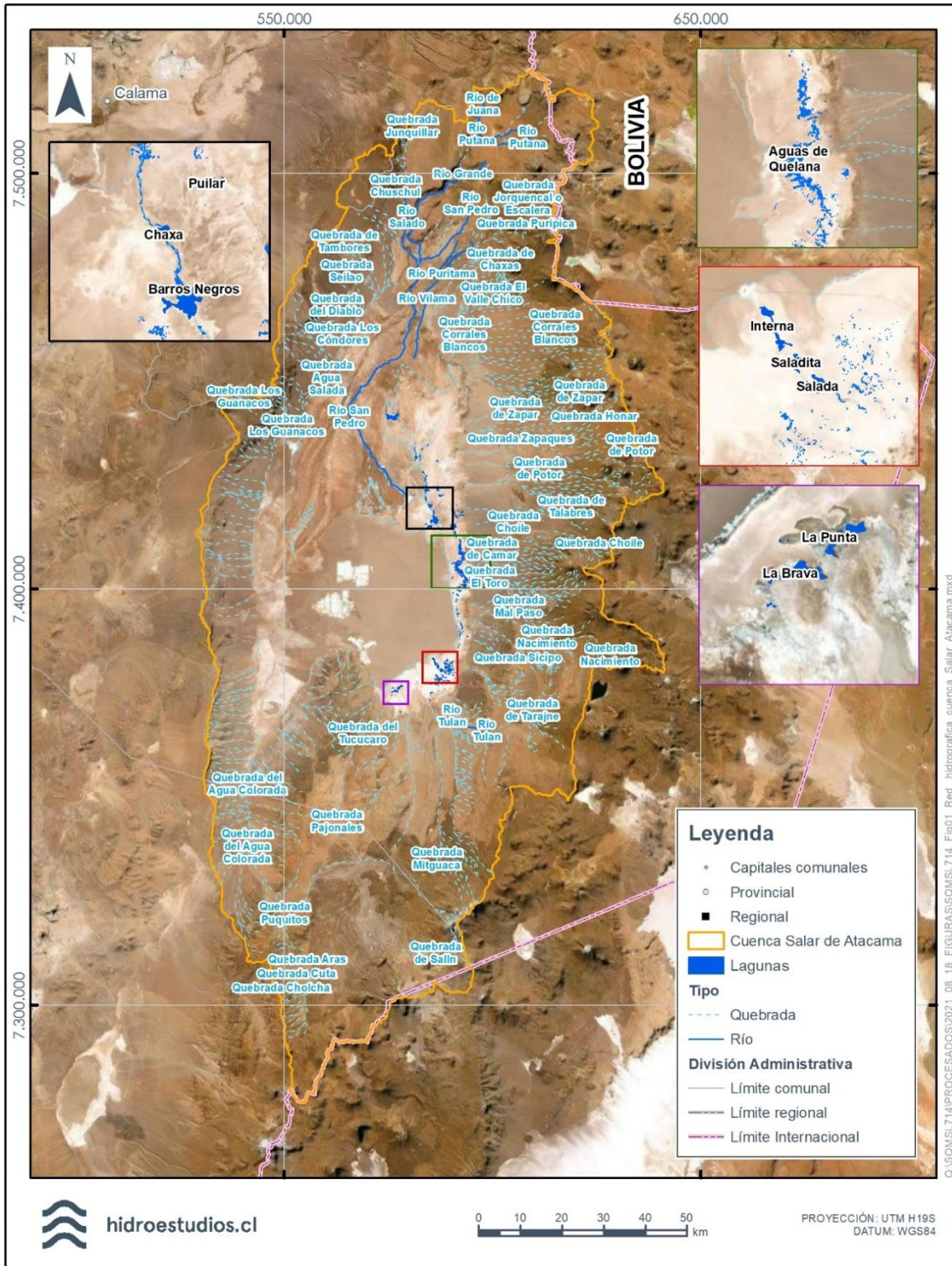
En el suroeste de la cuenca destaca la quebrada del Agua Colorada, que se orienta de sur a norte hasta llegar al Salar. En su transcurso conecta con numerosas quebradas paralelas sin nombre ubicadas en la pampa Agua Amarga y la pampa Palo Blanco. El sector oeste de la cuenca, denominado el Llano de la Paciencia, destaca la quebrada Agua Salada, la que sigue un curso paralelo a la Cordillera de Domeyko y se orienta de norte a sur hasta desaparecer.

La zona Marginal presenta numerosos sistemas lacustres (ver Figura 4-6), entre los que destacan, en el sector sur, el sistema Tilopozo que contiene las lagunas La Punta y La Brava y el sistema Peine que contiene las lagunas Salada y Saladita. En la zona de transición este y/o zona marginal al este del Salar se encuentran los sistemas lacustres Soncor conformado por las lagunas Chaxa, Puilar y Barros Negros y el sistema Aguas de Quelana. Finalmente, en el sector norte se encuentran las lagunas Baltinache, de Cejar y Tebinquinche.

En el depocentro de la cuenca se encuentra el salar mismo, que corresponde a un conjunto de depósitos salinos, los cuales contienen la salmuera que es explotada por las empresas SQM Salar y Albemarle.



Figura 4-6: Red hidrográfica de la Cuenca Salar de Atacama



Fuente: Hidroestudios, 2021.



#### 4.3.6.5.2 Caracterización de las precipitaciones

La precipitación en la cuenca del Salar de Atacama se produce principalmente debido a las masas de aire húmedo provenientes del Océano Atlántico, que ocasionan precipitaciones durante los meses de verano (fenómeno conocido como invierno altiplánico). No obstante, durante los meses de invierno es posible identificar algunos eventos de precipitación, de menor magnitud, cuyo origen está asociado a las masas de aire húmedo provenientes del Pacífico.

Este comportamiento climático deriva en la definición del año hidrológico a partir de noviembre, según la curva de variación estacional (ver capítulo 4.3.6.5.2.3), donde un año hidrológico determinado se define iniciando en el mes de noviembre de ese año hasta octubre del año calendario siguiente.

##### 4.3.6.5.2.1 Estaciones meteorológicas

Se identificaron las estaciones meteorológicas con registros de precipitación existentes en la cuenca del Salar de Atacama (ver Tabla 4-2 y Figura 4-7). Estas estaciones pluviométricas son administradas por la Dirección General de Aguas (DGA), la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Albemarle y SQM Salar. Las estaciones Imilac, El Tatio, Paso Jama y Paso Sico, se localizan muy cercanas fuera de los márgenes de la cuenca del Salar de Atacama, sin embargo, se consideraron dentro de la recopilación inicial, ya que son de utilidad para definir las precipitaciones de la cuenca en toda su extensión.

Tabla 4-2: Estaciones pluviométricas en la cuenca Salar de Atacama

Estación	Coordenadas WGS84			Fuente	Periodo de registro
	Este (m)	Norte (m)	Altura (m.s.n.m.)		
Camar	606.057	7.410.866	2.721	DGA	1979-2020
Imilac	521.881	7.327.295	3.000	DGA	1974-1977
El Tatio	601.295	7.527.990	4.329	DGA	1977-2020
Monturaqui	557.103	7.307.450	3.430	DGA	1974-1979
Peine	595.137	7.380.682	2.390	DGA	1974-2020
Río Grande	585.548	7.494.766	3.217	DGA	1977-2020
San Pedro de Atacama	581.987	7.466.178	2.445	DGA	1959-2019
Socaire	613.092	7.390.963	3.248	DGA	1974-2019
Talabre	613.530	7.421.080	3.255	DGA	1995-2020
Toconao Experimental	602.388	7.434.809	2.500	DGA	1975-2007
Toconao Retén	601.191	7.434.294	2.460	DGA	1975-1991
Paso Jama	632.989	7.464.136	4.825	DGA	2016-2018
Paso Sico	658.720	7.364.239	4.323	DGA	2016-2020
Toconao Pueblo	601.777	7.435.573	2.492	DGA	2016-2020
Toconao Quebrada 1	621.564	7.431.858	3.990	DGA	2016-2020

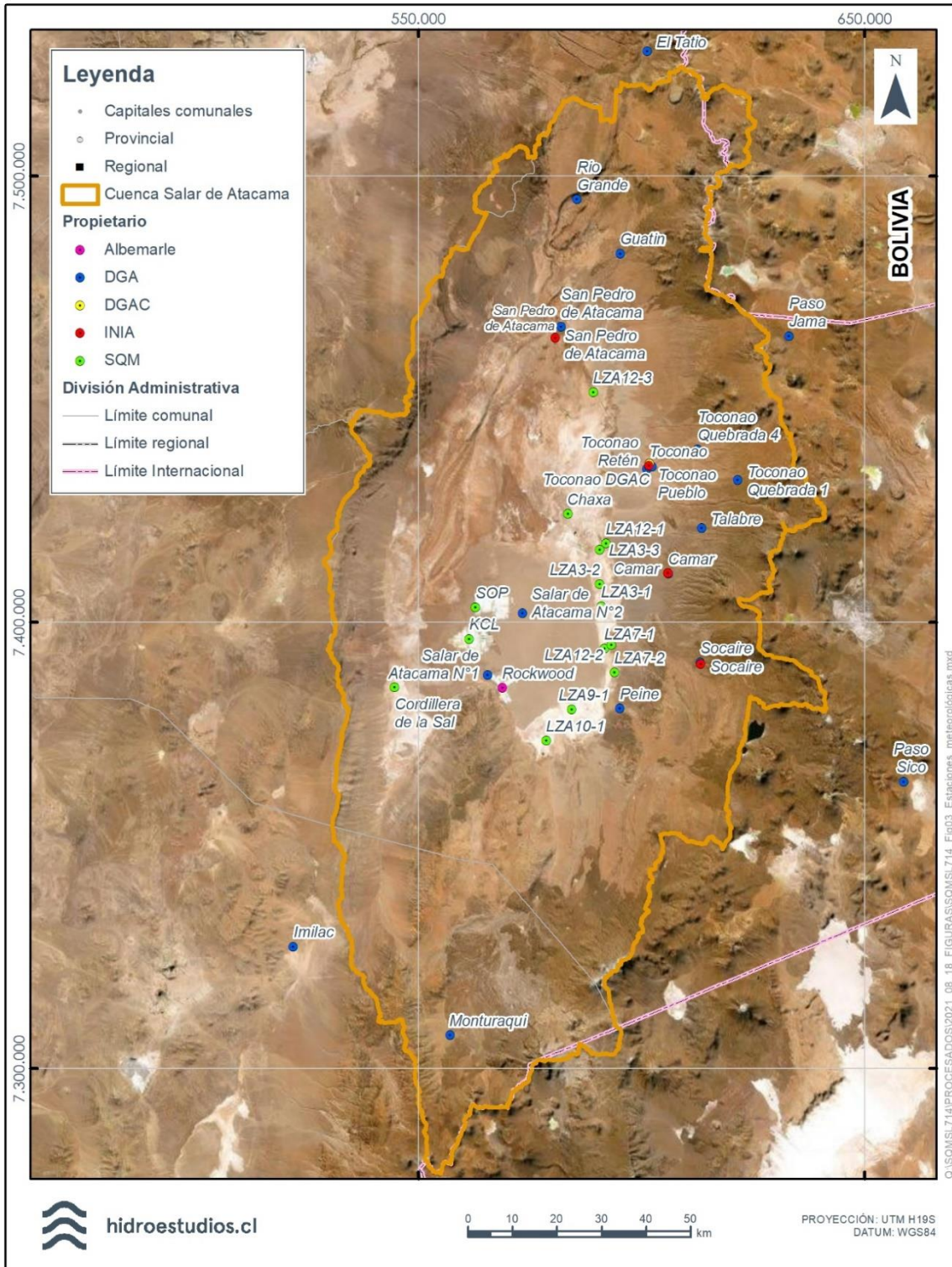
Tabla 4-2: Estaciones pluviométricas en la cuenca Salar de Atacama

Estación	Coordenadas WGS84			Fuente	Periodo de registro
	Este (m)	Norte (m)	Altura (m.s.n.m.)		
Toconao Quebrada 4	612.592	7.438.698	3.437	DGA	2016-2020
Toconao DGAC	601.775	7.435.530	2.495	DGAC	2013-2018
Camar	605.881	7.411.033	2.694	INIA	2017-2020
San Pedro de Atacama	580.648	7.463.770	2.416	INIA	2010-2020
Socaire	613.252	7.390.661	3.357	INIA	2010-2020
Toconao	601.607	7.435.045	2.478	INIA	2010-2020
Chaxa	583.530	7.424.240	2.307	SQM	1999-2020
KCL	561.376	7.396.240	2.300	SQM	2005-2020
Cordillera de la Sal	544.617	7.335.860	2.363	SQM	2017-2020
SOP	562.717	7.403.324	2.300	SQM	2011-2020
LZA10-1	578.689	7.373.409	2.304	SQM	2015-2020
LZA7-1	591.697	7.394.060	2.301	SQM	2015-2020
LZA7-2	593.889	7.388.689	2.302	SQM	2015-2020
LZA3-1	590.919	7.403.563	2.300	SQM	2015-2020
LZA3-2	590.646	7.408.473	2.301	SQM	2015-2020
LZA12-2	593.220	7.394.904	2.306	SQM	2015-2020
LZA12-3	589.174	7.451.500	2.351	SQM	2015-2020
LZA12-1	592.021	7.417.657	2.309	SQM	2015-2020
LZA3-3	590.638	7.416.254	2.302	SQM	2015-2020
LZA9-1	584.312	7.380.450	2.301	SQM	2015-2020
Rockwood	568.771	7.385.238	2.300	Albemarle	1997-2020

Fuente: Hidroestudios, 2021.

A fin de generar una base representativa de la precipitación en la cuenca se seleccionaron 11 estaciones del conjunto de estaciones disponibles. La selección se realizó con base en su distribución dentro de la cuenca y considerando la extensión de sus registros (SQM, Actualización Plan de Alerta Temprana y Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama, 2020) y corresponden a las estaciones Camar, Chaxa, El Tatio, KCL, Peine, San Pedro de Atacama, Socaire, Rockwood, Río Grande, Talabre y Toconao Experimental. Además de estas estaciones se incluyó la estación Monturaqui, que si bien presenta un registro escaso solo entre los años 1974 a 1979, fue incluida puntualmente para representar las precipitaciones en la zona extremo sur de la cuenca debido a la baja densidad de estaciones en esta área.

Figura 4-7: Ubicación de las estaciones pluviométricas

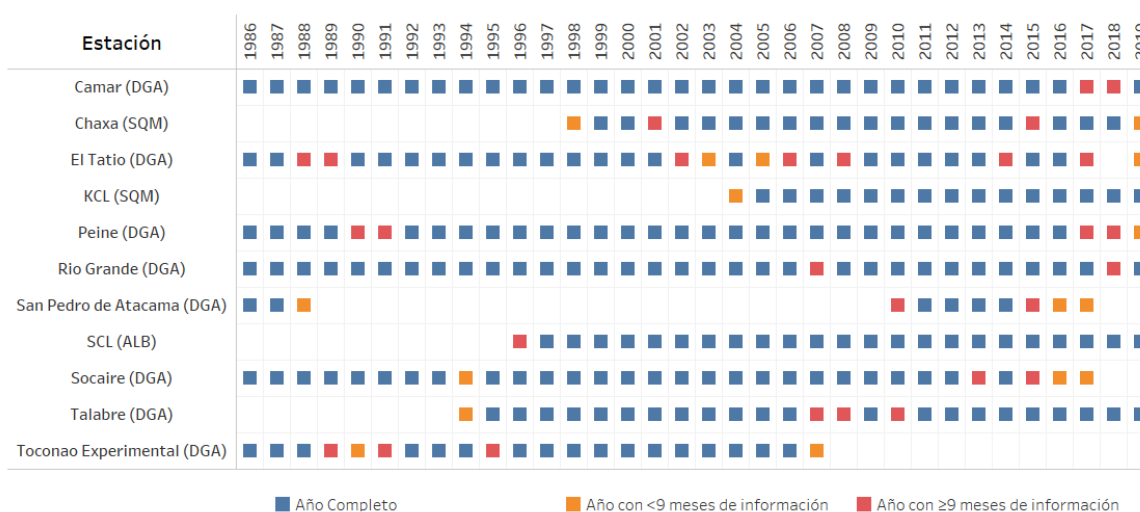


Fuente: Hidroestudios, 2021.

En la Figura 4-8 se presenta un gráfico que muestra la disponibilidad de información histórica de precipitaciones mensuales en estaciones meteorológicas. Se han seleccionado aquellos datos a partir del año hidrológico 1986 en adelante debido a que el registro histórico comienza a ser más consistente a partir de esa fecha. De este modo, se cuenta con hasta 35 años de registro para las estaciones más antiguas.

Los años hidrológicos fueron clasificados según la cantidad de meses con información completa. De este modo, un año completo con la totalidad de meses con información se representa en color azul, año con más de nueve meses de información se representa en color naranja y finalmente los años que poseen menos de nueve meses con registros de datos de precipitación se grafican en color rojo.

Figura 4-8: Disponibilidad de información según año hidrológico en cada estación meteorológica



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.6.5.2.2 Precipitaciones anuales

El análisis de precipitación anual se basó en el cálculo de los estadísticos de las 11 estaciones meteorológicas seleccionadas, para el periodo 1986 a 2020. La Tabla 4-3 presenta los estadígrafos principales de las series de precipitación anual, se observa que las menores precipitaciones medias anuales se registran en las estaciones ubicadas en la zona del núcleo (KCL y Rockwood). En la parte norte de la cuenca se observa que las estaciones El Tatio y Río Grande presentan la mayor magnitud de precipitación media anual. Por otro lado, las precipitaciones en el resto de las estaciones ubicadas en la parte alta de la cuenca son de una magnitud menor que las estaciones ubicadas hacia el norte.

En la Figura 4-9, Figura 4-10 y Figura 4-11 se presentan las series de tiempo de la precipitación anual en las estaciones KCL (2.300 m.s.n.m.), Peine (2.390 m.s.n.m.) y Río Grande (3.217 m.s.n.m.), respectivamente. Se observa que existe una variación cíclica en la precipitación, con periodos extensos de años secos seguidos de años lluviosos. Lo anterior se explica por el origen amazónico de las precipitaciones, que varía en intensidad de acuerdo con los ciclos ENSO (niño-niña) (Houston, 2006). Por otro lado, si bien se observa coincidencia en los períodos húmedos y secos entre las estaciones, las magnitudes son dispares, lo que se explica por

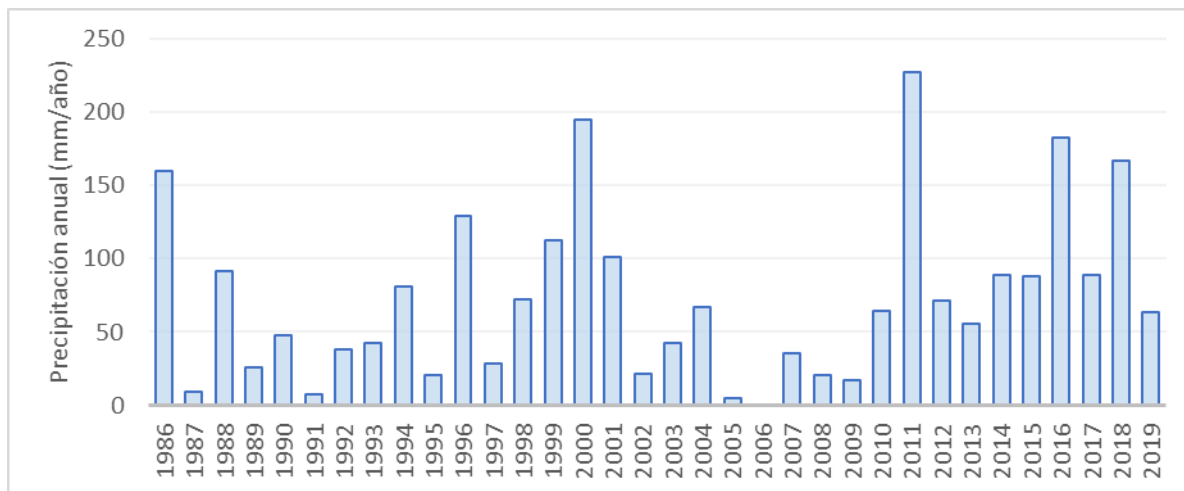
el carácter convectivo de las precipitaciones (Houston, 2006). Finalmente, se puede destacar que las precipitaciones tienden a aumentar con la altura.

Tabla 4-3: Estadígrafos de series de precipitación anual

Estación	Promedio (mm)	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	Desviación estándar (mm)
Camar (DGA)	39	2	221	46
Chaxa (SQM)	18	0	124	30
El Tatio (DGA)	116	0	422	110
KCL (SQM)	5	0	33	10
Peine (DGA)	18	0	79	21
San Pedro de Atacama (DGA)	73	0	227	58
Socaire (DGA)	11	0	114	28
Rockwood (Albemarle)	14	0	86	22
Rio Grande (DGA)	30	0	126	38
Talabre (DGA)	52	0	197	65
Toconao Experimental (DGA)	15	0	84	24

Fuente: Hidroestudios, 2021.

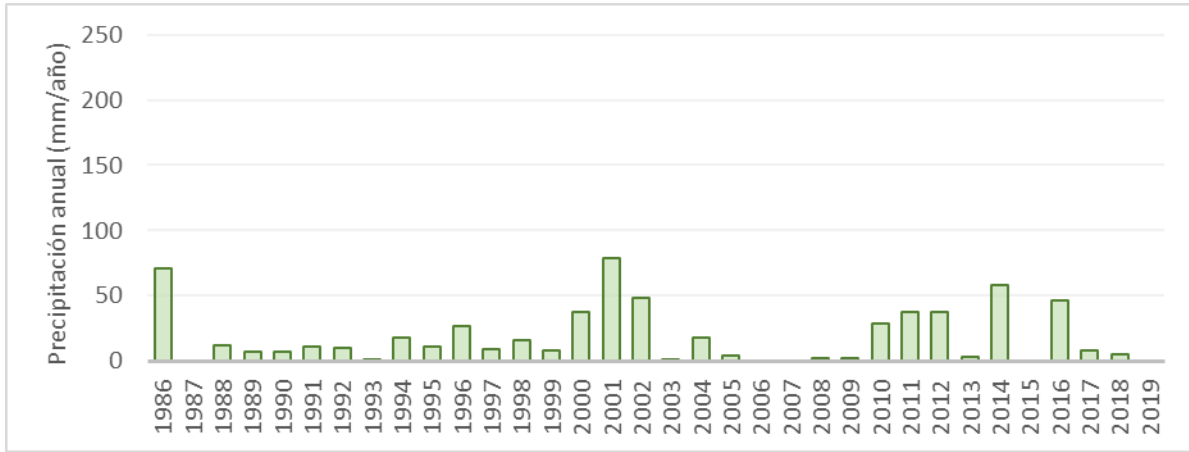
Figura 4-9: Serie de precipitación anual, estación meteorológica Río Grande



Fuente: Hidroestudios, 2021.

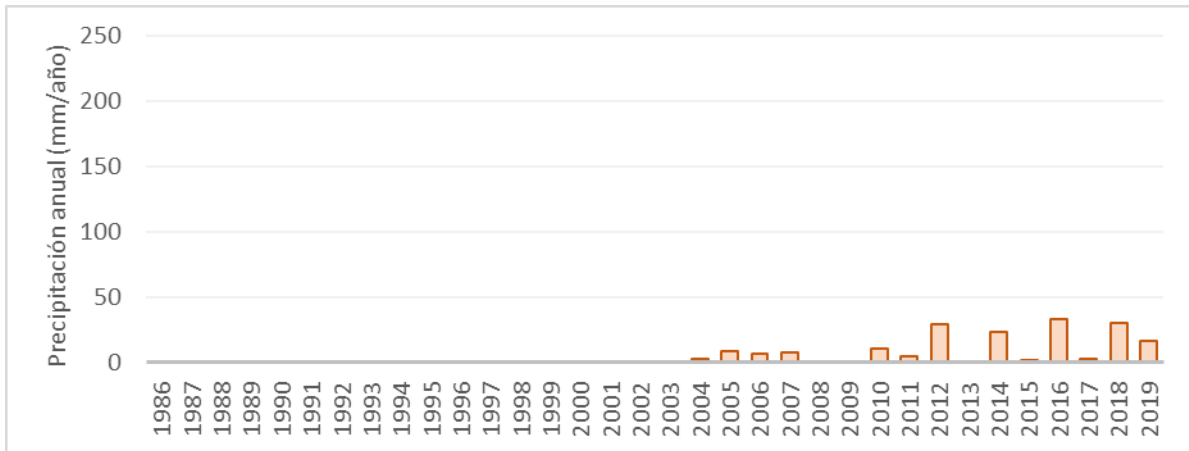


Figura 4-10: Serie de precipitación anual, estación meteorológica Peine



Fuente: Hidroestudios, 2021.

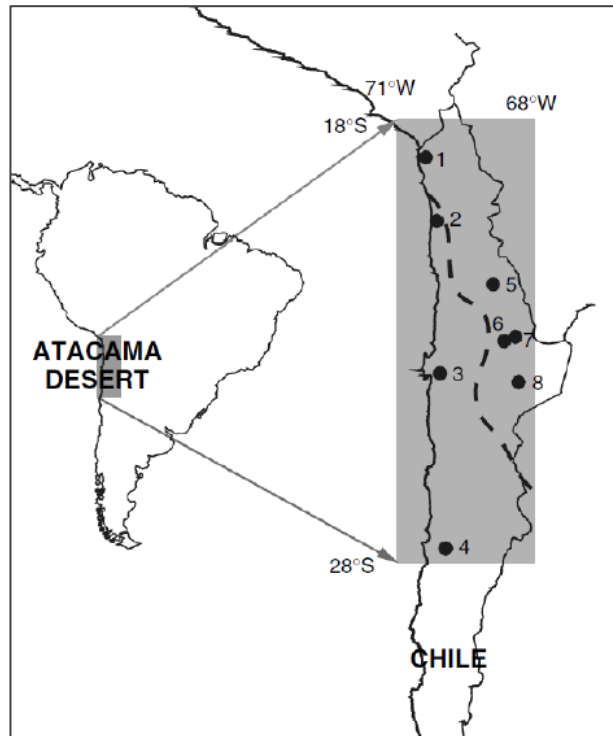
Figura 4-11: Serie de precipitación anual, estación meteorológica KCL



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Houston (2006) dividió el norte de Chile en un sector con escasas precipitaciones medias, asociadas a eventos de invierno y una zona de mayores precipitaciones asociada a eventos convectivos, que ocurren durante el verano (ver Figura 4-12), los que son provocados por corrientes de aire húmedo provenientes del Atlántico (el llamado invierno altiplánico). Esta división es consistente con los registros de la estadística de precipitación analizada, en que la parte media de la cuenca muestra precipitaciones bajas, mientras que en la parte alta de la cuenca las precipitaciones son significativas, pudiendo llegar a valores que superan los 130 mm por año.

Figura 4-12: Mapa de los dos tipos de comportamiento de las precipitaciones



Fuente: Modificado de Houston (2006).

Nota: estaciones 1 a 4 exhiben un comportamiento dominado por las lluvias invernales, mientras que las estaciones 5 a la 8 se encuentran dominadas por las lluvias del verano asociadas al invierno altiplánico. Las estaciones 6 y 7 corresponden a las estaciones Toconce y Linzor estudiadas en el presente informe.

4.3.6.5.2.3 Precipitaciones mensuales

La Tabla 5 4 resume las precipitaciones medias mensuales para el período comprendido entre los años 1986 y 2020. Los resultados obtenidos reflejan que el régimen de precipitaciones está influenciado principalmente por el invierno altiplánico, con una temporada húmeda durante los meses de verano, presentando la influencia del invierno continental en menor magnitud.

Por otro lado, se puede observar una relación entre la magnitud de las precipitaciones con respecto a la ubicación del punto de medición, donde a mayor elevación, y en las zonas ubicadas al noreste de la cuenca, se registran mayores precipitaciones. Lo anterior es ejemplificado en la Figura 4-13, que muestra la precipitación media mensual de las estaciones KCL (2.300 m.s.n.m.), Peine (2.390 m.s.n.m.) y Río Grande (3.217 m.s.n.m.), donde esta última es la que registra los mayores montos de precipitación.

Tabla 4-4: Precipitación media mensual para el periodo 1986 a 2020

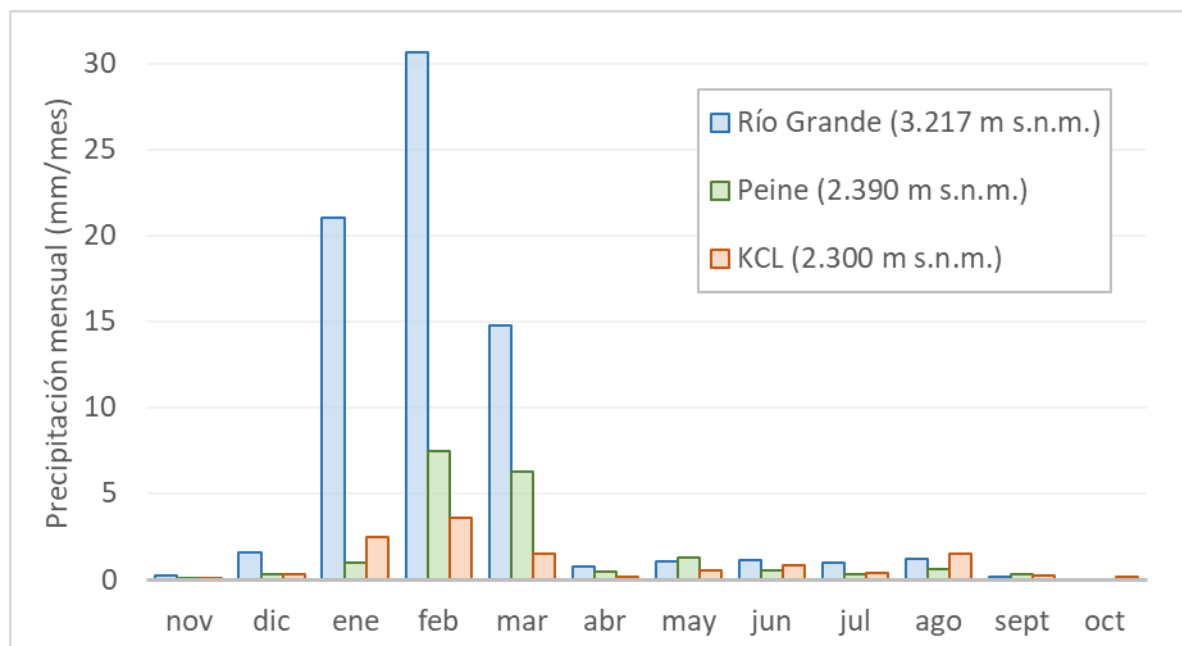
Estación	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct
Camar (DGA)	0.2	0.8	9.1	16.5	8.3	0.6	1.0	0.4	0.7	1.5	0.5	0.1

Tabla 4-4: Precipitación media mensual para el periodo 1986 a 2020

Chaxa (SQM)	0.2	0.5	5.7	14.3	5.0	1.4	1.1	0.5	0.7	0.2	0.1	0.0
El Tatio (DGA)	0.5	5.5	42.5	49.0	26.7	0.9	2.4	2.3	1.2	1.8	0.5	0.0
KCL (SQM)	0.1	0.3	2.5	3.6	1.5	0.2	0.5	0.8	0.4	1.5	0.2	0.1
Monturaqui (DGA)	0.0	0.3	1.0	7.5	6.3	0.4	1.3	0.5	0.3	0.6	0.3	0.0
Peine (DGA)	0.2	1.6	21.0	30.6	14.8	0.8	1.0	1.1	1.0	1.2	0.2	0.0
San Pedro de Atacama (DGA)	1.5	0.0	6.8	26.1	6.7	0.1	0.8	1.1	0.5	0.6	0.1	0.0
Socaire (DGA)	0.0	0.1	2.6	4.6	7.2	0.5	0.7	1.2	1.2	1.4	0.2	0.1
Rockwood (Albemarle)	0.4	0.8	6.4	13.2	8.5	0.7	1.9	0.5	0.9	0.9	0.5	0.0
Río Grande (DGA)	0.0	0.2	16.4	26.9	16.9	1.8	3.2	1.8	2.9	2.8	0.4	0.0
Talabre (DGA)	0.1	1.8	5.9	8.0	9.5	0.2	0.7	0.3	0.1	0.6	0.1	0.0
Toconao Experimental (DGA)	0.2	0.8	9.1	16.5	8.3	0.6	1.0	0.4	0.7	1.5	0.5	0.1

Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-13: Precipitación mensual en la estacione Río Grande, Peine y KCL



Fuente: Hidroestudios, 2021.

En la Tabla 4-5 se presenta la distribución estacional de las precipitaciones, tomando como referencia dos períodos, el primero representativo del invierno altiplánico, comprendido entre diciembre a marzo, cabe



mencionar que en la cuenca del Salar de Atacama las precipitaciones durante diciembre son de baja magnitud. El segundo periodo es representativo del invierno continental, abarcando los meses de abril a noviembre. Se observa que las precipitaciones se concentran en el primer período, con más del 75 % de las lluvias anuales.

**Tabla 4-5: Porcentaje de distribución temporal de las precipitaciones (%)**

Estación	Dic a Mar	Abr a Nov
Camar (DGA)	87	13
Chaxa (SQM)	86	14
El Tatio (DGA)	93	7
KCL (SQM)	67	33
Monturaqui (DGA)	81	19
Peine (DGA)	92	8
San Pedro de Atacama (DGA)	90	10
Socaire (DGA)	73	27
Rockwood (Albemarle)	83	17
Río Grande (DGA)	82	18
Talabre (DGA)	92	8
Toconao Experimental (DGA)	87	13

*Fuente: Hidroestudios, 2021.*

#### 4.3.6.5.2.4 Precipitaciones máximas diarias

Con los datos base y previo a cualquier relleno o extensión de serie, se ha realizado un análisis de las lluvias diarias, determinando las precipitaciones máximas en 24 horas, resultado que se presenta de la Tabla 4-6 a la Tabla 4-8, indicando en la última columna el máximo registrado por estación. En el análisis se ha excluido la estación Monturaqui, puesto que su registro llega sólo hasta el año 1979.

Respecto de estos resultados es posible señalar que las precipitaciones máximas en 24 horas son mayores en zonas de mayor altitud y menores en el núcleo del salar, donde la altitud se encuentra en torno a los 2.300 m s.n.m. Los mayores registros históricos medidos se presentan en la estación el Tatio, correspondientes a 56, 80 y 88 mm respectivamente.

De igual forma, el número de días con lluvias registradas al año varía considerablemente dentro de la cuenca del salar de Atacama, siendo mayor en las estaciones de mayor altitud, con un valor máximo mayor a 50 días en la estación El Tatio y con una media de 28 días por año. En general, los registros disponibles indican que los días de lluvia al año promedio son menores a 10 (ver Tabla 4-9 a Tabla 4-11).

Tabla 4-6: Precipitaciones máximas en 24 hrs, Período 1986-1997 (mm)

Estación	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Camar (DGA)	15,0	13,0	3,0	19,0	8,0	1,0	3,0	6,0	7,4	15,5	8,0	23,0
Chaxa (SQM)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i
El Tatio (DGA)	24,5	56,0	20,5	14,5	21,0	20,0	16,0	12,5	12,5	46,0	9,0	27,0
KCL (SQM)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i
Peine (DGA)	5,0	23,0	0,0	9,0	5,5	s/i	7,0	2,5	1,5	8,0	5,0	14,0
San Pedro de Atacama (DGA)	22,5	12,5	0,0	11,0	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i
Socaire (DGA)	8,5	12,5	0,0	30,5	7,3	0,8	8,0	4,0	3,5	2,0	9,0	22,5
Rio Grande (DGA)	55,3	22,9	4,5	12,9	14,1	3,6	4,7	7,9	11,2	39,9	8,0	17,5
Talabre (DGA)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	3,0	17,0	17,0
Toconao Experimental (DGA)	19,0	19,0	0,0	10,0	10,0	2,1	1,5	2,0	6,3	10,6	3,0	22,0

Fuente: Hidroestudios, 2021.

Tabla 4-7: Precipitaciones máximas en 24 hrs, Período 1998-2009 (mm)

Estación	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Camar (DGA)	2,0	7,0	16,5	20,0	41,0	5,0	2,0	21,5	6,0	6,5	3,0	4,0
Chaxa (SQM)	s/i	s/i	15,6	20,1	23,4	5,5	3,8	8,1	2,8	0,7	2,8	2,5
El Tatio (DGA)	38,0	50,0	34,0	21,0	17,0	10,0	3,6	15,4	s/i	9,5	17,6	7,0
KCL (SQM)	s/i	s/i	3,2	6,2	12,8	1,6	0,1	0,8	6,6	1,6	7,4	0,8
Peine (DGA)	8,0	6,0	2,0	13,0	40,5	26,1	1,5	5,5	2,0	0,0	0,0	2,5
San Pedro de Atacama (DGA)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i
Socaire (DGA)	14,0	8,5	15,0	12,0	20,0	6,0	3,0	3,0	4,0	0,0	2,0	1,1
Rio Grande (DGA)	13,5	29,1	17,8	28,4	29,5	5,5	24,1	12,5	2,5	s/i	10,1	5,9
Talabre (DGA)	4,0	8,0	35,0	25,0	33,0	16,0	9,0	22,0	8,0	s/i	7,0	1,6
Toconao Experimental (DGA)	2,0	5,5	11,5	23,0	48,0	12,3	2,0	3,5	0,0	9,0	s/i	s/i

Fuente: Hidroestudios, 2021.

Tabla 4-8: Precipitaciones máximas en 24 hrs, Período 2010-2018 (mm)

Estación	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Máx.
Camar (DGA)	2,0	13,5	30,0	15,5	1,0	20,0	10,0	28,0	16,0	41,0
Chaxa (SQM)	0,5	9,4	27,9	25,2	2,2	22,0	1,6	32,3	4,8	32,3
El Tatio (DGA)	8,7	31,6	30,1	26,9	25,5	s/i	s/i	27,1	19,5	56,0
KCL (SQM)	5,1	3,8	4,0	16,8	0,6	9,3	1,6	9,7	2,0	16,8
Peine (DGA)	1,0	10,5	18,5	14,0	3,5	19,5	0,0	33,5	4,5	40,5
San Pedro de Atacama (DGA)	s/i	2,0	12,9	39,4	7,0	10,5	s/i	s/i	s/i	39,4
Socaire (DGA)	0,5	25,0	34,0	19,2	0,5	38,3	s/i	s/i	s/i	38,3
Rio Grande (DGA)	6,1	11,4	55,9	25,5	50,2	27,2	22,9	21,1	19,1	55,9
Talabre (DGA)	11,0	13,0	30,0	47,0	6,0	32,0	0,0	29,0	16,0	47,0
Toconao Experimental (DGA)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	48,0

Fuente: Hidroestudios, 2021.

Tabla 4-9: Número de días con registro de lluvias, considerando años con información completa

Estación	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Camar (DGA)	11	15	2	9	10	2	5	10	4	4	3	10
Chaxa (SQM)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i
El Tatio (DGA)	30	45	12	s/i	29	22	14	38	26	18	9	31
KCL (SQM)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i
Peine (DGA)	9	10	0	3	5	s/i	3	8	1	4	3	5
San Pedro de Atacama (DGA)	s/i	13	0	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i
Socaire (DGA)	11	21	0	7	13	1	5	7	4	s/i	4	6
Rio Grande (DGA)	20	27	5	20	12	6	5	13	8	6	9	17
Talabre (DGA)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	10	14
Toconao Experimental (DGA)	12	13	0	9	s/i	s/i	2	2	s/i	s/i	s/i	6

Fuente: Hidroestudios, 2021.

Tabla 4-10: Número de días con registro de lluvias, considerando años con información completa

Estación	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Camar (DGA)	1	6	7	17	7	5	3	8	7	4	6	3
Chaxa (SQM)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	7	4	s/i	6	s/i	3	s/i
El Tatio (DGA)	7	32	s/i	59	s/i	s/i	s/i	19	s/i	21	s/i	27
KCL (SQM)	s/i	s/i	s/i	21	7	4	1	s/i	3	s/i	s/i	1
Peine (DGA)	2	4	s/i	9	8	5	1	6	3	0	0	1
San Pedro de Atacama (DGA)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i
Socaire (DGA)	1	3	12	s/i	8	7	s/i	9	7	0	5	5
Río Grande (DGA)	7	19	25	40	14	7	7	12	2	s/i	12	6
Talabre (DGA)	3	12	20	32	14	7	7	16	s/i	s/i	s/i	s/i
Toconao Experimental (DGA)	2	9	s/i	11	7	5	2	3	0	1	s/i	s/i

Fuente: Hidroestudios, 2021.

Tabla 4-11: Número de días con registro de lluvias, considerando años con información completa

Estación	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	Prom.
Camar (DGA)	1	10	12	8	4	10	6	s/i	s/i	7
Chaxa (SQM)	1	7	12	8	6	s/i	7	21	8	8
El Tatio (DGA)	s/i	47	49	33	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	28
KCL (SQM)	1	3	2	5	3	8	4	16	4	6
Peine (DGA)	2	9	7	7	1	5	0	s/i	s/i	4
San Pedro de Atacama (DGA)	s/i	s/i	24	10	4	11	s/i	s/i	s/i	10
Socaire (DGA)	1	13	21	9	s/i	8	s/i	s/i	s/i	7
Río Grande (DGA)	4	18	24	13	4	19	8	s/i	s/i	13
Talabre (DGA)	2	s/i	26	15	1	18	0	s/i	s/i	12
Toconao Experimental (DGA)	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	s/i	5

Fuente: Hidroestudios, 2021.

En la Tabla 4-12 se presenta la distribución porcentual de los días con lluvia por mes en un año, para las estaciones El Tatio, Río Grande y Talabre. Este análisis se realiza con las estaciones con mayor número de días de lluvia. En ella se aprecia que los eventos de precipitación se producen con mayor frecuencia en los

meses de enero, febrero y marzo, en donde se concentra más del 75% de los días con lluvia en el año; y con menor frecuencia en los meses de octubre y noviembre.

**Tabla 4-12: Distribución Porcentual de los Días con Lluvia por Mes**

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Camar (DGA)	27,1%	30,1%	20,8%	2,0%	4,0%	4,8%	1,4%	2,4%	1,4%	0,5%	0,7%	4,6%
Chaxa (SQM)	26,3%	32,1%	22,4%	2,1%	3,0%	4,2%	1,7%	2,5%	1,0%	0,4%	0,4%	3,8%
El Tatio (DGA)	22,9%	30,7%	23,0%	3,0%	6,0%	3,2%	3,5%	4,1%	2,7%	0,3%	0,0%	0,7%

Fuente: Hidroestudios, 2021.

Si bien se cuenta con 12 estaciones meteorológicas de una extensión tal que permiten representar a las precipitaciones en la cuenca, su distribución espacial y la ausencia del monitoreo en algunas zonas, hacen necesaria la definición de puntos de amarre que permitan estimar un valor de precipitación media anual para puntos ubicados en los límites de la cuenca y, de esta manera, determinar la precipitación en sectores donde no hay estaciones.

Para la respectiva asignación de valores de precipitación a dichos puntos de amarre, se consideró la aplicación del Índice de Ubicación y Altura (IUA) a las 12 estaciones meteorológicas consideradas junto con los puntos de amarre. El IUA fue definido por CORFO-Amphos 21, (2018) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$IUA = \left( \frac{N - N'}{300} + \frac{E - E'}{200} + Z \right) * \frac{1}{1000}$$

Dónde N es la coordenada Norte en UTM de la estación en m, N' es la coordenada Norte en UTM de referencia (7.000.000 m), E es la coordenada Este en UTM de la estación en m, E' es la coordenada Este en UTM de referencia (350.000 m) y Z es la cota de la estación en m.s.n.m. De esta manera, obteniendo el IUA para las 12 estaciones seleccionadas (Tabla 4-13) y graficando el IUA respectivo contra la precipitación promedio anual por estación (Figura 4-14), se obtiene una función que permite relacionar la precipitación promedio anual de los puntos de amarre en función de su IUA respectivamente (Tabla 4-14).

**Tabla 4-13: Índice de Ubicación y Altura para las estaciones meteorológicas en estudio**

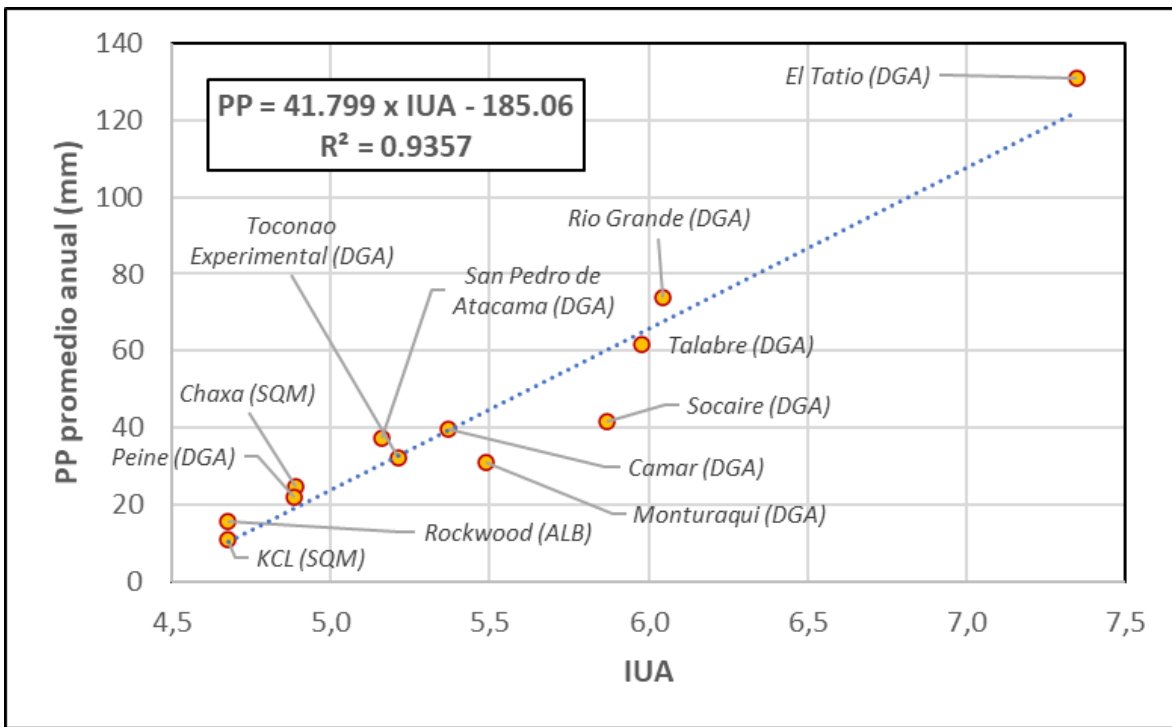
Estación	Coordenadas WGS84 (Huso 19S)			Precipitación media anual SRK (2020) (mm/año)	IUA
	Este (m)	Norte (m)	Altura (m.s.n.m.)		
Camar (DGA)	606.057	7.410.866	2.721	39,4	5,37
Chaxa (SQM)	583.530	7.424.240	2.307	24,7	4,89
El Tatio (DGA)	601.295	7.527.990	4.329	131,0	7,35
KCL (SQM)	561.376	7.396.240	2.300	10,9	4,68
Monturaqui (DGA)	557.103	7.307.450	3.430	31,0	5,49
Peine (DGA)	595.137	7.380.682	2.390	22,0	4,88

Tabla 4-13: Índice de Ubicación y Altura para las estaciones meteorológicas en estudio

Estación	Coordenadas WGS84 (Huso 19S)			Precipitación media anual SRK (2020) (mm/año)	IUA
	Este (m)	Norte (m)	Altura (m.s.n.m.)		
San Pedro de Atacama (DGA)	581.987	7.466.178	2.445	36,6	5,16
Socaire (DGA)	613.092	7.390.963	3.248	41,1	5,87
Rockwood (ALB)	568.771	7.385.238	2.300	15,7	4,68
Río Grande (DGA)	585.548	7.494.766	3.217	73,7	6,04
Talabre (DGA)	613.530	7.421.080	3.255	61,8	5,98
Toconao Experimental (DGA)	602.388	7.434.809	2.500	31,6	5,21

Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-14: IUA contra precipitación promedio anual (mm/año)



Fuente: SRK Consulting, 2020.

Las precipitaciones medias de los puntos de amarre en la zona oeste fueron corregidas según la distribución de isoyetas de precipitación anual presentadas en el EIA “Plan Reducción de Extracciones en el Salar de Atacama”, debido a que las distribuciones de precipitación obtenidas por variadas pruebas de interpolación en la zona oeste no se conciden a lo observado en dicho sector (datos en la estación Cordillera de la Sal).

Esta zona se ve influenciada por un régimen invernal de bajas precipitaciones descrito por Houston (2006), según se indicó en el capítulo 5.2.2.

**Tabla 4-14: Precipitación promedio anual para los puntos de amarre**

Punto amarre	ESTE (m)	NORTE (m)	Cota (m.s.n.m.)	IUA	Pp anual (mm)
PE1	632.463	7.519.854	4.929	8,07	152,4
PE2	605.326	7.342.840	3.722	6,14	71,5
PE3	630.199	7.409.625	4.628	7,39	124,0
PE4	574.258	7.295.788	4.131	6,24	75,6
PW1	531.865	7.337.914	3.184	5,22	33,0
PW2	527.811	7.397.766	2.796	5,01	24,2
PW3	564.406	7.501.409	3.531	6,27	77,1

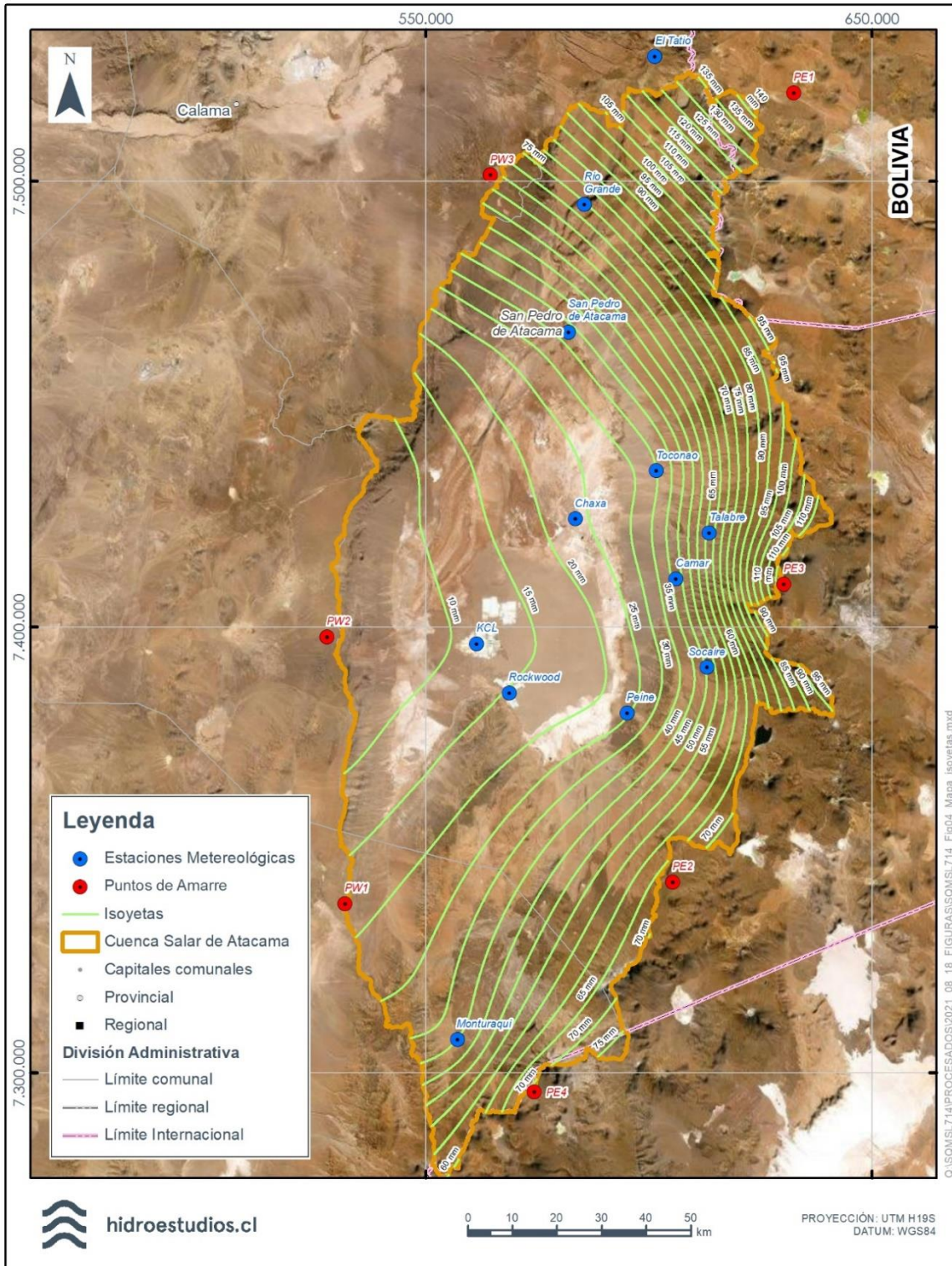
*Fuente: Hidroestudios, 2021.*

Finalmente, utilizando la información presentada en la Tabla 4-13 y la Tabla 4-14, se definen las isoyetas para toda la cuenca, las cuales fueron obtenidas mediante una interpolación de los datos (Figura 4-15), usando el software ArcMap 10.4.

Como se ha mostrado, la precipitación en la zona de menor elevación de la cuenca es baja, mientras que en la parte alta de la cuenca la precipitación presenta una serie de particularidades: 1) tiene un origen amazónico, 2) ocurren mayores precipitaciones durante el verano, 3) presentan un régimen cíclico asociado al fenómeno del niño-niña, 4) la precipitación es de tipo convectiva y 5) se observa un incremento de la precipitación con la altura.



Figura 4-15: Mapa de isoyetas (mm/año) estimado en estudio hidrológico, 1986-2019



Fuente: Modificado de SRK Consulting, 2020.



#### 4.3.6.5.2.5 Estimación de superficie cubierta por nieve

Para determinar la importancia del aporte de la superficie cubierta por nieve, a continuación, se presentan los resultados del análisis de imágenes satelitales realizado por SRK Consulting (2020), con el fin de estimar la superficie cubierta por nieve en la cuenca. En el citado estudio se analizaron imágenes del satélite Sentinel-2, versión Nivel 1-C, las cuales corresponden a imágenes orto-rectificadas, ya que posee una corrección de reflectancia al techo de la atmósfera (TOA).

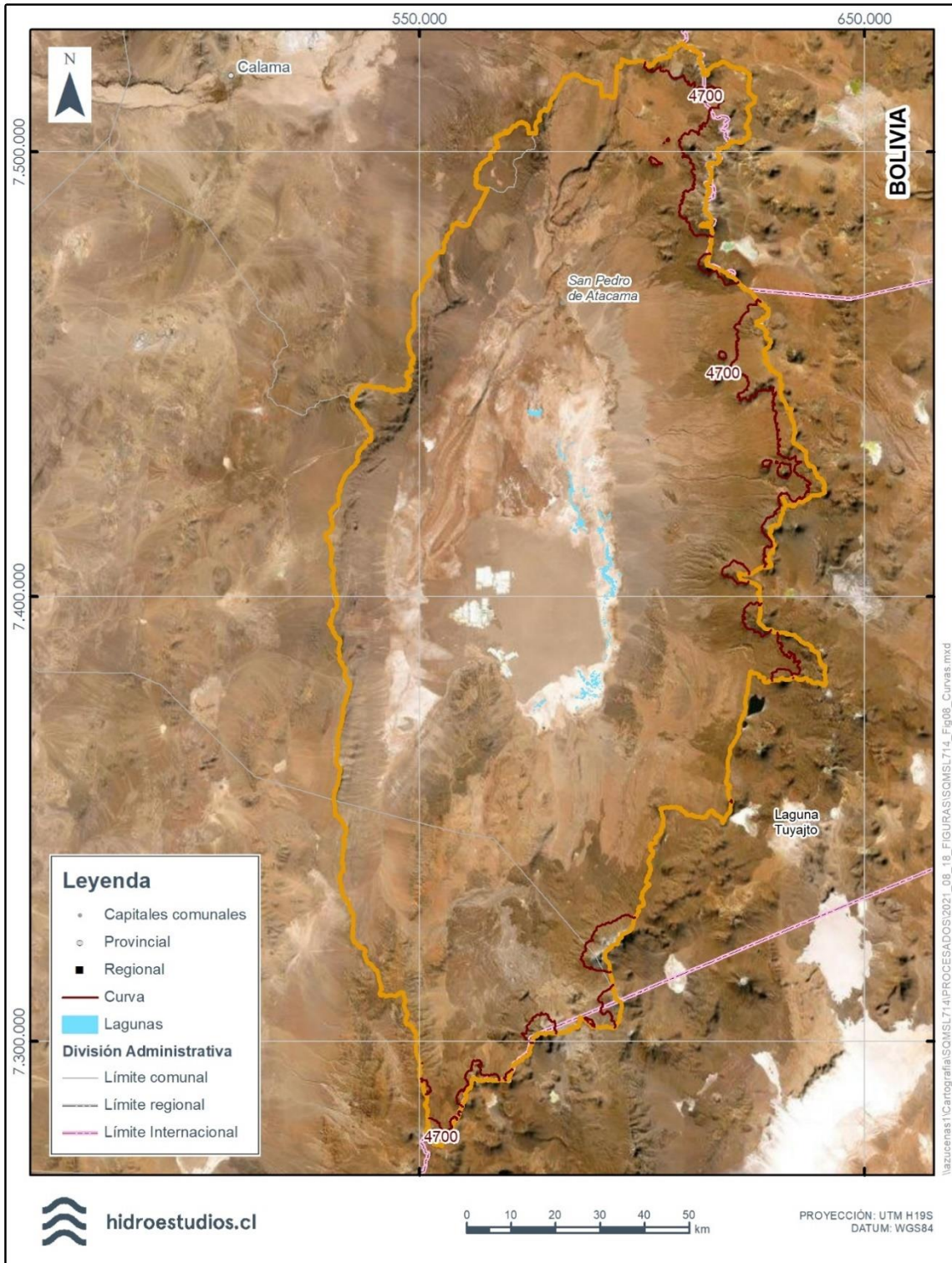
El límite de la zona nival para cada mes se estableció mediante una distribución de puntos representativos de las caídas máximas de precipitación sólida. El valor de la cota media nival se obtuvo a partir de un modelo digital de elevación. Debido a lo anterior, se puede establecer que la cobertura nival en la cuenca no es de gran extensión respecto al total y representa una superficie promedio anual de entre un 0,2 % (año 2016) hasta 4,6 % (año 2018) del total de la superficie de la cuenca.

Adicionalmente, estudios realizados en la laguna Tuyajto, ubicada en las cuencas altiplánicas de la región de Antofagasta, indican que el aporte de la precipitación sólida sobre la recarga toma relevancia a elevaciones superiores a 4.700 m.s.n.m., especialmente durante el mes de septiembre, mientras que la recarga asociada a las lluvias es de mayor magnitud durante los meses de febrero y marzo, relacionado principalmente a eventos de precipitación intensa (Urrutia, Herrera, Custodio, Jódar, & Medina, 2019).

En la Figura 4-16 se muestra el límite de la cota 4.700 m.s.n.m. en la cuenca del Salar de Atacama, donde se puede notar que las zonas que superan esta elevación son acotadas (5,5% de la superficie total).

Del análisis realizado por SRK Consulting se desprende que la cuenca del Salar de Atacama presenta escasos sectores que se encuentren cubiertos por nieve en al menos una parte del año, estos sectores se encuentran habitualmente en las cimas de los volcanes de la Cordillera de los Andes, ubicados en el borde este de la cuenca. El resto de la cuenca presenta nieves de forma muy ocasional, con una escasa cobertura que no perduran más de uno a varios días.

Figura 4-16: Cota 4.700 m.s.n.m. en la cuenca del Salar de Atacama



Fuente: Hidroestudios, 2021

#### 4.3.6.5.3 Caracterización de los escurrimientos

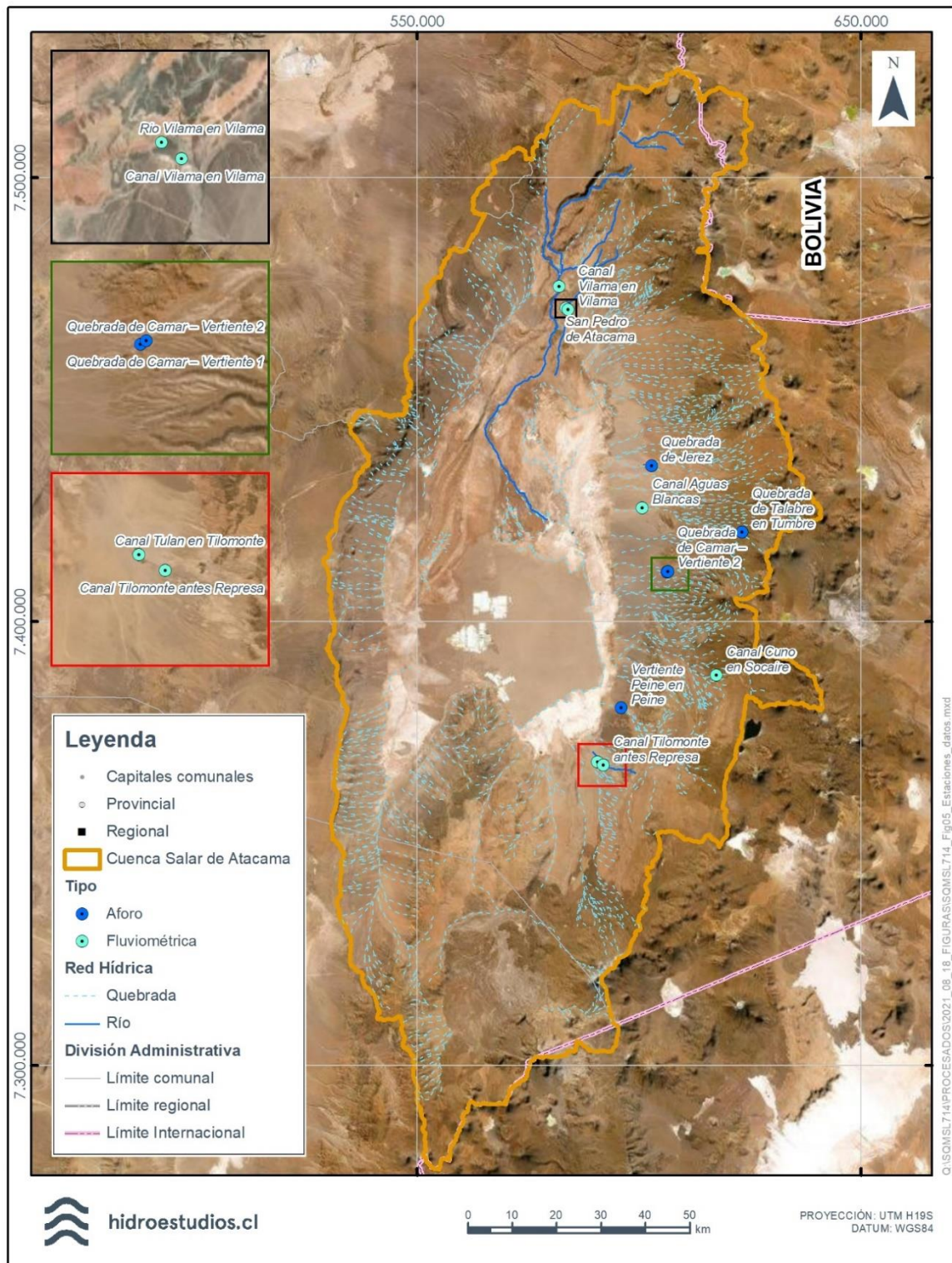
##### 4.3.6.5.3.1 Estaciones fluviométricas

En la cuenca del Salar de Atacama la esorrentía superficial constituye la fuente de abastecimiento de bofedales ubicados en diversas quebradas. Adicionalmente, los caudales superficiales se utilizan para el riego por parte de la agricultura tradicional y como abastecimiento para la ganadería. La esorrentía se observa principalmente en las zonas altas de la cuenca, pero puede alcanzar las zonas más bajas durante eventos de precipitación de mayor importancia. Típicamente, cuando no se registran crecidas, el caudal sobrante en los cauces se infiltra a través de los abanicos aluviales del río San Pedro y Vilama, por el sector norte, y a través de los depósitos aluviales que rodean la zona marginal, por el sector este y sur.

La cuenca del Salar de Atacama presenta estaciones y secciones de aforo con registros históricos que permiten cuantificar la esorrentía en los cauces naturales, además de mediciones puntuales que permiten analizar su comportamiento. Esta información es generada principalmente por la DGA (ver



Figura 4-17: Estaciones fluviométricas y puntos aforo



y Tabla 4-15).

Los puntos de monitoreo disponibles en la cuenca presentan 4 tipologías distintas, correspondientes al monitoreo de ríos, quebradas, vertientes y canales. Por otro lado, la extensión temporal de los registros es variable. Debido a lo anterior, en el estudio SRK Consulting (2020) se realizó un relleno de la estadística a escala diaria, en 10 de las estaciones disponibles, obteniendo series mensuales desde enero de 1986 a junio de 2018. No se consideran los registros de la estación Río Vilama en Vilama, ya que la estadística de la estación abarca únicamente el periodo de los años 1971 a 1972.

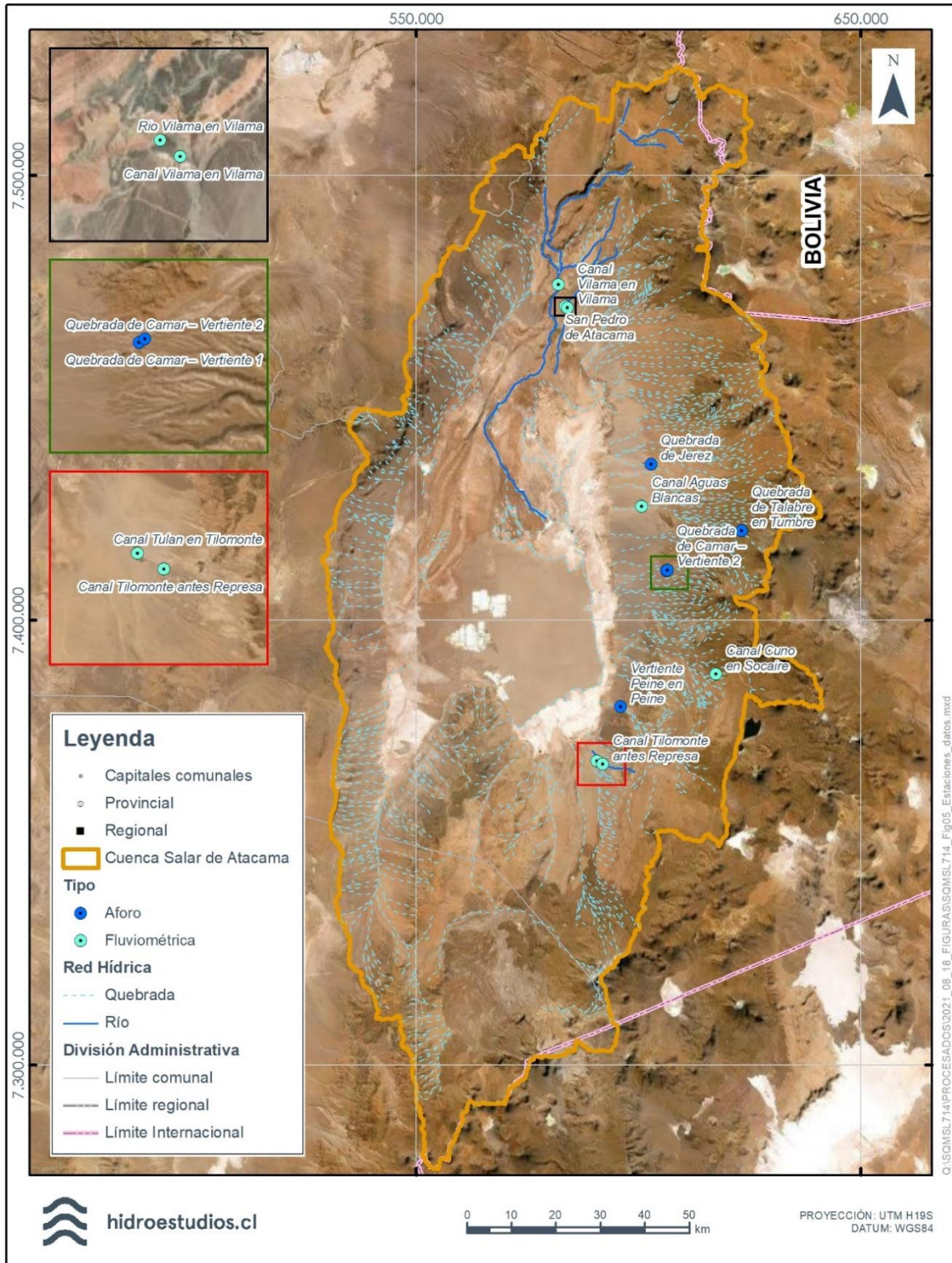
**Tabla 4-15: Coordenadas de las estaciones fluviométricas y aforos**

Estación	Coordenadas WGS84		Tipo	Periodo de registro
	Este (m)	Norte (m)		
Río San Pedro en Cuchabrachi	582.083	7.475.499	Fluviométrica	1947 a 2015
Río Vilama en Vilama	583.595	7.470.601	Fluviométrica	1971 a 1972
Canal Aguas Blancas	600.733	7.425.563	Fluviométrica	1977 a 1982/1992 a 2001
Canal Cuno en Socaire	617.452	7.387.854	Fluviométrica	1989 a 2020
Canal Tulán en Tilomonte	590.688	7.368.361	Fluviométrica	1977 a 1978/1990 a 2000
Canal Tilomonte antes Represa	591.985	7.367.584	Fluviométrica	1997 a 2020
Canal Vilama en Vilama	584.021	7.470.260	Fluviométrica	1976 a 2020
Quebrada de Jerez	602.845	7.435.114	Aforo	1995 a 2016
Quebrada de Camar – Vertiente 1	606.283	7.411.161	Aforo	1997 a 2007/2011 a 2012
Quebrada de Camar – Vertiente 2	606.511	7.411.282	Aforo	1997 a 2016
Quebrada de Talabre en Tumbre	623.250	7.420.102	Aforo	1995 a 2013
Vertiente Peine en Peine	596.005	7.380.506	Aforo	1995 a 2016

*Fuente: Hidroestudios, 2021.*



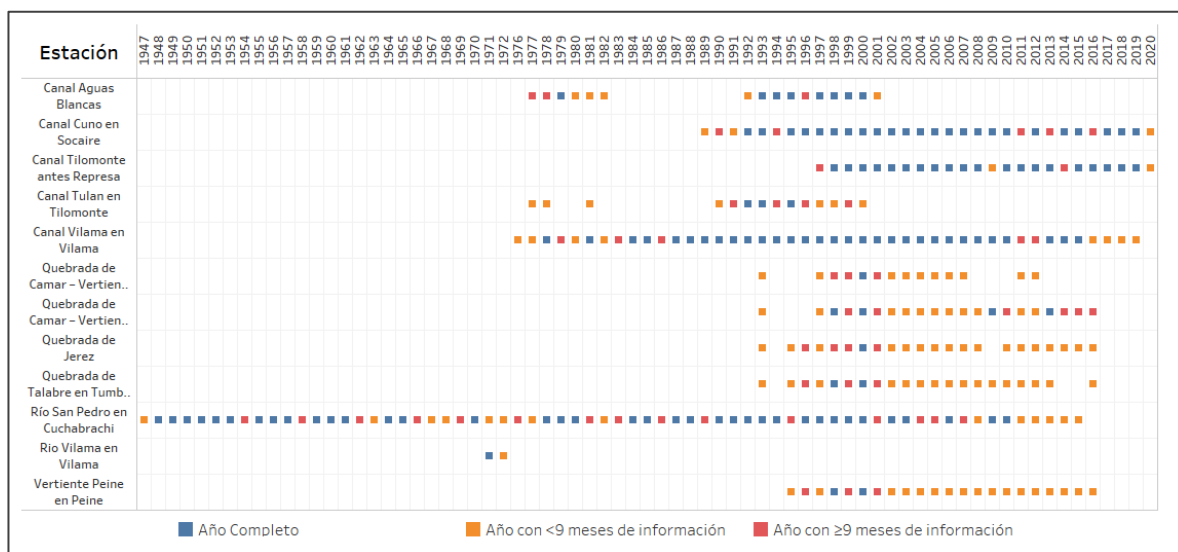
Figura 4-17: Estaciones fluviométricas y puntos aforo



Fuente: Hidroestudios, 2021

En la Figura 4-18 se presenta un gráfico que muestra la disponibilidad de información histórica de estaciones y secciones de aforo a nivel mensual en estaciones fluviométricas. El criterio de clasificación corresponde al año completo con la totalidad de meses con información representado en color azul, año con más de nueve meses de información representado en color naranja y finalmente los años que poseen menos de nueve meses con registros de datos de precipitación se grafican en color rojo.

Figura 4-18: Disponibilidad de información según año en cada estación fluviométrica



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.6.5.3.2 Análisis de caudales medios

En la Tabla 4-16 se presentan los promedios de los caudales medios mensuales y el caudal medio anual para el periodo de registro disponible en cada estación. Se observa que los mayores caudales se registraron en las estaciones Río San Pedro en Cuchabrachi y Canal Vilama en Vilama, ambas ubicadas en el sector norte de la cuenca (ver Tabla 4-16). Lo anterior es consistente con las mayores precipitaciones registradas en el sector norte de la cuenca (ver capítulo 4.3.6.5.2).

Tabla 4-16: Caudales medios mensuales y medios anuales de las estaciones (L/s)

Estación	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Anual
Canal Vilama en Vilama	145	151	148	146	156	163	166	166	167	151	127	136	152
Río San Pedro en Cuchabrachi	706	728	894	1043	1136	783	900	910	934	925	802	733	874
Quebrada de Jerez	60	61	54	62	67	57	63	67	66	54	62	65	61
Canal Aguas Blancas	97	100	100	97	93	90	90	105	114	105	112	116	102



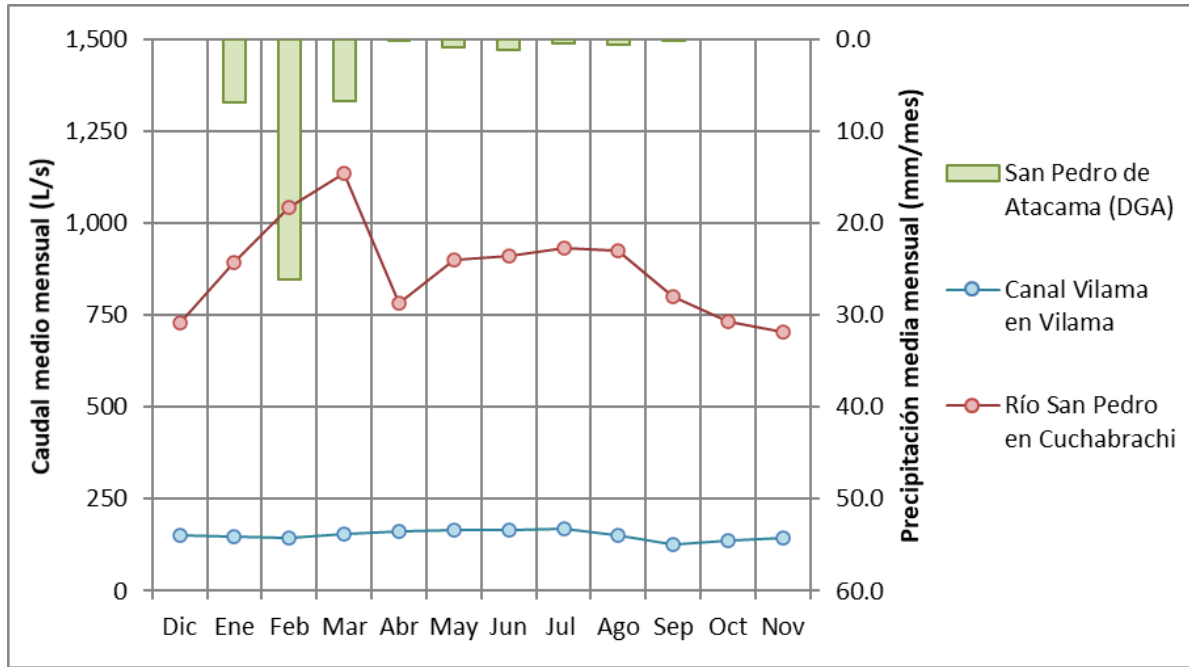
Tabla 4-16: Caudales medios mensuales y medios anuales de las estaciones (L/s)

Estación	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Anual
Canal Cuno en Socaire	128	130	136	144	150	157	163	169	174	178	186	163	157
Canal Tulán en Tilomonte	29	32	31	35	30	36	33	39	41	39	29	29	34
Vertiente Peine en Peine	8	8	7	7	8	8	7	7	8	8	7	7	7
Quebrada de Camar - Vertiente 1	5	7	6	5	6	5	7	4	7	7	6	5	6
Quebrada de Camar - Vertiente 2	12	11	12	10	12	13	11	12	12	13	12	12	12
Quebrada de Talabre en Tumbre	14	10	14	10	13	13	13	10	15	11	16	12	13

Fuente: Hidroestudios, 2021.

En la Figura 4-19 se presentan los caudales medios mensuales correspondientes a los registros del río San Pedro en Cuchabrachi y del canal Vilama en Vilama, debido a que representan de mejor manera la estacionalidad asociada a los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca. En el gráfico se presenta la curva de variación estacional, donde se observa que los cauces presentan un régimen pluvial, con dos periodos máximos. El primero se asocia al periodo de máximas precipitaciones del invierno altiplánico (diciembre a marzo) y produce los mayores caudales medios. El segundo aumento pluvial se asocia a las lluvias invernales, las cuales generan aumentos de caudal de menor magnitud.

Figura 4-19: Caudal medio mensual de las estaciones en cauces del sector norte y precipitación media mensual en la estación San Pedro de Atacama



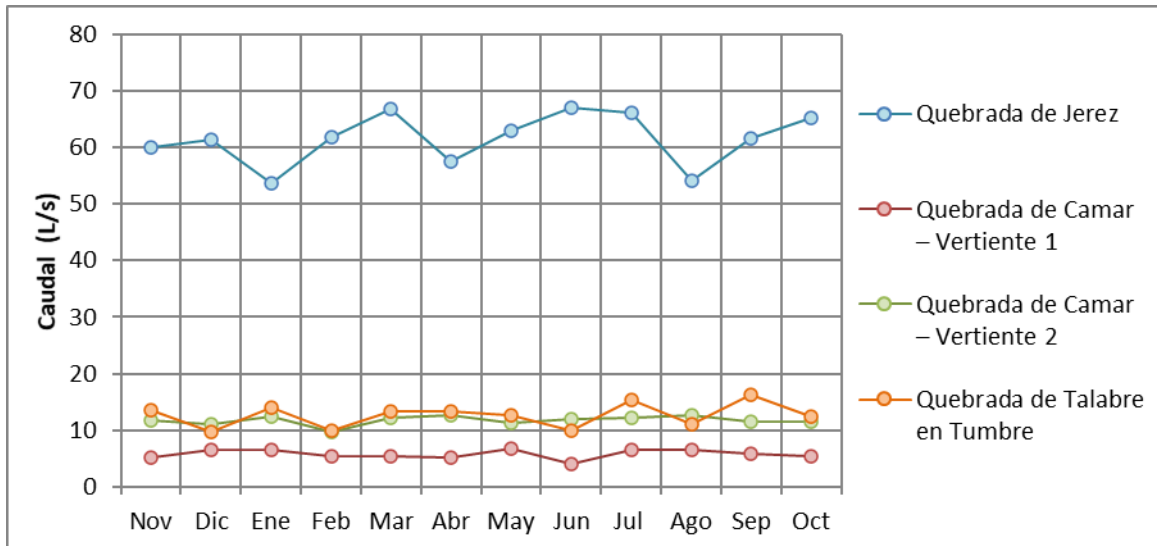
Fuente: Hidroestudios, 2021

Es relevante señalar que ambos cauces presentan un flujo base importante, de aproximadamente 700 L/s para el río San Pedro y de 120 L/s para el río Vilama (ver Tabla 4-16). Este flujo base se mantiene constante durante los meses en que las precipitaciones medias son nulas. Lo anterior implicaría que el frente de montaña es capaz de regular gran parte de la escorrentía y recarga, para posteriormente descargar los caudales constantemente en forma de afloramientos.

Las curvas de variación estacional para los puntos de aforo en quebradas (ver Figura 4-20) y vertientes (ver Figura 4-21) muestran en general un comportamiento estable, el que podría explicarse debido a los flujos base generados por el frente de montaña. Finalmente, los caudales en los canales ubicados en la parte este y sur de la cuenca (ver Figura 4-22) también son estables, mostrando leves aumentos durante los meses del invierno altiplánico y mayores aumentos durante los meses invierno continental. Esto último se observa con mayor claridad en los canales Aguas Blancas y Cuno en Socaire.

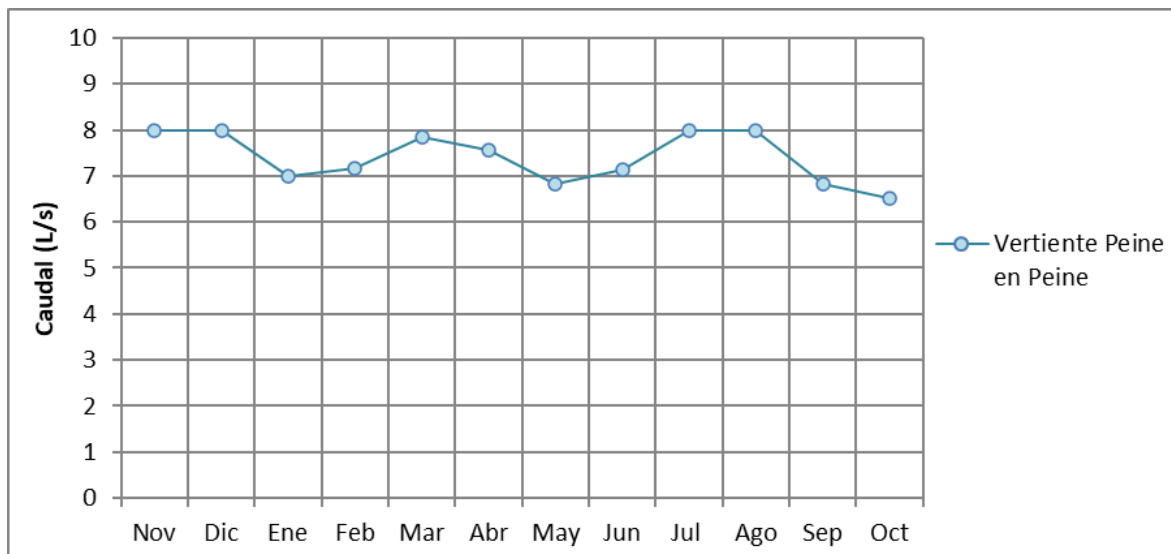
Finalmente, se puede destacar que se dispone de aforos realizados en los puntos de afloramiento y descarga de los sistemas lagunares ubicados en la zona marginal y zona de transición este. Como se indicó en la sección 3.1, existe una estrecha relación entre los sistemas lagunares y las aguas subterráneas someras del Salar de Atacama, por lo tanto, los aforos de los cuerpos lagunares serán presentados y caracterizados en la línea de base hidrogeológica (Capítulo XXX del presente EIA), ya que el origen de los escurrimientos corresponde en su origen a afloramientos de aguas subterráneas someras.

Figura 4-20: Curva de variación estacional en puntos de aforo en quebradas (L/s)



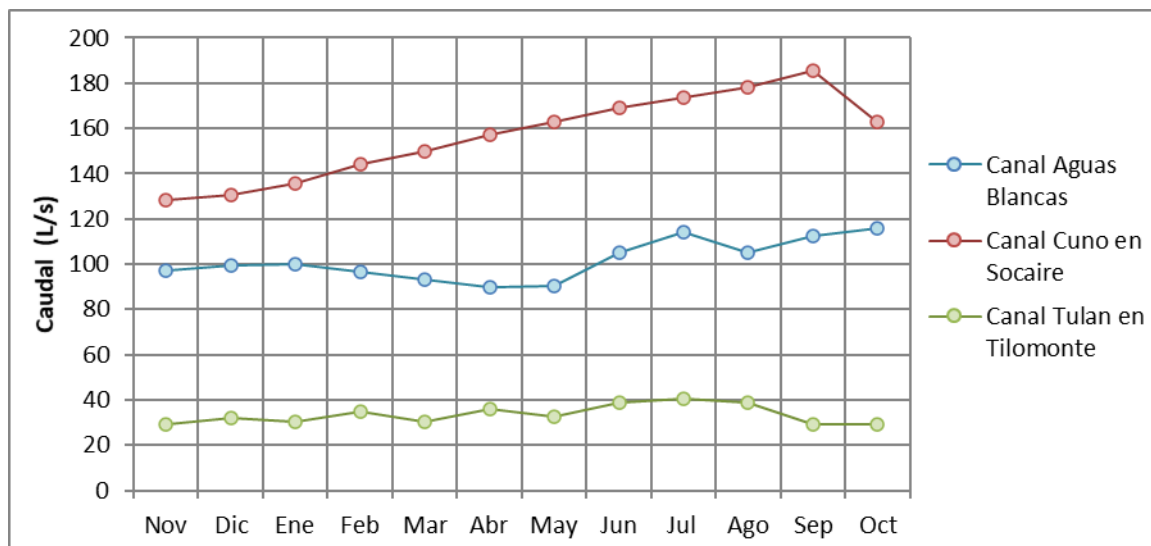
Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-21: Curva de variación estacional en punto de aforo Vertiente Peine en Peine (L/s)



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-22: Caudal medio mensual en estaciones fluviométricas en canales (L/s)



Fuente: Hidroestudios, 2021.

4.3.6.5.4 Caracterización de la evaporación

4.3.6.5.4.1 Estaciones con medición de evaporación

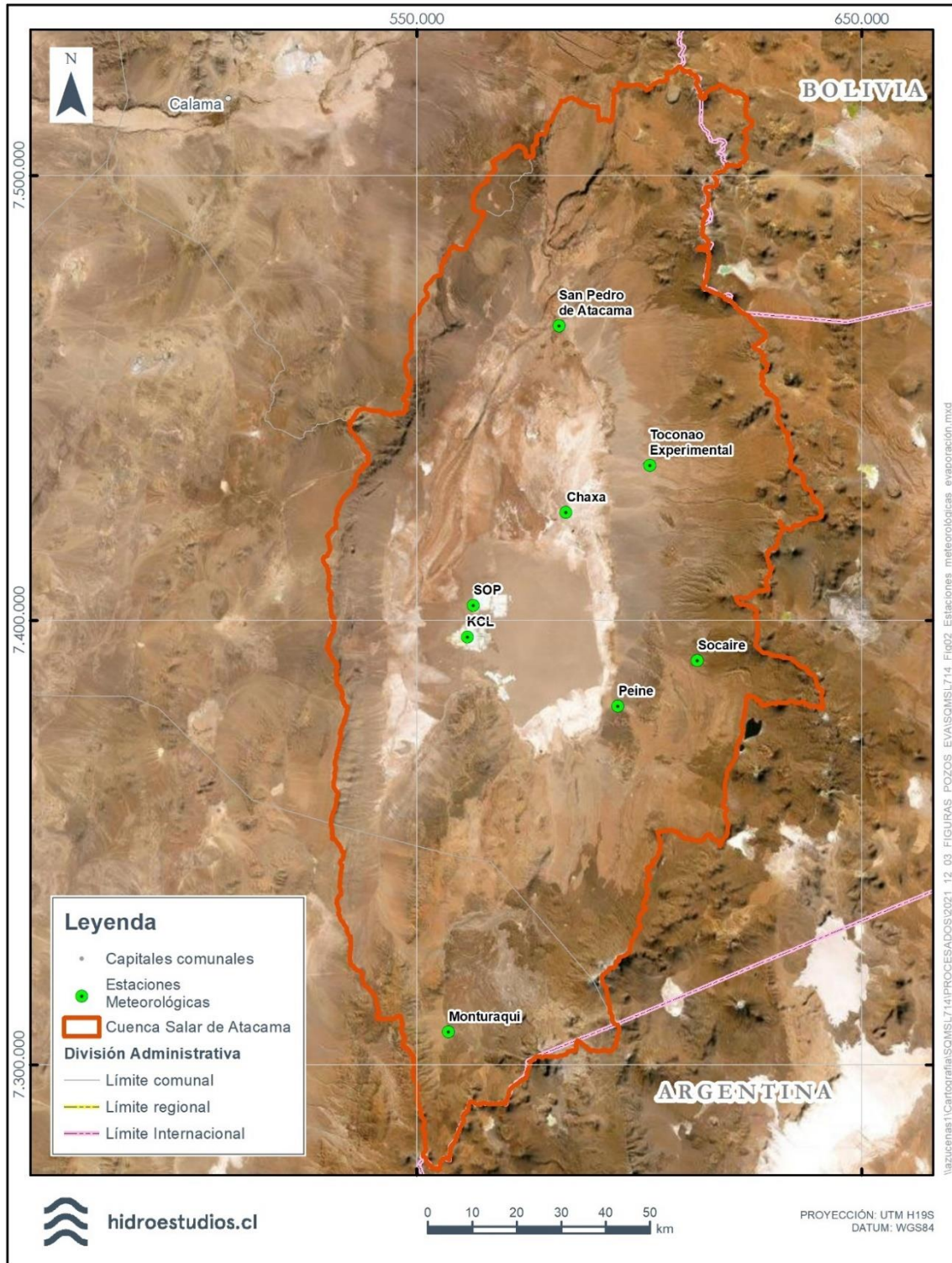
Los datos de evaporación de bandeja utilizados en el presente estudio corresponden a registros diarios en las estaciones meteorológicas de SQM Salar y de DGA. Las estaciones Chaxa y KCL presentan los registros más extensos de datos de evaporación, con mediciones desde el año 1999, mientras que los registros de la estación SOP comenzaron el 2011. Las estaciones utilizadas se presentan en la Tabla 4-17 y Figura 4-23.

Tabla 4-17: Estaciones meteorológicas de evaporación

Estación	Coordenadas WGS84		Altura (m.s.n.m.)	Fuente	Periodo de registro
	Este (m)	Norte (m)			
Monturaqui	557.103	7.307.450	3.430	DGA	1974 a 1979
Peine	595.137	7.380.682	2.390	DGA	1974 a 2019
San Pedro de Atacama	581.987	7.466.178	2.445	DGA	1959 a 2017
Socaire	613.092	7.390.963	3.248	DGA	1974 a 1998
Toconao Experimental	602.388	7.434.809	2.500	DGA	1975 a 2009
Chaxa	583.530	7.424.240	2.307	SQM	1999 a 2020
KCL	561.376	7.396.240	2.300	SQM	1999 a 2020
SOP	562.717	7.403.324	2.300	SQM	2011 a 2020

Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-23: Estaciones meteorológicas con medición de evaporación de bandeja



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.6.5.4.2 Evaporación desde superficie de agua libre

En la Tabla 4-18 se muestran los promedios mensuales de evaporación de bandeja de las estaciones analizadas, donde se observa una clara oscilación estacional, con tasas máximas durante los meses de diciembre y enero (meses cálidos), y con tasas mínimas durante los meses de junio y julio. La oscilación de la evaporación de bandeja se explica por los cambios estacionales en la radiación solar. Considerando la evaporación mensual promedio de las 8 estaciones, el valor máximo de evaporación de bandeja es igual a 11,7 mm/d y ocurre en diciembre, mientras que el mínimo es de 4,7 mm/d y ocurre en junio. Finalmente, la evaporación de bandeja promedio anual considerando todas las estaciones es igual a 8,3 mm/d. La estación Monturaqui posee un registro muy breve, sin embargo, es utilizada de todos modos ya que no existe otra información que permita caracterizar el comportamiento de esta forzante en la zona extremo sur de la cuenca.

Para estimar la evaporación desde superficie de agua libre en la cuenca del Salar de Atacama, es necesario conocer la evaporación de bandeja medida en las estaciones meteorológicas, junto con un factor de corrección, según se describe en la siguiente ecuación:

$$E_0 = E_{pan} * K_{pan}$$

Donde  $E_0$  es la evaporación desde superficie de agua libre (mm/d);  $E_{pan}$  es la evaporación medida en la bandeja de evaporación estándar (mm/d) y  $K_{pan}$  es el coeficiente de bandeja. Para este estudio se adoptó un  $K_{pan}$  de 0,75, al igual que en los estudios de la DGA-GCF (2010) y SGA (2015).

Tabla 4-18: Tasa de evaporación en bandeja promedio mensual (mm/d)

Estación	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct
Toconao Exp.	12,2	13,2	12,2	11,9	10,5	9,1	7,2	5,7	5,7	7,4	9,1	10,9
Socaire	10,6	11,3	10,6	10,2	9,5	8,6	7,3	6,1	5,7	6,0	7,6	9,2
Peine	11,5	12,1	11,8	11,3	10,5	8,8	6,7	5,5	5,6	6,6	8,4	10,3
San Pedro de Atacama	10,9	11,4	10,5	9,6	8,8	6,9	5,2	4,4	4,6	6,0	8,1	9,8
Monturaqui	10,4	10,8	9,1	9,2	9,2	7,1	5,3	4,7	4,5	5,6	7,5	9,0
SOP	11,5	11,7	11,7	10,5	9,4	7,0	4,7	3,8	4,1	5,4	8,1	10,1
KCL	11,5	12,4	12,7	10,7	10,2	7,0	5,0	3,6	3,7	5,3	7,6	9,5
Chaxa	10,4	10,4	10,6	9,1	7,7	6,7	4,6	3,6	3,8	5,2	7,0	9,0
Promedio	11,1	11,7	11,1	10,3	9,5	7,7	5,7	4,7	4,7	5,9	7,9	9,7

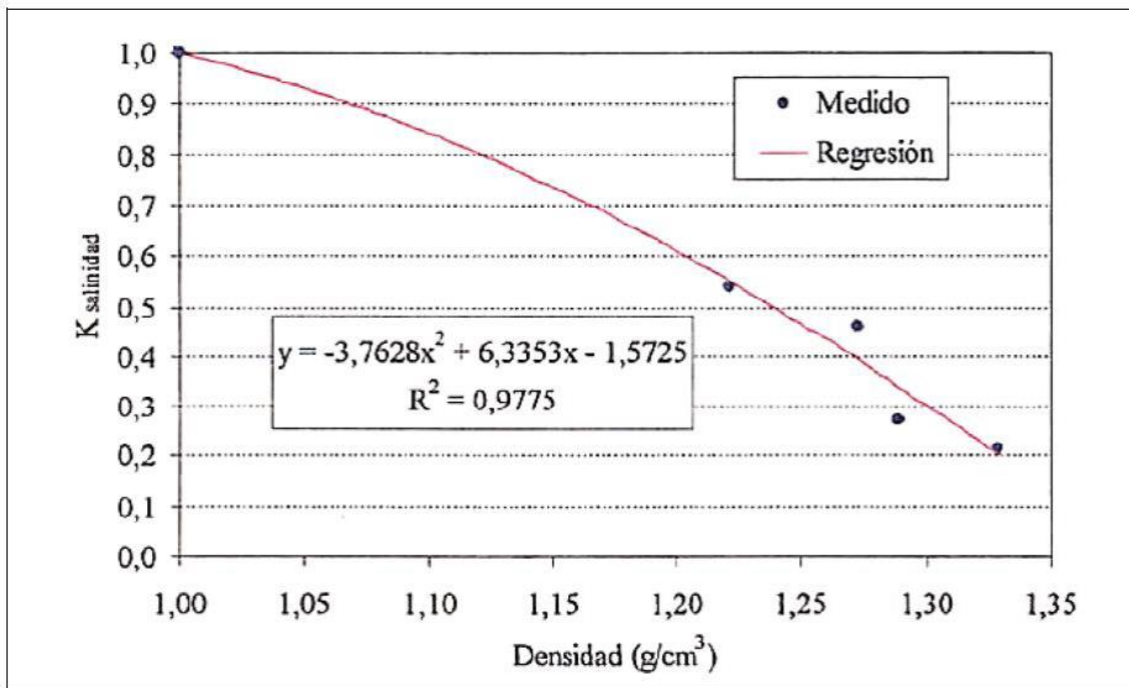
Fuente: Modificado de SRK Consulting, 2020.

En la Figura 4-24 se presenta un gráfico que muestra la disponibilidad de información histórica de evaporación mensual en estaciones meteorológicas. El criterio de clasificación corresponde al año completo con la totalidad de meses con información representado en color azul, año con más de nueve meses de información representado en color naranja y finalmente los años que poseen menos de nueve meses con registros de datos de precipitación se grafican en color rojo.





Figura 4-25: Relación entre el coeficiente de corrección por densidad y la densidad del agua y salmuera de la cuenca del Salar de Atacama.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.6.5.5 Derechos de aguas superficiales

Para el análisis de los derechos de aguas superficiales de la cuenca Salar de Atacama, se utilizó el estudio “Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama” (CORFO - Centro UC Cambio Global, 2021), el que presenta un listado de titulares de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales elaborado a partir de información contenida en el Catastro Público de Aguas (CPA) de la DGA. Cabe señalar que este estudio corresponde al esfuerzo más reciente por caracterizar los derechos de agua existentes en la cuenca.

De acuerdo con este estudio, los derechos de aprovechamiento de agua superficiales en la cuenca alcanzan los 2.114,7 L/s, siendo la mayoría de ellos derechos asociados a uso agrícola. En la Tabla 4-19 se presenta el detalle de estos derechos por tipo de uso.

Cabe señalar que las obras del Proyecto se ubican aguas abajo de cualquier zona agrícola presente en la cuenca del Salar de Atacama. Particularmente en la quebrada de Camar, las obras del Proyecto están a más de 7 km aguas abajo de la zona agrícola de Camar, en una sección de la quebrada que no presenta escurrimientos de carácter permanente. Respecto de las obras ubicadas en el sector de los pozos de monitoreo, aguas abajo se encuentra el núcleo del Salar de Atacama donde no existen derechos de aprovechamiento de agua superficial.

En la Tabla 4-20 se presenta cada derecho de agua superficial identificado en la cuenca del Salar de Atacama, indicando en cada uno el código de expediente, nombre del solicitante y caudal asociado.

Tabla 4-19: Resumen caudal de derechos superficiales en la cuenca Salar de Atacama.

Uso de agua	Caudal (L/s)
Minero o Industrial	8,5
Riego	1.656,4
Bebida / Uso doméstico / Saneamiento	15,9
Otros usos	319,6
Sin información	114,3
Total	2.114,7

Fuente: CORFO – Centro UC Cambio Global, 2021.

Tabla 4-20: Caudal de derechos superficiales en la cuenca Salar de Atacama

Código de expediente	Nombre Solicitante	Caudal (L/s)
ND-0202-2744	Comunidad Atacameña Toconao	65
ND-0202-2741	Sendos	0,47
ND-0202-2743	Prelatura de Calama	20
ND-0202-2728	Albemarle	8,5
ND-0202-5065	Juan Acevedo Jamett	38
NR-0202-55	Junta Vecinos Toconao	8
NR-0202-468	Usuarios Agrícolas del Valle de Zapar	20
NR-0202-530	Lucila Menanteau	45
NR-0202-1284	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores de Toconao	10
NR-0202-1379	Comunidad Atacameña de Talabre	10,8
NR-0202-1379	Comunidad Atacameña de Talabre	12,7
NR-0202-1379	Comunidad Atacameña de Talabre	4,3
NR-0202-1379	Comunidad Atacameña de Talabre	18,5
NR-0202-1381	Asoc. Atacameña de Regantes y Agricultores de Aguas Blancas	110
NR-0202-1383	Comunidad Atacameña de Peine	18,6
NR-0202-1383	Comunidad Atacameña de Peine	1,7
NR-0202-1383	Comunidad Atacameña de Peine	43
NR-0202-1384	Asoc. Atacameña de Regantes y Agricultores de Toconce	60
NR-0202-1385	Comunidad Atacameña de Camar	3,2
NR-0202-1385	Comunidad Atacameña de Camar	10,4

Tabla 4-20: Caudal de derechos superficiales en la cuenca Salar de Atacama

Código de expediente	Nombre Solicitante	Caudal (L/s)
NR-0202-1385	Comunidad Atacameña de Camar	2,7
NR-0202-1385	Comunidad Atacameña de Camar	3,4
NR-0202-1385	Comunidad Atacameña de Camar	6,9
NR-0202-1386	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores de Soncor	12,3
NR-0202-1388	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores de Celeste	4
NR-0202-1389	Comunidad Atacameña de Socaire	130
NR-0202-1389	Comunidad Atacameña de Socaire	5
NR-0202-1390	Comunidad Atacameña de Machuca	10
0202-1390	Comunidad Atacameña de Machuca	3,8
NR-0202-1391	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores del Río Vilama	180
NR-0202-1391	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores del Río Vilama	21
NR-0202-1391	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores del Río Vilama	10
NR-0202-1391	Asociación Atacameña de Regantes y Agricultores del Río Vilama	10
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	870
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	125
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	17
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	

Tabla 4-20: Caudal de derechos superficiales en la cuenca Salar de Atacama

Código de expediente	Nombre Solicitante	Caudal (L/s)
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	10
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	99
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	10
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	10
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	8
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	3
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	3
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	2
NR-0202-1684	Explora S.A.	18
NR-0202-1980	Sotero Armella Mamani y Otros	5,7
NR-0203-5004	Comunidad Atacameña de Peine	15,4
NR-0202-5038	Asociación Indígena de Regantes y Agricultores Paso Jama	1,3
NR-0202-5045	Comunidad Atacameña de Peine	5
NR-0202-5048	Comunidad Atacameña de Peine	5
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	10
NR-0202-1392	Asoc. Atacameña de Reg. y Agr. de San Pedro de Atacama y Otros	8

Fuente: CORFO – Centro UC Cambio Global, 2021.

#### 4.3.6.6 Conclusiones

La cuenca Salar de Atacama es una cuenca endorreica, que tiene una superficie aproximada de 17.000 km<sup>2</sup>, limita con la cordillera de Domeyko al oeste y con la cordillera de los Andes por el este. Al centro de la cuenca se ubica el Salar de Atacama, que tiene una altura media aproximada a los 2.300 m.s.n.m.

La caracterización de las precipitaciones se ha realizado a partir de los datos de las estaciones meteorológicas localizadas en la cuenca y cercanas a ella, que presentan una mayor longitud de registro. Del análisis se concluye que las mayores precipitaciones se producen en el período de diciembre a marzo, coincidente con el invierno altiplánico. Estas precipitaciones son de tipo convectivas, tienen un origen atlántico y presentan un régimen cíclico asociado al fenómeno del niño-niña. Por otro lado, se determinó a partir de un análisis de imágenes satelitales espectrales, que la caída y acumulación de nieve representa aproximadamente el 4,6% de la superficie promedio anual del total de la cuenca, además en el año 2018 se produce la máxima acumulación de nieve del periodo evaluado, principalmente en los meses de junio y agosto.

Las mayores precipitaciones se producen en la parte noreste de la cuenca del Salar de Atacama, sobre la cordillera de los Andes, existiendo un aumento de precipitaciones con la altura. El borde oeste de la cuenca recibe menos precipitaciones. En relación con la zona aluvial se ubican las estaciones meteorológicas Camar y Toconao Experimental con registros extensos en el sector, en donde se ubica la zanja de soterramiento.

La caracterización de los caudales se ha realizado a partir de los registros de las estaciones fluviométricas y puntos de aforo que dispone la DGA en la cuenca. Los cauces superficiales de régimen permanente se ubican en el sector noreste del Salar, mientras que no se ha evidenciado la presencia de cauces superficiales continuos en la zona oeste de la cuenca.

Del análisis de los registros fluviométricos se concluye que los cauces presentan un régimen pluvial, con dos periodos máximos, uno de mayor importancia asociado al fenómeno de precipitaciones conocido como “invierno altiplánico” (diciembre a marzo) y otro asociado al periodo de invierno estacional (regional). Adicionalmente, se puede mencionar que los cauces presentan un flujo base importante, que se mantiene constante durante los meses en que prácticamente no se registran precipitaciones medias. Lo anterior implicaría que el frente de montaña es capaz de regular gran parte de la escorrentía y recarga, para posteriormente descargar los caudales constantemente en forma de afloramientos.

La evaporación desde superficie de agua libre fue estimada a partir de los registros de evaporación de tanque medidos en estaciones pertenecientes a SQM Salar S.A. y DGA. Los registros fueron corregidos por un factor de bandeja (bibliográfico) y por un coeficiente de corrección por densidad que refleja el efecto del contenido de sales sobre la evaporación. De esta forma se determinaron las tasas de evaporación media para las aguas de la zona marginal y del aluvial, así como para la salmuera contenida en Núcleo del Salar.



#### 4.3.6.7 Bibliografía

- Albemarle. (2021). *Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual N° 3. Período Enero – Diciembre 2020.*
- Albemarle. (2021). *Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual N° 3. Período Enero – Diciembre 2020.*
- Amphos 21. (2018). *Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados para el Salar de Atacama. Preparado para el Comité de Minería no Metálica de CORFO.*
- Arriagada et al. (2006). Salar de Atacama basin: A record of compressional tectonics in the central Andes since the mid-Cretaceous. Arriagada, C.; Cobbold, P. R.; Roperch, P. *Tectonics*, 25(1).
- Basso, M., & Mpodozis, C. (2012). *Carta Cerro Químal, Región de Antofagasta*. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Becerra M., J., Henríquez, S., S., & Arriagada O., C. (2014). *Geología del área Salar de Atacama, Región de Antofagasta*. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Bevacqua, P. (1988). *Descripción de las unidades geológicas de superficie del Salar de Atacama. Tomo I. Informe MT-03-88. MINSAL Ltda.*
- CORFO - Centro UC Cambio Global. (2021). *Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama, Informe Proyecto Consolidado.*
- Cortés, J. (2012). *Carta Sierra Mariposa, Región de Antofagasta*. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Davie, T. (2008). *Fundamentals of hydrology*. Routledge.
- DGA. (1986). *Informe hidrogeológico: evaluación de la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, cuenca Salar de Atacama, II región. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.*
- DGA. (1987). *Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.*
- DGA. (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. Informe Final Parte I: Hidrografía Regional del Altiplano de Chile. (S.I.T N° 157). Ministerio de Obras Públicas. Realizado por DICTUC.*
- DGA. (2010). *Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para construir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al salar de Atacama. S.I.T. 210, pp 277). Ministerio de Obras Públicas. realizado por GCF.*
- DGA. (2012). *Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Atacama: informe técnico. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.*
- DGA. (2013). *Análisis de la oferta hídrica del salar de Atacama. Santiago, Chile. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Estudios y Planificación.*
- DGA. (2014). *Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Informe Final S.I.T N° 357. Ministerio de Obras Públicas. Realizado por ICASS.*
- DGA. (2014). *Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel nacional (Informe Final) (SDT N°356). Santiago: Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN).*
- DGA; Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. (2009). *Levantamiento Hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en*

- áreas prioritarias de la Zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III : etapa 2. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DGA-DIHA PUC. (2009). *Levantamiento Hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la Zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III : etapa 2*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DGA-U de Chile-PUC. (2019). *Actualización de Balance Hídrico Nacional de Chile, SIT N° 417*. Santiago.
- DICTUC. (2000). *Estimación de Aportes Superficiales y Subterráneas del Salar de Atacama, Mediante el Modelo Estacional SEAMOD*. Informe para SQM.
- DICTUC. (2009). *PSAH. Proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. Informe N° 5*. Santiago de Chile.
- Espíldora, B., Brown, E., Cabrera, G., & Isensee, P. (1975). *Elementos de Hidrología*. Santiago: Centro de Recursos Hidráulicos, departamento de Obras Civiles, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Gardeweg, M., Pino, H., Ramírez, C., & Davidson, J. (1994). *Mapa Geológico del área de Imilac y Sierra Almeida. Región de Antofagasta*. Documentos de Trabajo, N° 7, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- GCF Ingenieros Consultores. (2010). *Anexo 7, Adenda 2 Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama*. Antofagasta: Sociedad Chilena del Litio LTDA.
- Henríquez G., S., Becerra M., J., & Arriagada G., C. (2014). *Geología del área San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta*. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Houston, J. (2006). *Variability of precipitation in the Atacama Desert: Its causes and hydrological impact*. *Int. J. Climatol.* 26, 2181–2198. <https://doi.org/10.1002/joc.1359>.
- IDAEA-CSIC. (2017). *Cuarta Actualización del Modelo de Flujo del Salar de Atacama*. Santiago.
- Ide, F. (1978). *Cubicación del yacimiento salar de Atacam*. Memoria de título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Minas, 144 p. Santiago.
- Jordan et al. (2007). Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of the Salar de Atacama Basin, northern Chile. Jordan, T.; Mpodozis, C.; Muñoz, N.; Blanco, N.; Pananont, P. *Journal of South American Earth Sciences*, 23(2), 122-146.
- Jordan, T., Muñoz, N., Hein, M., Lowenstein, T., Godfrey, L., & Yu, J. (2002). Active faulting and folding without topographic expression in an evaporite basin, Chile. *Geological Society of America. Bulletin* 114, 1406-1421.
- Kuhn, D. (2002). Fold and thrust belt structures and strike-slip faulting at the SE margin of the Salar de Atacama basin, Chilean Andes. *Tectonics*, 21(4).
- Marinovic, N., & Lahsen, A. (1984). *Hoja Calama : Region de Antofagasta, escala 1:250.000*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N° 58, 140 pág.
- MEL. (2019). *Plan de Alerta Temprana para Acuífero Monturaqui-Negrillar- Tilopozo. Datos Monitoreo, Informe N° 18: Revisión hasta fines de 2018*.
- Mpodozis et al. (2005). Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar de Atacama Basin, Antofagasta, Northern Chile: implications for the tectonic evolution of the Central Andes. *Tectonophysics*, 399(1), 125-154.
- Niemeyer, H. (2013). *Geología del área Cerro Lila-Peine, Región de Antofagasta*. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería.

- Orphanopoulos, D. (1988). *Informe Hidrogeológico: Evaluación de la disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas. Cuenca Salar de Atacama, II Región. DGA.*
- Perez, J. (2020). *Ejemplo de referencia bibliográfica.* Santiago: Hidroestudio.
- Ramírez, C., & Gardeweg, M. (1982). *Hoja Toconao, Región de Antofagasta.* Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° 58 (1:250.000), 121 pág.
- Ramírez, C., Gardeweg, M., Davidson, J., & Pino, H. (1991). *Mapa Geológico del área de los volcanes Socompa y Pular, Región de Antofagasta.* Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (1999). *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones, Chile. Síntesis.*
- Rubilar, C., & Sebastián, J. F. (2015). *Arquitectura interna y desarrollo oligoceno-neógeno de la cuenca del Salar de Atacama, Andes Centrales del Norte de Chile.* Tesis de la Universidad de Chile.
- SGA. (2015). *Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama (Anexo 1). Para Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones del Sistema de Pozas de Evaporación solar en el Salar de Atacama de Rockwood Lithium.* Santiago, Chile.
- Solari, M., Venegas, C., Montecino, D., Astudillo, N., Cortés, J., Bahamondes, B., . . . Espinoza, F. (2017). *Geología del área Imilac-Quebrada Guanaqueros, Región de Antofagasta.* Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería .
- SQM. (2020). *Actualización Plan de Alerta Temprana y Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama.*
- SQM. (2020). *Proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental. Apéndice 4.1. Línea de Base de Geología. .*
- SQM. (2020b). *Proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental. Apéndice 4.4. Línea de Base de Hidrogeología.*
- SQM Salar. (2021b). *Informe N° 28 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del Proyecto "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama".*
- SRK Consulting. (2020). *Estudio Hidrológico Salar de Atacama.*
- SRK Consulting. (2020). *Estudio Hidrológico Salar de Atacama.*
- Urrutia, J., Herrera, C., Custodio, E., Jódar, J., & Medina, A. (2019). Groundwater recharge and hydrodynamics of complex volcanic aquifers with a shallow saline lake: Laguna Tuyajto, Andean Cordillera of northern Chile. *Science of the Total Environment.*

## 4.3.7 Hidrogeología

### 4.3.7.1 Introducción

La presente sección expone la caracterización de la componente de hidrogeología.

Se presenta la hidrogeología de la zona a dos escalas distintas: regional (contexto general), y local (Sistemas locales: Soncor, Aguas de Quelana, Peine y Tilopozo). En ambas se da cuenta de la geología, estructuras, parámetros hidráulicos, caudales de extracción, niveles de agua subterránea, piezometría, unidades hidrogeológicas y balance hídrico.

### 4.3.7.2 Objetivos

#### 4.3.7.2.1 Objetivo general

El objetivo general del presente informe es caracterizar y describir la componente Hidrogeológica del Proyecto, con la finalidad de describir el comportamiento de esa zona y sus alrededores.

#### 4.3.7.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos se señalan los siguientes:

- Caracterizar la hidrogeología regional del área, en función de:
  - la geología tanto superficial como subsuperficial,
  - los parámetros hidráulicos representativos de estas,
  - cuerpos de agua superficiales dependientes de la recarga subterránea,
  - Caudales de extracción tanto de salmuera como agua,
  - niveles de agua subterránea,
  - posición y presencia de interfaz salina,
  - definición de Unidades Hidrogeológicas,
  - y finalmente Balance Hídrico del sistema
- Utilizando los mismos criterios previamente mencionados, realizar la caracterización hidrogeológica local en los sistemas ambientales:
  - Soncor,
  - Aguas de Quelana,
  - Peine,
  - Y Tilopozo

### 4.3.7.3 Descripción general y Área de Influencia

#### 4.3.7.3.1 Descripción General

De acuerdo con lo detallado en el Capítulo 3, descripción y justificación del área de influencia, en esta sección se realiza una caracterización general con el objetivo de contar con información necesaria que permita determinar los potenciales efectos del Proyecto sobre la componente analizada y en caso de corresponder, delimitar la extensión del área de influencia.

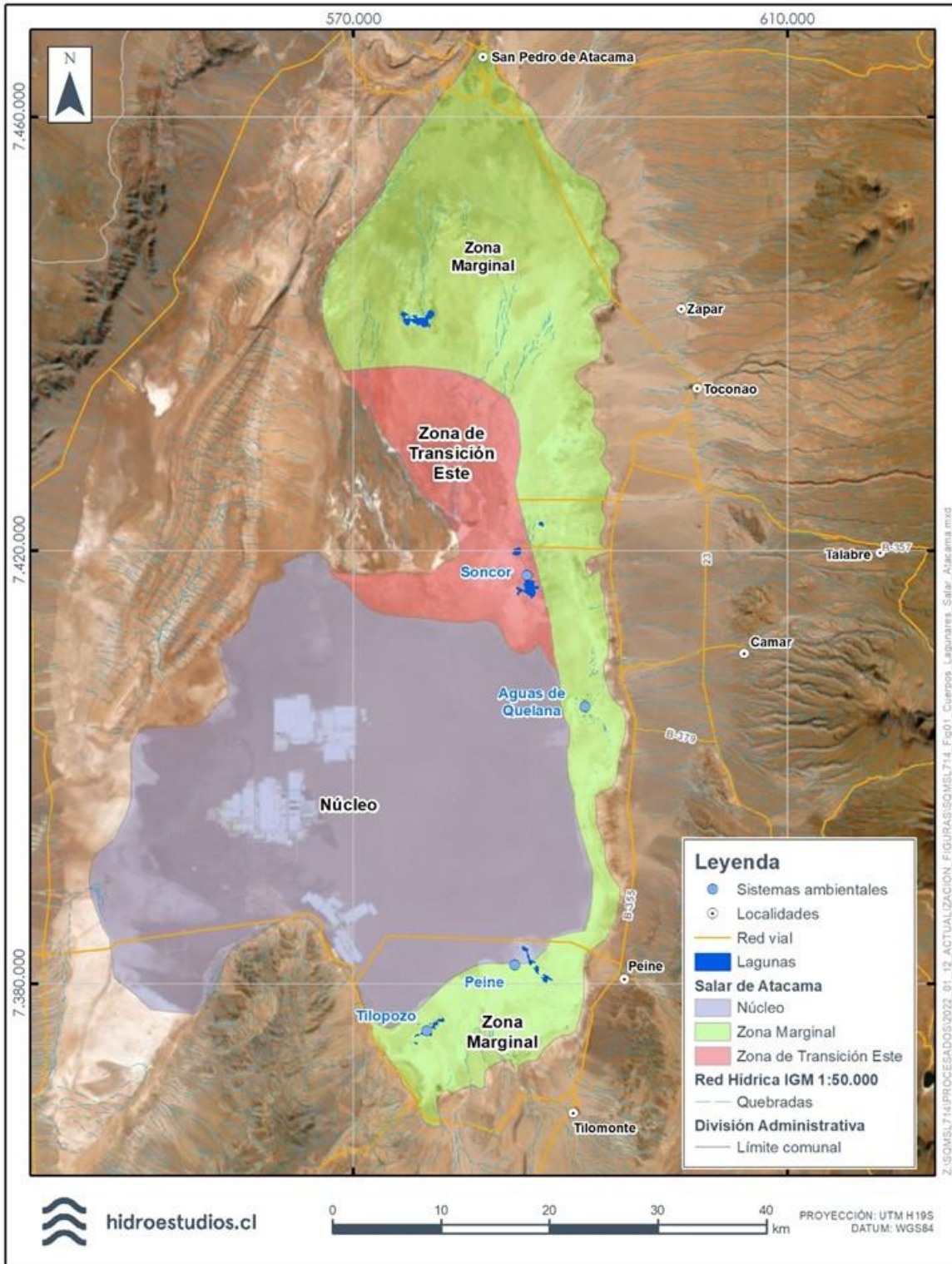
El Salar de Atacama se localiza en la Región de Antofagasta, a 55 km al sur de San Pedro de Atacama y 316 km al noreste de Antofagasta (capital regional). La cuenca del Salar de Atacama comprende un área total de 16.998 km<sup>2</sup>, y la delimita la Cordillera de los Andes en sus márgenes norte, este y sur, y la Cordillera de Domeyko por su margen oeste. La parte más baja de la cuenca (núcleo, zona de transición este y zona marginal) se encuentra a una altura aproximada de 2.300 msnm, tiene unos 100 km de largo y 80 km de ancho aproximadamente, abarcando un área aproximada de 3.100 km<sup>2</sup>. El núcleo del Salar, donde se ubican las faenas extractivas de salmuera, posee una superficie aproximada de 1.100 km<sup>2</sup>, y está rodeado por una zona marginal y zona de transición de unos 2.000 km<sup>2</sup> de extensión, aproximadamente.

En la zona marginal del Salar de Atacama se han identificado sistemas relevantes con valor ambiental, los cuales corresponden, de norte a sur, a: Sistema Soncor, Sistema Aguas de Quelana, Sistema Peine y Sistema Tilopozo (Lagunas La Punta y La Brava) y el sistema de vegetación del Borde Este. El valor ambiental de estos sectores está vinculado a la diversidad biológica, así como a la presencia y abundancia de especies silvestres en estado de conservación. Estos hábitats dependen de la ocurrencia de un nivel freático somero y la presencia de cuerpos lagunares, algunos estables y otros esporádicos.

En la Figura 4-26 se presenta la identificación de los sistemas relevantes, y zonas hidrogeológicas del sector.



Figura 4-26. Polígono de Contexto General Hidrogeología.



Fuente: Hidroestudios, 2021.



#### 4.3.7.3.2 Área de influencia

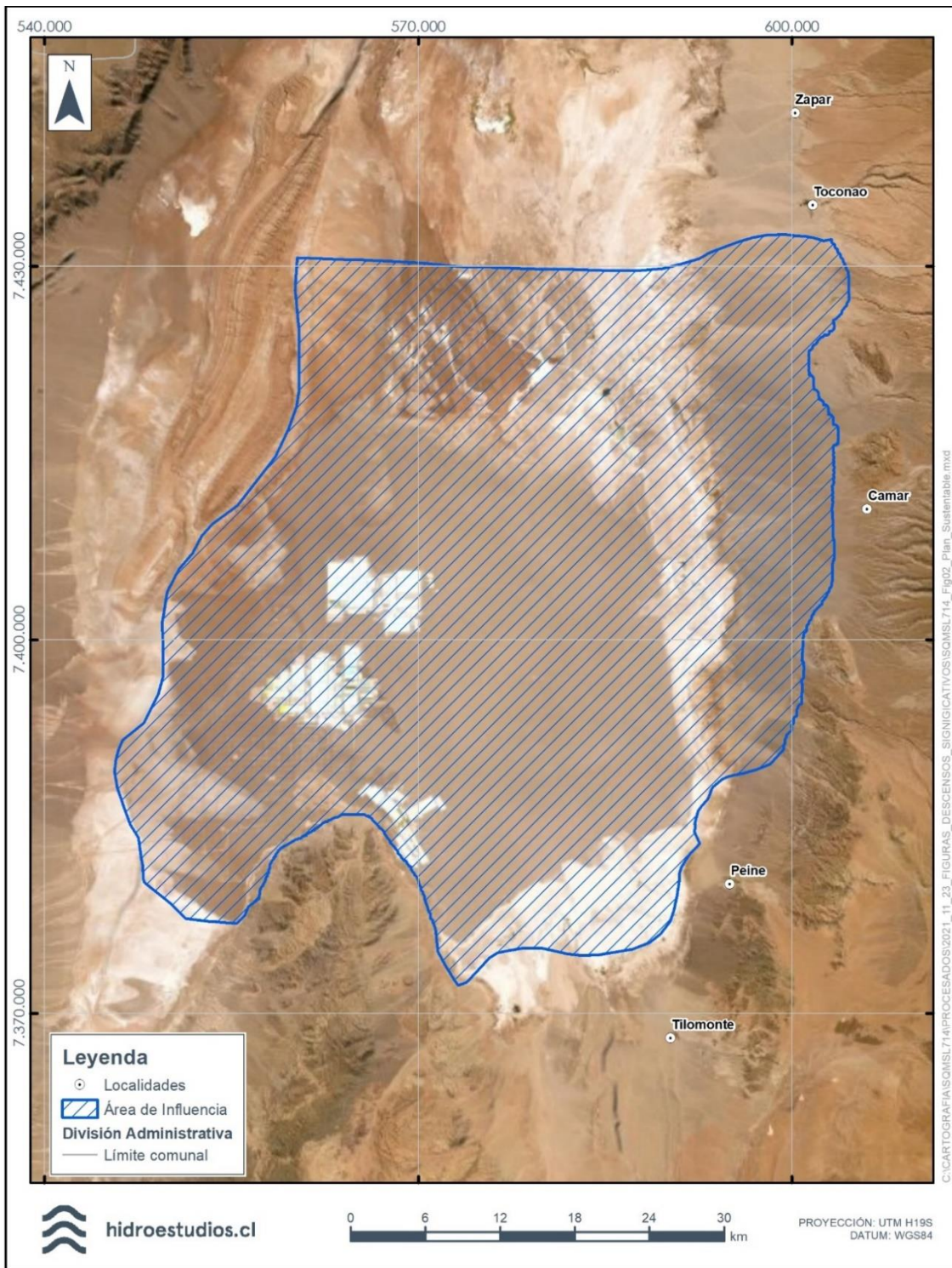
Para esta variable ambiental, se ha delimitado un área de influencia, determinada en función del espacio geográfico donde se emplazan las partes, obras y acciones que eventualmente podrían generar impactos ambientales, lo anterior en contexto con lo establecido en el literal a) del artículo 2 del D.S. N° 40 Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), y literal b.1) del mismo artículo del citado Decreto y además considerando los criterios definidos en la Guía del Área de Influencia del SEA (2017), la cual establece que la determinación y delimitación del AI de una variable ambiental se funda en la definición de los potenciales impactos ambientales en etapas tempranas, y hasta donde su efecto es perceptible.

De acuerdo con lo anterior, los impactos que podrían relacionarse con esta variable estarían dirigidos a la cantidad del recurso, condicionado por los descensos locales sobre el acuífero producido por las extracciones de salmuera del núcleo del Salar de Atacama y agua del acuífero aluvial del Borde Este, y el efecto que se podría generar sobre los sistemas relevantes.

Por tanto, el Área de Influencia de hidrogeología (ver Figura 4-27) fue definida en función de la proyección de los descensos, los cuales dependen de las características hidráulicas del sistema, de las características geomorfológicas y de la densidad de los fluidos.

La metodología detallada de la determinación del área de influencia se presenta en el Capítulo 3 del presente EIA, donde se exponen todos los criterios que permiten delimitar el AI.

Figura 4-27: Área de Influencia componente hidrogeología



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.7.4 Metodología

##### 4.3.7.4.1 Antecedentes disponibles

###### 4.3.7.4.1.1 Estudios preexistentes

Se recopiló y revisó información de estudios preexistentes desarrollados directamente por SQM, organismos de la organización de estado, terceros con algún interés productivo y/o extractivo en el Salar, y grupos académicos. En el caso de la información de organismos oficiales, esta se recopiló gracias a las plataformas públicas de acceso web destinadas para ello, o bien por Ley de Transparencia.

En el caso de la información de terceros, proveniente de empresas privadas, la información disponible se ha recopilado principalmente por los informes de seguimiento que derivan de los estudios ambientales vigentes, o bien por los informes y estudios que han sido generados durante la tramitación de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) (obtenidos a través de página web: <https://www.sea.gob.cl/>).

###### 4.3.7.4.1.1.1 Antecedentes de SQM

La principal fuente de información hidrogeológica desarrollada por SQM corresponde a los datos del Plan de Seguimiento Ambiental (PSAH), comprometido en la RCA 226/2006 e integrados hasta el informe n° 28. Esta fuente de información es la más robusta y completa, implementada y operativa, que sirve para observar el comportamiento de los sistemas de interés y el efecto de las extracciones que se realizan; por tanto, constituye una referencia importante de antecedentes no solo para SQM, sino también para terceros.

También comprende estudios específicos realizados previo a la evaluación ambiental del proyecto hasta la fecha (31 de diciembre 2020). Entre los antecedentes de interés, cabe destacar los siguientes:

- Datos de nivel de agua subterránea y salmuera,
- Datos de extracción de salmuera y agua,
- Datos de parámetros hidráulicos obtenidos a partir de pruebas hidráulicas realizados por SQM, y la reinterpretación de ensayos realizados por terceros,
- Datos meteorológicos (pluviometría) y evaporación de bandeja,
- Datos de evaporación desde la napa (lisímetros y domos),
- Datos de aforos,
- Datos de campañas hidroquímicas, monitoreo de calidad y caracterización isotópica de aguas subterráneas y superficiales,
- Datos e información geológica proveniente de campañas geofísicas y de perforación,
- Imágenes satelitales,
- Datos de monitoreo de las superficies lacustres.

#### 4.3.7.4.1.1.2 Antecedentes de organismos oficiales

La información de los organismos oficiales corresponde principalmente a la generada por la Dirección General de Aguas (DGA), como organismo del Estado que se encarga de promover la gestión y administración del recurso hídrico a nivel nacional. Esta información corresponde a los datos provenientes de la red hidrometeorológica, así como de documentos e informes técnicos especializados relacionados con el balance hídrico y disponibilidad del recurso para el otorgamiento de derechos de aprovechamiento de aguas en la cuenca del Salar de Atacama. Los estudios e informes técnicos más relevantes considerados han sido:

- DGA (1986). Informe hidrogeológico: evaluación de la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, cuenca Salar de Atacama, II región. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- DGA (1987). Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas.
- Orphanopoulos (1988). Informe Hidrogeológico: Evaluación de la disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas. Cuenca Salar de Atacama, II Región. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Santiago.
- Risacher y otros. (1999) Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones, Chile.
- DICTUC (2000). Estimación de Aportes Superficiales y Subterráneas del Salar de Atacama, Mediante el Modelo Estacional SEAMOD. (DGA, 1999). Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama, II Región: Minuta Técnica N° 60. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.
- DGA (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad.
- DGA (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. Informe Final Parte I: Hidrografía Regional del Altiplano de Chile. (S.I.T N° 157). Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.
- DICTUC (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. Parte IX. Sistema Hidrogeoquímica e isotopía regional del Altiplano de Chile. Santiago, Chile.
- DGA (2010). Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para construir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al Salar de Atacama. (S.I.T. 210., pp 277). Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.
- DGA (2012). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Atacama: informe técnico / Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos. Informe series SDT n°324.
- DGA (2013). Informe Técnico Análisis de la Oferta Hídrica del Salar de Atacama (SDT N°339). Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.
- DGA (2014). Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Informe Final S.I.T N° 357. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos.

- DGA (2014). Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en los sectores acuíferos del Salar de Atacama. Informe Técnico DARH N° 234.

#### 4.3.7.4.1.1.3 Antecedentes de Terceros

A continuación, se presentan los antecedentes elaborados por terceros que han sido considerados como fuente importante para la elaboración de este informe, según temática:

##### 4.3.7.4.1.1.3.1.1 General

Albemarle (2017, 2018, 2019, 2020, 2021). Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama” N° 1-5.

En estos reportes, Albemarle presenta los resultados del monitoreo periódico (anual) del sistema hidrológico e hidrogeológico general, en los cuales se analizan los comportamientos observados y/o estimados de las variables meteorológicas, evapotranspiración, superficies y niveles limnimétricos de lagunas, caudales superficiales, niveles fráticos en salmuera y agua, posición de la interfaz salina, calidad química del agua superficial y subterránea y caudales de extracción de salmuera y agua.

SRK Consulting (2020). Estudio hidrológico Salar de Atacama.

Este estudio desarrolla una caracterización de las distintas variables hidrológicas de la cuenca del Salar de Atacama.

Con respecto a las precipitaciones, se realizó un análisis de la información disponible para el período comprendido entre 1986 y 2019, estimando un promedio anual para cada estación y generando isoyetas representativas del período evaluado.

Para la estimación de recarga, se utilizó el método desarrollado para cuencas altiplánicas de norte de Chile (DGA; Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 2009), el cual estima una recarga en el largo plazo, con base en la precipitación, en la capacidad de infiltración de cada uno de los materiales presentes en el salar. Adicionalmente, se incluyen las entradas al sistema asociadas a la escorrentía de cada subcuenca.

La estimación de las salidas del sistema contempla descargas por evaporación desde el subsuelo, desde lámina libre y la evapotranspiración de la vegetación existente en la cuenca, para las cuales se utilizaron correcciones para agua y salmuera según correspondía.

Para el cálculo del balance hídrico, la cuenca fue dividida en una serie de zonas o sectores que permitieron balances por zonas y por unidades hidrogeológicas, diferenciando los sectores con base en su posición dentro de la cuenca (zonas altas, medias o bajas) y su posicionamiento sobre acuífero de agua o sobre el depósito de salmuera.

##### 4.3.7.4.1.1.3.1.2 Geología

Ramirez, C. & Gardeweg, M. (1982). Carta geológica de Chile. Escala 1:250.000. Hoja de Toconao. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).



Carta geológica elaborada por SERNAGEOMIN donde se presenta la geología en escala regional, geología estructural y estratigrafía. Se presenta, además, perfiles geológicos para caracterizar la geología subsuperficial.

Marinovic, N y Lahsen, A. (1984). Carta geológica de Chile. Escala 1:250.000. Hoja de Calama. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y minería (SERNAGEOMIN).

Mapa geológico de la zona norte de la cuenca del Salar de Atacama. Presenta geología, estratigrafía y geología estructural de la zona de estudio. Se presentan, además, perfiles geológicos para caracterizar la geología subsuperficial.

Hydrotechnica. (1987). Evaluation of brine reserves in the Salar de Atacama.

En este estudio, la geología fue abordada mediante el análisis de imágenes multiespectrales, la perforación de 38 sondajes, análisis de difracción de rayos X y análisis petrográfico con microscopía óptica, geofísica de pozos y superficial.

Jordan, Mpodozis, C., Muñoz, N., Blanco, N., Panamont, P., Gardew, M. (2007). Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of The Salar de Atacama Basin, northern Chile. Journal of South America Earth Sciences 23, 122-146.

Se presenta columna estratigráfica de pozo exploración "Toconao 1", perforado por ENAP. Presenta información estratigráfica hasta una profundidad de 5.425 m.

Golder Associates. (2017a). Anexo IV. 1. Modelo hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

Este estudio realiza un análisis de la geología del área Monturaqui-Negrillar-Tilopozo (MNT), donde se presenta un mapa con 5 perfiles geológico del área de estudio. Este estudio está orientado a identificar las unidades geológicas y los controles estructurales presentes en el sector de MNT, dentro del contexto geomorfológico y estructural de la cuenca.

SGA. Solución en Gestión Ambiental. (2015). Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

Se presenta un mapa geológico elaborado a partir de Hoja Toconao (Ramirez & Gardweg, 1982). Se presenta un análisis detallado de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio, marco estratigráfico, geomorfología y geología estructural. El apéndice C, presenta descripción estratigráfica detallada de 59 sondajes con los que se complementa la información estratigráfica.

MINSAL Ltda. (1988). Summary Report Clay Area. Salar de Atacama.

Se presenta una compilación de pozos realizados por MINSAL, donde se describen cinco unidades estratigráficas en la zona del Delta del Río San Pedro. Se realiza un análisis detallado de la geología de esta zona

#### 4.3.7.4.1.1.3.1.3 Hidrogeología

Pramar. (2006). EIA Cambios y mejoras en la operación minera en el Salar de Atacama.



Estudio que presenta información de trabajos realizados por Hydrotechnica y Minsal. Explica el funcionamiento hidrogeológico de los Sistemas Lacustres Soncor, Aguas de Quelana y Peine.

Se establece que no existe relación entre el comportamiento hidráulico de las lagunas del borde este con el comportamiento hidráulico del núcleo del Salar de Atacama. Además, el estudio hidrogeológico demuestra la existencia de una zona de baja permeabilidad que separa el acuífero de agua del acuífero de salmuera.

SGA. Solución en Gestión Ambiental. (2015). Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico sector sur del Salar de Atacama. EIA Proyecto modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama. Rockwood Lithium.

Se presenta un modelo hidrogeológico conceptual y numérico del Salar de Atacama. Los modelos se han elaborado a partir de antecedentes y aportan nueva información obtenida de campañas de terreno.

Este informe presenta mediciones mensuales de niveles estáticos en los acuíferos del núcleo y del margen. Esto se complementa con medición de aforos de aguas superficiales, isótopos, química de aguas y perfiles de conductividad eléctrica y temperatura. De forma adicional, se realizaron slug test y pruebas de bombeo para determinar parámetros hidráulicos en la zona sureste del núcleo del salar y en los sistemas lagunares de La Punta – La Brava y Peine.

CPH Consultores y asociados S.A. (2017) Adenda III Anexo 5. Estudio hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelo Conceptual. Proyecto SLM NX Uno de Peine Rev 0. EIA Planta de Producción de Sales de Potasio. Realizado para Minera SLM NX Uno de Peine.

En el informe conceptual preparado como línea base para su EIA, SLM NX Uno de Peine, presenta información proveniente principalmente de Rockwood Lithium y SQM. En este estudio se proponen tres unidades hidrogeológicas: basamento impermeable, núcleo del salar y borde del Salar de Atacama.

Se realiza una compilación de antecedentes de parámetros hidráulicos y se complementa con información nueva de sondajes de la zona NW del Salar de Atacama.

Golder Associates. (2017a). Anexo IV. 1. Modelo hidrogeológico. Modelo Hidrogeológico conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. EIA Proyecto Monturaqui. Minera Escondida.

El presente informe resume las principales variables hidrogeológicas a partir de los datos obtenidos en su catastro de pozos, análisis de niveles, pruebas hidráulicas y los derechos de aprovechamiento del sector. Para esto, se utilizó la información de 260 pozos, diferenciando entre los pozos de bombeo y observación, y seleccionando en cada caso pozos representativos para cada zona estudiada.

A partir del análisis e interpretación de los antecedentes y nueva información producida en el margen de este estudio, se subdivide el sistema Monturaqui-Negrillar-Tilopozo en 9 unidades hidrogeológicas. Se entregan rangos de parámetros hidráulicos para cada una de estas unidades.

Amphos 21 (2018). Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados para los salares de Atacama, Maricunga y Pedernales. Etapa III, informe final. Modelo Hidrogeológico Consolidado Cuenca Salar de Atacama.

En el capítulo de hidrogeología, Amphos 21 detalla las características hidrogeológicas de la cuenca a partir de los parámetros hidráulicos recopilados en antecedentes, presenta una descripción de las unidades hidrogeológicas e identificación de acuíferos, integrando toda esta información en un mapa hidrogeológico final.

La definición de unidades hidrogeológicas se basa en la guía de elaboración de mapas hidrogeológicos de Struckmeier & Margat (1995). De esta forma, la clasificación de las unidades se efectuó en función de las características litológicas, espesores y extensión de las unidades geológicas, así como también el potencial hidrogeológico que presentan a partir de los parámetros hidráulicos. Se define un total de 6 unidades hidrogeológicas.

La geometría de los acuíferos es presentada en un modelo 3D de Leapfrog.

#### 4.3.7.4.1.2 Topografía

Se confeccionó un Modelo Digital de Elevación (DEM, de nombre DEM\_WGS84\_BaseCANO-Extendido\_26052021), a partir de un DEM proveniente del SRTM con resolución espacial de 30 metros y cuya extensión se detalla en la Figura 4-28. El sistema de coordenadas utilizado es el EPSG 32719 (UTM WGS84, 19S). Cabe destacar que el modelo de elevación resultante está basado en la actual red ambiental, respetando la elevación de terreno de todos los puntos del PSAH.

Tabla 4-21. Extensión del DEM\_WGS84\_BaseCANO-Extendido (EPSG: 32719).

	ESTE	NORTE
Mínimo	539967	7360014
Máximo	609987	7482024

Fuente: SQM, 2021.

También se utilizaron datos de campo proveniente de las cotas de terreno de los pozos medidos por el equipo topográfico de SQM, y se seleccionaron aquellas referidas a las bases geoidales Cañón del Diablo y Socaire 2, las cuales poseen elevaciones relativas al nivel medio del mar, según el modelo EGM96.

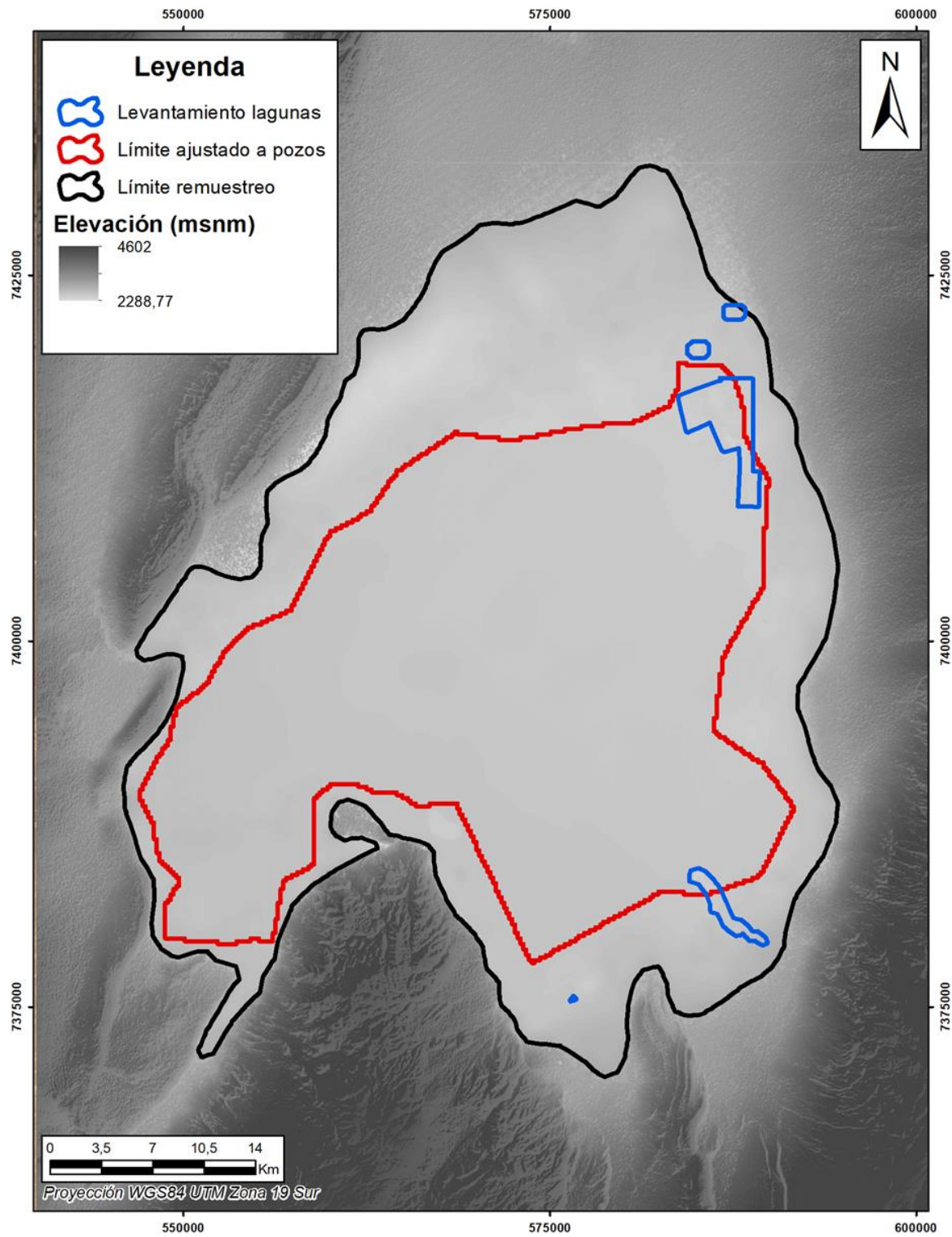
En un primer tratamiento Modelo Digital de Elevación constó de tres partes:

- Área externa: Corresponde el DEM SRTM con elevaciones ajustadas al modelo EGM96 y de extensión especificada en la Tabla 4-21.
- Límite de remuestreo: Delimitado por el contorno negro en la Figura 4-28, este segmento es tratado con un “Filtro Paso Bajo” con herramienta *Resampling Filter* de QGIS, con la finalidad de disminuir el ruido y suavizar la superficie.
- Límite ajustado a pozos: Delimitado por el contorno rojo en la Figura 4-28, esta zona cuenta mayor densidad de Pozos referidos a la base geoidal Cañón del Diablo y Socaire 2.

Luego, en un segundo tratamiento, se buscó suavizar la superficie dentro del límite negro, y disminuir la transición con el área delimitada por la línea roja, Figura 4-28. Para ello, se realizó un muestreo aleatorio mediante la herramienta complementaria *Point Sampling Tool* de QGIS, obteniendo una nube de 673.141 puntos incluyendo las cotas de terreno de los pozos de base Cañón del Diablo y Socaire 2. Con esta nube se procedió a obtener una superficie interpolada con el algoritmo *Radial Basis Function* (RBF) en el software Surfer, obteniendo una superficie suavizada y cercano a los valores de las cotas de los pozos. Para mayor exactitud en los píxeles donde se ubica un pozo cualquiera, se le ajustó su valor a la cota de terreno. En el caso de la existencia de dos o más pozos en un mismo píxel, se obtiene un valor promedio.

Como último tratamiento aplicado, se integraron datos de modelos digitales de superficie y batimétricos obtenidos mediante un Vehículo Aéreo No tripulado (UAV) y técnicas aerofotogramétricas en los sistemas lagunares de Soncor, Tilopozo y Peine. Estos levantamientos fueron realizados en el año 2018 por la empresa Topoland Ingeniería S.A, y sus modelos digitales de superficie poseen elevaciones geoidales referidas al Modelo EGM96. Los valores de estos datos fueron re-muestreados a píxeles de 30 x 30 m para su ajuste a la resolución del DEM procesado. Como resultado de estas incorporaciones se obtuvo el DEM\_WGS84\_Base-CANO-Extendido\_26052021.

Figura 4-28. DEM utilizado en el estudio.



Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.4.1.3 Catastro de sondajes

Para el presente estudio se cuenta con un total de 1435 puntos de control. De ellos, 125 se utilizaron para la caracterización geológica, 650 han sido utilizados para los análisis hidráulicos de las unidades geológicas (Figura 4-29); 509 para análisis de niveles freáticos y piezométricos (Figura 4-30) y 718 para análisis hidroquímicos e isotópicos superficiales y subterráneos (Figura 4-31).

La información relativa a los pozos considerados corresponde fundamentalmente a los de la red del Plan de Seguimiento Ambiental (PSAH) y de monitoreo complementario de SQM. Adicionalmente, se consideran los pozos del plan de monitoreo ambiental de Albemarle, los pozos de extracción de agua y salmuera tanto de SQM como de Albemarle, y datos de infraestructuras del registro histórico (eg. Hydrotechnica, 1987; MINSAL, 1988 y 1989).

Por su parte, la Tabla 4-22 resume el número y tipo de puntos de extracción, tanto de agua dulce como salmuera, y de reinyección. Para facilitar el posterior análisis numérico, se han utilizado Puntos de Extracción Equivalente (PEEX), los que representan las extracciones en conjunto por cada 1 km<sup>2</sup> de área, distribuidas dichas áreas en una grilla regular (ver Anexo 5.1 Modelo hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama). La información recopilada se presenta consolidada en el Anexo 5.1 Modelo hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama y se sintetiza en la Tabla 4-22.

**Tabla 4-22. Resumen del tipo y cantidad de puntos de extracción y reinyección considerados.**

Tipo de punto	Cantidad	Propietario
Punto equivalente de extracción de salmuera	258 <sup>1</sup>	SQM
Pozo de extracción de agua	6 <sup>2</sup>	SQM
Punto de reinyección de salmuera	4	SQM
Pozo de extracción de salmuera	50	ABL
Pozo de extracción de agua	3	ABL

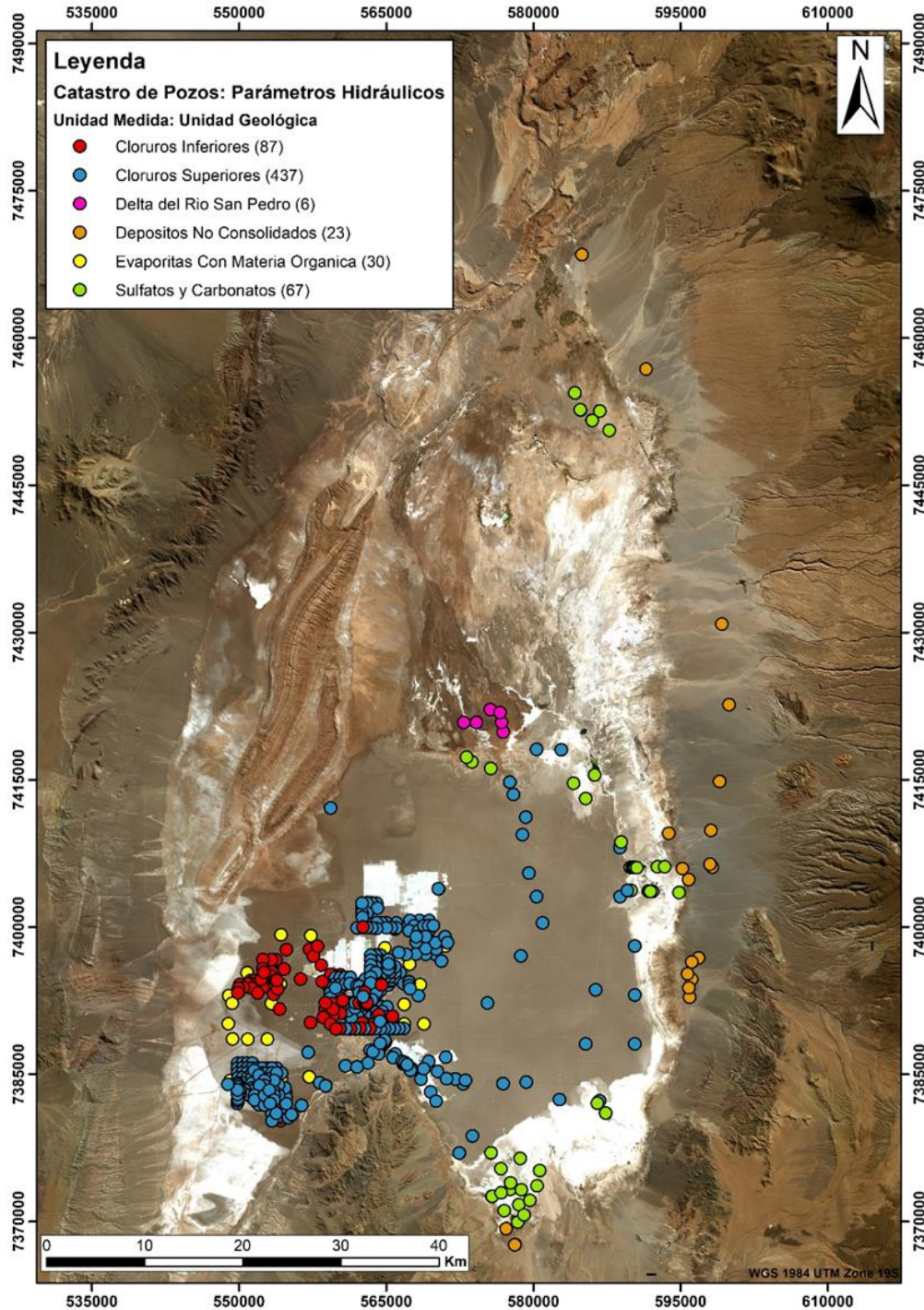
Fuente: SQM, 2021.

<sup>1</sup> Corresponde a un número referencial utilizado para efectos de modelación numérica y no al número de pozos operados.

<sup>2</sup> Los pozos autorizados corresponden a cinco: Mullay-1, Allana, Camar-2, Socaire-5 y CA-2015. Sin embargo, por un periodo de tiempo se utilizó el pozo P2 en lugar del pozo CA-2015, con el cual, el total de pozos de extracción de agua corresponde a seis.

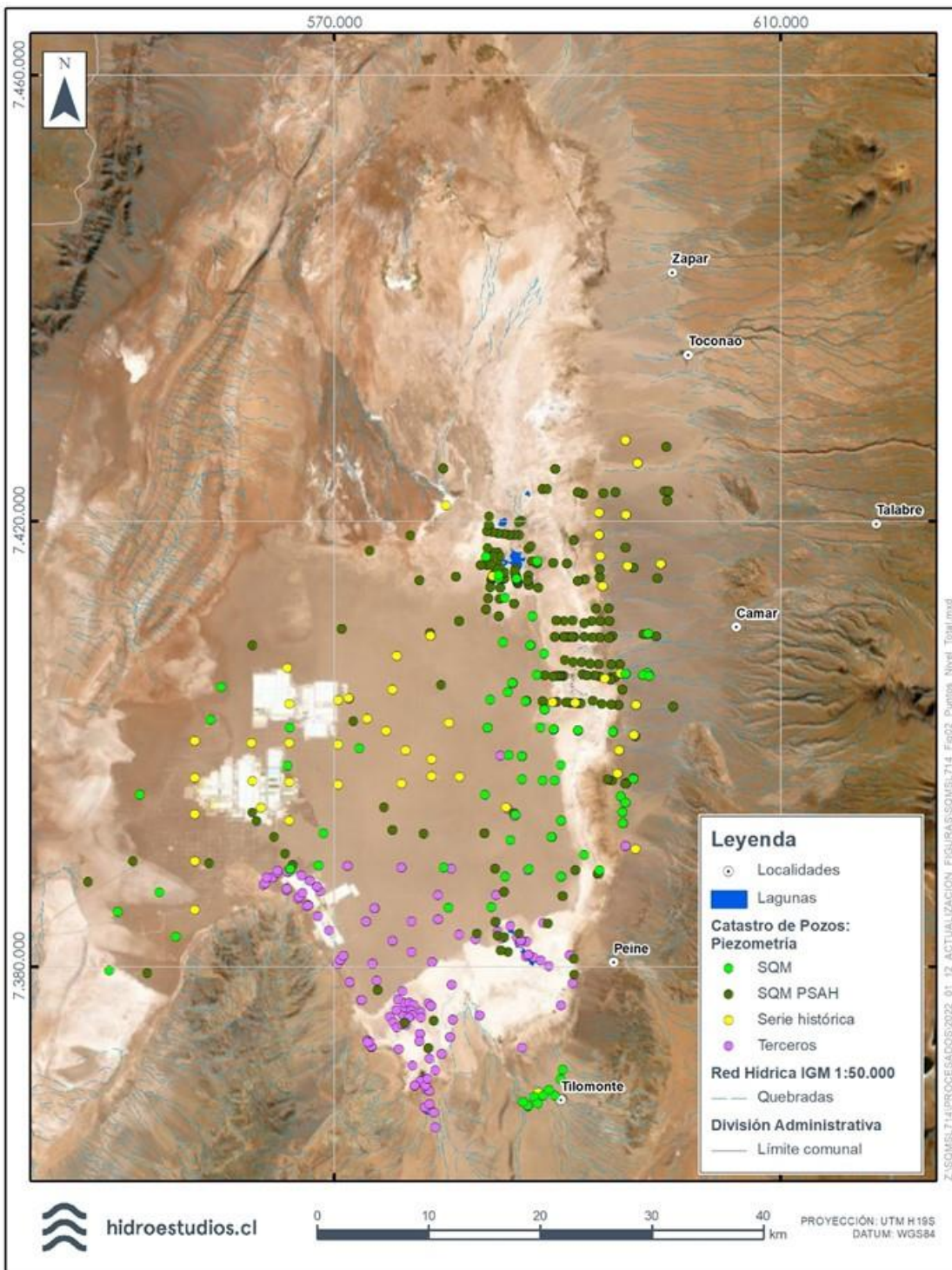


Figura 4-29. Catastro de pozos utilizados para la definición de unidades hidrogeológicas y análisis de parámetros hidráulicos. Se distinguen los puntos de acuerdo con la unidad geológica a la cual se asocia la medición.



Fuente: SQM, 2021.

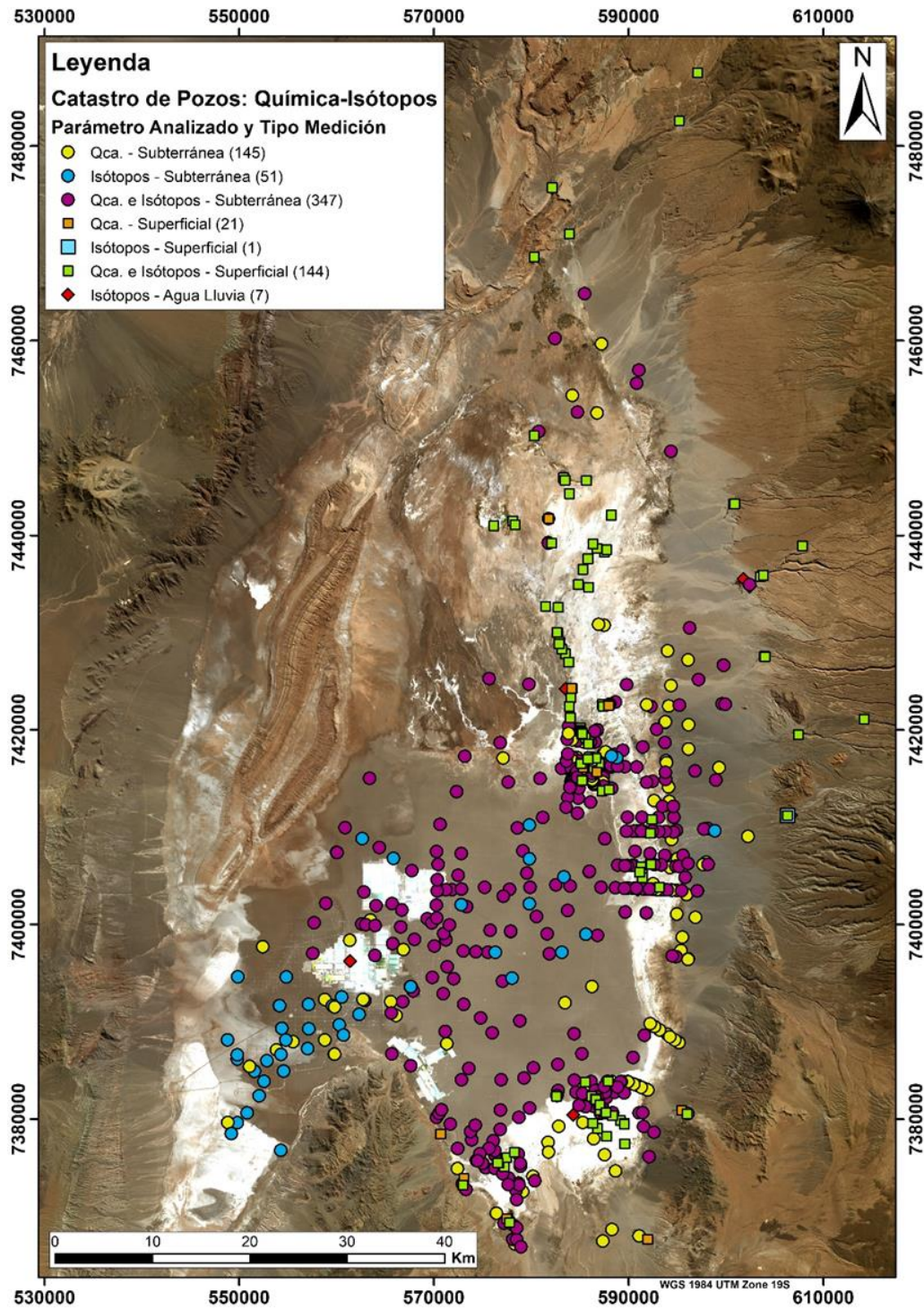
Figura 4-30. Catastro de pozos utilizados para la confección de mapas piezométricos. Se distinguen los puntos de acuerdo con la fuente de la cual se obtuvo la información de niveles.



Fuente: Hidroestudios, 2021.



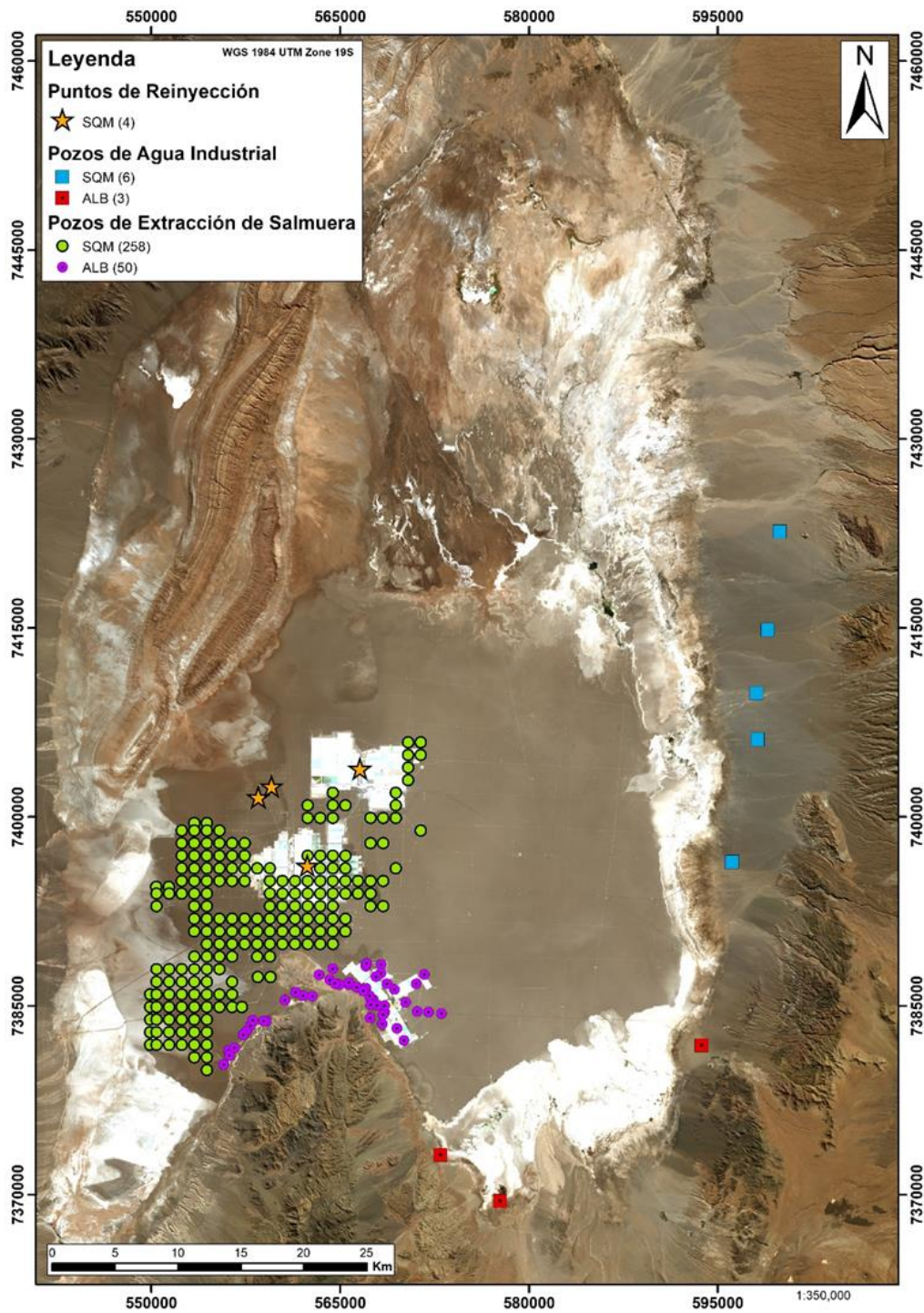
Figura 4-31. Catastro de pozos utilizados para el análisis de química e isótopos. Se indica el parámetro medido en cada uno de estos puntos.



Fuente: SQM, 2021.



Figura 4-32. Distribución de puntos de extracción, puntos de extracción equivalente y de reinyección para SQM, y puntos de extracción de ABL.



Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.4.1.4 Estudios geofísicos

Para conceptualizar la geología subsuperficial del Salar de Atacama, se revisó y verificaron trabajos tanto de geofísica de superficie como de geofísica de pozo que han sido de apoyo en distintas áreas geográficas y etapas de modelación. En total se integraron más de 770 kilómetros lineales de estudios de geofísica de superficie, cuyos datos fueron adquiridos principalmente mediante contratistas (Tabla 4-23); y más de 50 kilómetros lineales de perfilaje de pozos mediante metodologías de geofísica de pozos, principalmente desarrollada por SQM desde la adquisición de sus datos hasta su integración final en los distintos modelos (Tabla 4-24).

Es importante mencionar los resultados de sísmica de reflexión integrados, donde si bien no se cuentan en la actualidad con trabajos propios encargados por SQM, se realizó una revisión a publicaciones y trabajos de carácter científico (Muñoz *et al.*, 2002; Jordan *et al.*, 2002, 2007; Arriagada, 2003, 2009; Pananont *et al.*, 2004; Arriagada *et al.*, 2006; Universidad de Chile, 2016; Rubilar *et al.*, 2018; Figura 4-33 y Figura 4-34 a)). En la Figura 4-33, la fuente de los datos TEM, NanoTEM, Magnetotelúrica y Tomografía Eléctrica corresponden a Geodatos (2000, 2005, 2017), NX-UNO (2004, 2006, 2007, 2011), DGA (2014), IGT (2012), Rio Chilex (1999), RWL (2012, 2013). La Figura 4-34b muestra un ejemplo de sección TEM utilizada para la determinación de la posición de la interfaz salina. Este análisis ha sido importante en el entendimiento del comportamiento estructural y estratigráfico del Salar de Atacama.

Tabla 4-23. Resumen de información geofísica lineal revisada e integrada para la conceptualización de la geología subsuperficial.

GEOFÍSICA DE SUPERFICIE		
Metodología	Secciones estudiadas	Largo de estudio
TEM	120 perfiles	643 km lineales
TEM y NanoTEM	9 perfiles	54 km lineales
Magnetotelúrica	5 perfiles	67 km lineales
Tomografía Eléctrica de alta resolución	6 perfiles	7,3 km lineales

Fuente: SQM, 2021.

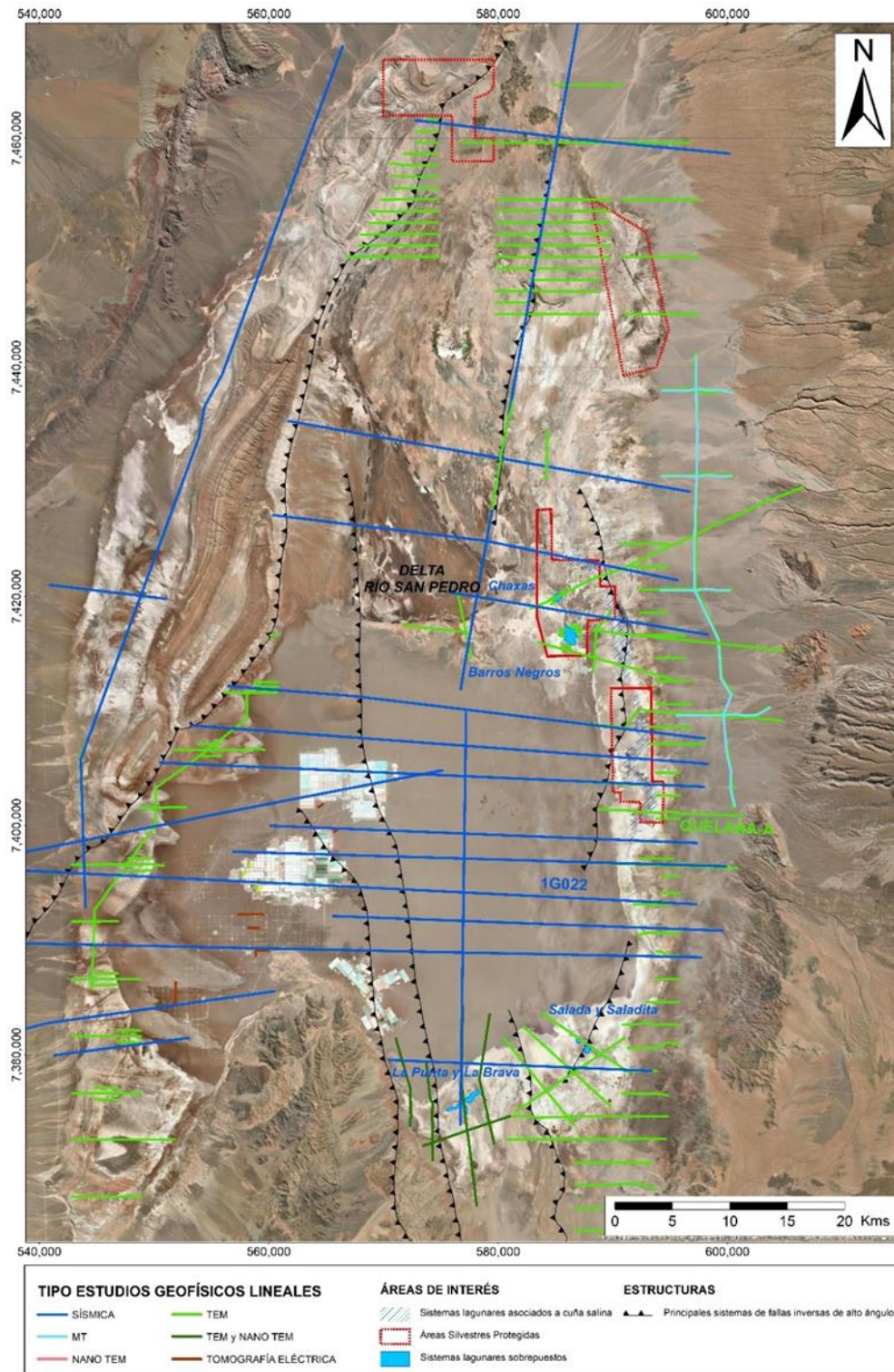
Tabla 4-24. Resumen de información geofísica de pozos revisada e integrada para la conceptualización de la geología subsuperficial.

GEOFÍSICA DE POZOS		
Metodología	Secciones estudiadas	Largo de estudio
Caliper	234	18,531 m lineales
Gamma Natural	238	18,090 m lineales
NMR	94	12,650m lineales

Fuente: SQM, 2021.

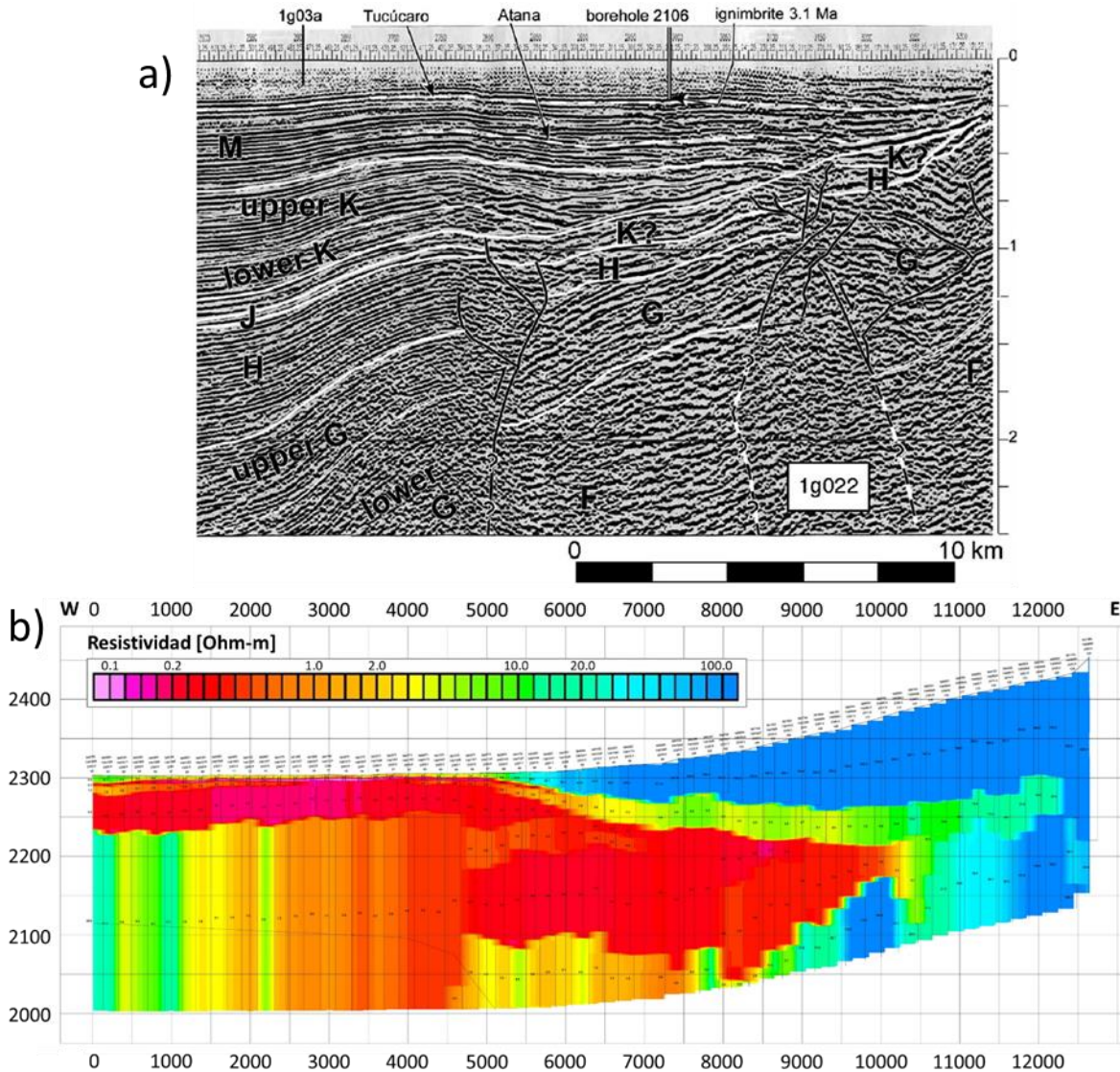


Figura 4-33. Tipo de geofísica lineal realizada en el Salar de Atacama.



Fuente: Citadas en texto

Figura 4-34. Ejemplos de secciones geofísicas utilizadas para la caracterización geológica e hidrogeológica del Salar de Atacama, ubicación en Figura 4-33. (a) Sección sísmica 1g022 (ENAP) interpretada por Jordan et al. (2007). (b) Sección TEM levantada por Geodatos (2017) para SQM en Sector de Quelana.



Fuente: (a) Sección sísmica 1g022 (ENAP) interpretada por Jordan et al. (2007). (b) Sección TEM levantada por Geodatos (2017) para SQM en Sector de Quelana.



#### 4.3.7.4.2 Geología

La sección de geología se presenta dentro del capítulo de caracterización hidrogeológica regional, y se presenta un resumen de la geomorfología, geología superficial, subsuperficial y estructural, abordados con detalle en la Línea de Base de Geología y Geomorfología.

La metodología utilizada en dicha Línea de base consta de los siguientes pasos:

- Recopilación y revisión de antecedentes
- Análisis y actualización de la información existente

##### 4.3.7.4.2.1 Revisión bibliográfica Geología

En particular, la caracterización geológica y geomorfológica acá presentada se basa en la información contenida en el EIA del proyecto “Actualización Plan de Alerta Temprana y Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama” (SQM, Proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental. Apéndice 4.1. Línea de Base de Geología. , 2020).

Otros estudios desarrollados por SQM, y utilizados en la elaboración de la presente Línea de Base, corresponde al “Estudio Estructural de la Zona Marginal, sector Oriente del Salar de Atacama”, informe elaborado por el Departamento de Geología de la Universidad de Chile para SQM Salar S.A, el año 2016.

Adicionalmente, se revisó información de organismos oficiales, la cual corresponde principalmente a cartas geológicas publicadas por el Servicio Nacional de Geología y minería (SERNAGEOMIN). Las siguientes cartas fueron consideradas para la realización de la Línea de Base presentada por SQM (2020) y para esta actualización:

- Carta Cerro Químal, Región de Antofagasta (2012), escala 1:100.000 (Basso & Mpodozis, 2012)
- Carta Sierra Mariposa, Región de Antofagasta (2012), escala 1:100.000 (Cortés, 2012).
- Geología del área Cerro Lila-Peine, Región de Antofagasta (2013), escala 1:100.000 (Niemeyer, 2013)
- Geología del área Salar de Atacama, Región de Antofagasta (2014), escala 1:100.000 (Becerra et al., (2014)).
- Geología del área San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta (2013), escala 1:100.000 (Henríquez et al., (2014)).
- Geología del área Imilac-Quebrada Huanaqueros, Región de Antofagasta (2014), escala 1:100.000 (Solari et al., (2017)).
- Mapa geológico del Área de los Volcanes Socompa y Pular (1991), escala 1:100.000 (Ramírez et al., (1991)).
- Mapa geológico del Área de Imilac y Sierra Almeyda (1994), escala 1:100.000 (Gardeweg, et al., (1994)).
- Hoja Calama (1984), escala 1:250.000 (Marinovic & Lahsen, 1984)

- Hoja Toconao (1982), escala 1:250.000 (Ramírez & Gardeweg, 1982)
- Informe MINSAL (1988), Mapa geológico superficial Salar de Atacama, escalas 1:100.000; 1:61.620 y 1:24.800 (Bevacqua, 1988)

Finalmente, los antecedentes elaborados por terceros que han sido considerados como fuente importante de información para la elaboración de este informe, son los siguientes:

- Hydrotechnica. (1987). Evaluation of brine reserves in the Salar de Atacama.
- Jordan, Mpodozis, C., Muñoz, N., Blanco, N., Panamont, P., Gardew, M. (2007). Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of The Salar de Atacama Basin, northern Chile. *Journal of South America Earth Sciences* 23, 122-146.

#### 4.3.7.4.2.2 Trabajos de terreno

Dentro del marco del EIA del proyecto “Actualización Plan de Alerta Temprana y Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama” (SQM, Proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental. Apéndice 4.1. Línea de Base de Geología. , 2020), se realizaron campañas de terreno que permitieron complementar la información generada en gabinete para una mejor definición de las unidades geológicas y geomorfológicas reconocidas.

#### 4.3.7.4.3 Parámetros hidráulicos

Para el análisis de los parámetros hidráulicos se contó con información de 650 puntos con pruebas hidráulicas, correspondientes a resultados de ensayos de bombeo, Slug test y pruebas Lefranc, las cuales fueron complementados con datos recopilados de antecedentes de terceros.

Las pruebas hidráulicas fueron interpretadas con el fin de obtener valores de permeabilidad (K) y almacenamiento (S), obteniéndose 643 y 80 respectivamente.

Los parámetros obtenidos, se asignaron a las diversas unidades geológicas correspondientes, caracterizando así el potencial hidráulico de estas y definiendo sus características hidrogeológicas.

#### 4.3.7.4.4 Interfaz Salina

En esta sección se presenta el reconocimiento de la interfaz salina en superficie y en profundidad en el Salar de Atacama.

En el Informe N° 28 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” (SQM Salar 2021b) se definió una clasificación de tipos de fluido a partir de valores de sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE) y densidad. Los tipos definidos corresponden a agua dulce, zona de transición y salmuera; sin embargo, para efectos del presente EIA, se reclasificó la salmuera dependiendo de su equilibrio químico.

La clasificación generada consta de cuatro tipos de agua: agua dulce, zona transición, salmuera subsaturada y salmuera en equilibrio. La interfaz salina corresponde a la unión de las zonas: zona de transición y salmuera subsaturada.

Para el reconocimiento de la interfaz salina en superficie, utilizaron una serie de criterios de validación, a partir de los cuales se validaron 148 puntos.

Por otro lado, para el reconocimiento de la interfaz salina en profundidad se utilizaron: 19 perfiles TEM y 25 perfilajes de CE en pozos.

#### 4.3.7.4.5 Cuerpos de agua superficial

La sección de cuerpos de agua superficial presenta los cuerpos lagunares existentes en el Área de estudio y, en caso de aplicar, los escurrimientos superficiales aportantes a ellos.

En el capítulo de caracterización regional se entrega un contexto de estos cuerpos y su distribución en la zona, mientras que en los capítulos de caracterización local se entregan detalles de áreas, niveles, y funcionamiento general de las lagunas.

#### 4.3.7.4.6 Caudales de extracción

En esta sección se presentan los caudales aprobados de extracción de salmuera y los derechos de agua vigentes.

Adicionalmente, se presentan los caudales de extracción históricos reales hasta la fecha.

Las fuentes de información de los caudales, tanto aprobados como efectivos, son las siguientes:

- RCA 226/2006 del proyecto “EIA Cambios y mejoras de la operación Minera en el Salar de Atacama.
- RCA 21/2016 del proyecto “EIA modificaciones y mejoramiento del sistema de pozas de evaporación solar en el Salar de Atacama”
- Informe de Plan de seguimiento ambiental hídrico (PSAH) Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual N° 5, Período enero – diciembre 2020. Albemarle.
- Información reportada a los respectivos organismos reguladores de caudales de extracción SQM.

#### 4.3.7.4.7 Niveles de agua subterránea y piezometría

A partir de información de monitoreo de niveles en pozos distribuidos en toda la zona, se analizó el comportamiento de estos asociados a sectores, extracciones y precipitaciones.

La principal fuente de información de niveles subterráneos corresponde a los pozos pertenecientes al Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico, comprometido a través de la RCA 226/2006

Para el análisis de niveles, se realizó una piezometría para el estado preoperacional (1986) y el periodo actual (2020). Debido a la diferencia de densidad en los fluidos presentes en la zona, se presenta una piezometría regional corregida a salmuera.

#### 4.3.7.4.8 Unidades hidrogeológicas

Las unidades geológicas reconocidas en superficie y subsuperficie fueron agrupadas en unidades hidrogeológicas, según criterios como su potencial para constituir acuíferos, su geometría y parámetros hidráulicos.



En el caso de aquellas unidades que no cuenten con información hidráulica de las pruebas de bombeo y pruebas de slug, se tomaron valores referenciales de la literatura representativos de sus características litológicas.

#### 4.3.7.4.9 Balance Hídrico

Para la estimación del balance hídrico, la cuenca del Salar de Atacama se divide en zonas de balance, las cuales son agrupadas en función de los siguientes criterios: (1) posición geográfica, entre zonas norte, sur, este y oeste; (2) altitud, entre zonas altas, medias y bajas; y (3) tipo de fluido analizado, el cual puede ser agua o salmuera.

A partir de los anterior, se realizó una estimación conceptual del balance hidrogeológico tanto a nivel regional como de los sistemas locales. Esta estimación se basa en el reconocimiento y cuantificación de las recargas (precipitaciones e infiltraciones) y descargas (extracciones, evaporación, descargas subterráneas) que afectan al sistema hidrogeológico.

Adicionalmente se presentan los mecanismos de ingresos de flujo al núcleo y balances de agua específicos para las lagunas principales presentes en los sistemas locales.

El Balance hídrico acá presentado se basa principalmente en el estudio de SRK. (2020). Estudio Hidrológico Salar de Atacama.

#### 4.3.7.5 Resultados

##### 4.3.7.5.1 Caracterización Hidrogeológica Regional

##### 4.3.7.5.1.1 Geología

En la Línea de base de Geología y Geomorfología se entrega el detalle de la geomorfología y geología del proyecto. Sin embargo, con el objeto de entregar un contexto general para la caracterización del componente hidrogeológico, es que en el presente capítulo se presenta un resumen y simplificación de la descripción a nivel regional.

##### 4.3.7.5.1.1.1 Geomorfología

La Cuenca del Salar de Atacama se caracteriza por la presencia de siete rasgos morfoestructurales y geomorfológicos, de primer orden, de rumbo aproximadamente nor-noreste a norte-sur (Figura 4-35). Estas unidades están limitadas por sistemas estructurales de escala regional y presentan diferentes extensiones, alturas y unidades aflorantes. De oeste a este, ellas corresponden a: Cordillera de Domeyko, Llano de la Paciencia, Cordillera de la Sal, Planicie Aluvial, Salar de Atacama (el cuál se compone del núcleo, zona de transición este y zona marginal), Cordón de Lila y Cordillera Occidental sur (Figura 4-35). La misma figura, indica también la ubicación del Delta de San Pedro entre la Planicie Aluvial y el Salar, además del Arco Volcánico Actual, correspondiente a una parte de la Cordillera Occidental.

En la Tabla 4-25 se presenta un resumen con la descripción de cada una de las unidades morfoestructurales descritas en la Cuenca del Salar de Atacama y en la Figura 4-35 se presenta una sección oeste-este donde se representa su disposición y relación con los sistemas estructurales.

**Tabla 4-25. Características de las principales unidades morfoestructurales reconocidas en la cuenca del Salar de Atacama.**

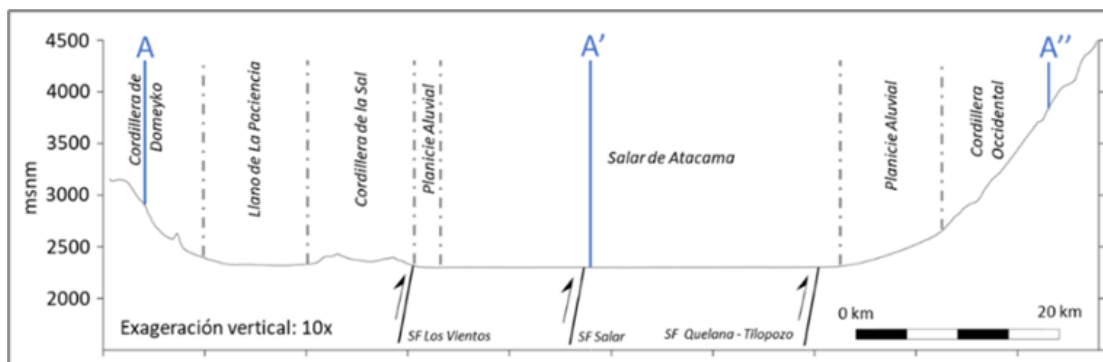
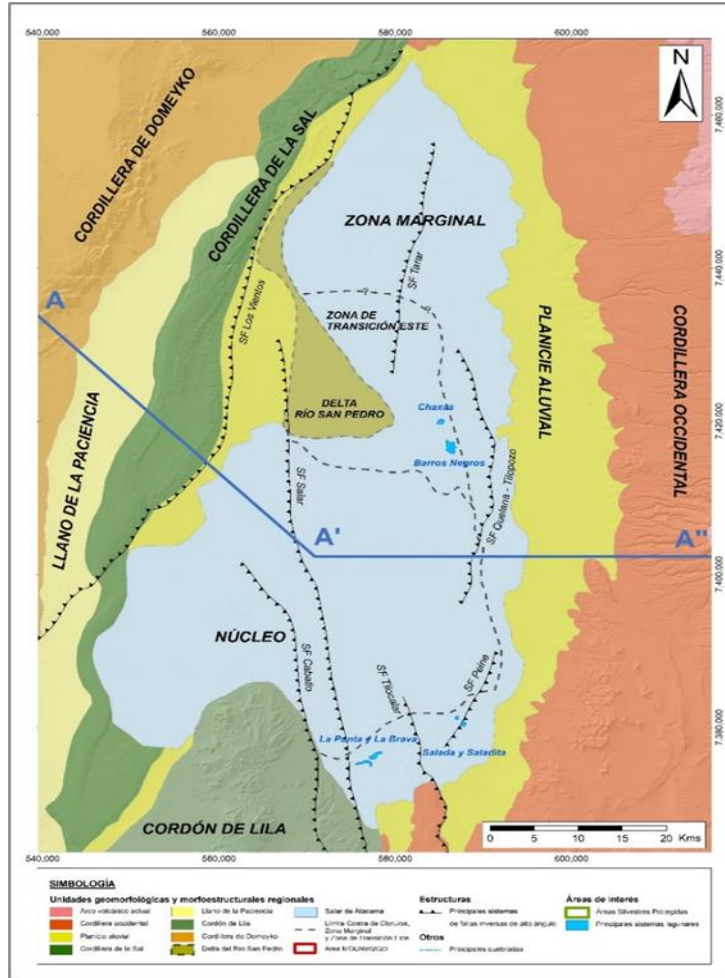
Unidad	Descripción	Fuentes de referencia
Cordillera de Domeyko	Cadena montañosa alzada y erosionada en el Eoceno, de más de 100 km de extensión y ancho promedio de 10 km. Su altura media es de 3.000 m.s.n.m., alcanzando cerca de 3.200 m.s.n.m. en los alrededores del Salar de Atacama. Constituida por secuencias de areniscas, conglomerados y evaporitas del Mesozoico y Cenozoico, dispuestos en discordancia sobre el basamento que corresponde a complejos magmáticos del Paleozoico y Triásico. En su borde oriental limita con el Llano de la Paciencia y con la Cordillera de la Sal.	(Muñoz et al., 2002); (Arriagada, 2009); (SQM, 2021a).
Llano de la Paciencia	Cuenca intermontaña, endorreica, ubicada entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de la Sal. Tiene una extensión de 136 km <sup>2</sup> (NNE) y lo componen secuencias paleógenas y neógenas no consolidadas correspondientes a flujos de barro y detritos provenientes del oeste, depósitos	(Muñoz et al., 2002); (Arriagada, 2009); (SQM, 2021a).

Tabla 4-25. Características de las principales unidades morfoestructurales reconocidas en la cuenca del Salar de Atacama.

	evaporíticos locales y depósitos aluviales, coluviales y eólicos recientes.	
Cordillera de la Sal	Ubicada entre el Llano de la Paciencia y el Salar de Atacama. Corresponde a un alto estructural de hasta 200 m respecto del Salar, y casi 80 km de extensión, limitada por fallas de alto ángulo. Contiene secuencias sedimentarias y evaporíticas consolidadas (Fm. San Pedro, Fm. Vilama, Fm. Campamento), depósitos aluviales actuales y flujos ignimbríticos neógenos en el norte.	(Muñoz et al., 2002); (Arriagada, 2009); (SQM, 2021a).
Salar de Atacama	Planicie limitada por depósitos aluviales por el este, oeste y norte, y por el Cordón de Lila, al sur. Su extensión es de aproximadamente 3.000 km <sup>2</sup> , con 100 km de largo y 50 km de ancho. Incluye la zona marginal, zona de transición este y el núcleo, y contiene depósitos aluviales y evaporíticos que gradan desde los bordes hacia el núcleo en facies de carbonatos y sulfatos, hasta llegar a las facies cloruradas del núcleo. El núcleo es plano, con márgenes irregulares y un alto grado de rugosidad debido a la evaporación y formación de grietas de desecamiento. Su relleno consta de una serie de sedimentos clásticos y evaporíticos desde el Mioceno superior alcanzando una potencia de 1.400 m en algunas zonas.	(Ramírez & Gardeweg, 1982); (Bevacqua, 1994); (Muñoz et al., 2002); (SQM, 2021a).
Cordillera Occidental	Se ubica al este de los abanicos aluviales del límite oriental del Salar de Atacama y contiene al actual arco volcánico. Afloran secuencias de lava, ignimbritas y sedimentos paleozoicos y triásicos, cubiertos en discordancia por depósitos de ignimbritas neógenas. Todas estas secuencias están disectadas por quebradas y cubiertas por depósitos aluviales del piedemonte.	(Muñoz et al., 2002); (Arriagada, 2009); (SQM, 2021a).
Cordón de Lila	Bloque alzado en promedio 3.200 m.s.n.m. que hacia el norte descende en altura y desaparece bajo el relleno evaposedimentario del Salar de Atacama. Afloran rocas ígneas y sedimentarias del Paleozoico, y unidades volcánicas y plutónicas del Mesozoico y Cenozoico, parcialmente cubiertas por ignimbritas neógenas.	(Muñoz et al., 2002); (Niemeyer, 2013); (SQM, 2021a).

Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-35. Salar de Atacama, indicando los principales rasgos morfológicos y estructurales. Arriba: Mapa geomorfológico. Abajo: Transecta que destaca los principales rasgos morfoestructurales y sistemas de falla. La traza se indica en el mapa.



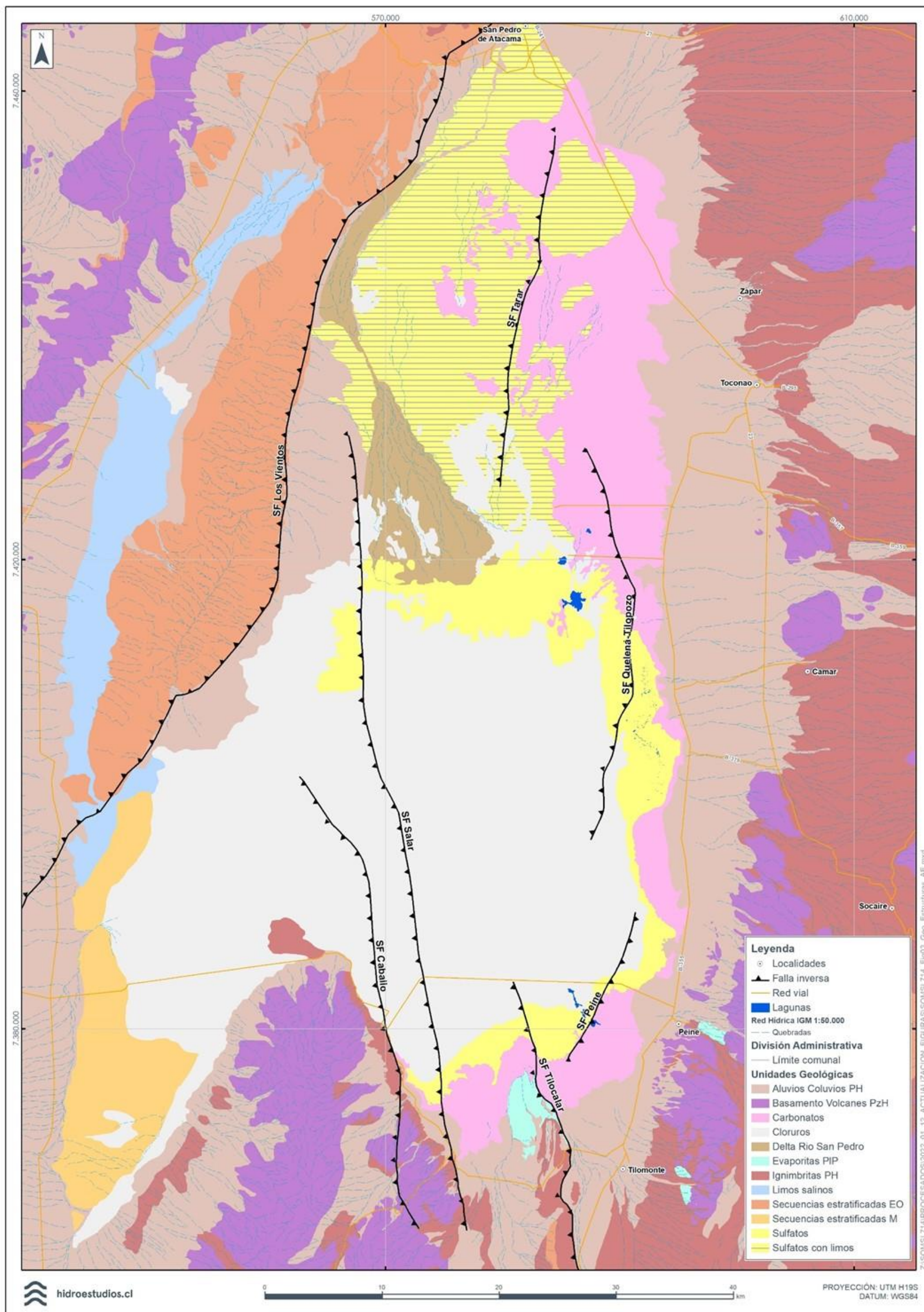
Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.1.2 Geología Superficial

La superficie de la Cuenca del Salar de Atacama y su entorno está caracterizada por el afloramiento de rocas ígneas y sedimentarias, de edad paleozoica a holocena; depósitos no consolidados y secuencias evaporíticas (Figura 4-36), encontrándose, en general, delimitadas y cortadas por sistemas de fallas regionales (SQM, 2020b). La Tabla 4-26 resume las características de las unidades expuestas en superficie.



Figura 4-36. Mapa geológico del Salar de Atacama, indicando unidades geológicas simplificadas y estructuras.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Tabla 4-26. Resumen unidades geológicas superficiales.

Unidad Geológica	Rango Edad	Litología	Afloramientos	Relaciones de Contacto
Basamento	Paleozoico a Holoceno	Intrusivos y secuencias deltaicas, continentales y volcánicas.	Partes altas de la Cordillera de Domeyko, Cordón de Lila y al este de la planicie aluvial oriental (Cordillera Occidental).	Cubiertos por secuencias sedimentarias continentales (Eoceno-Oligoceno), ignimbritas neógenas y depósitos no consolidados.
Secuencias Estratificadas del Eoceno-Mioceno	Eoceno a Pleistoceno	Secuencias continentales clásticas, niveles volcánicos y evaporíticos.	Cordillera de la Sal, localmente en la Cordillera de Domeyko y en la Cordillera Occidental (Estratos de Quepe, al este de Peine).	Sobreyacen al basamento, engranan lateralmente con depósitos ignimbríticos neógenos. Cubiertos por depósitos no consolidados, ignimbritas neógenas y por limos salinos del Llano de la Paciencia.
Secuencias Estratificadas del Mioceno superior	Mioceno Superior	Areniscas, arcillolitas pardo-rojizas a anaranjadas y abundante contenido de evaporitas.	Al suroeste del Salar de Atacama, al sur del SF Los Vientos.	Parcialmente cubierta por depósitos del salar moderno, por depósitos no consolidados y por limos salinos del Llano de la Paciencia. Contacto por falla bajo los niveles medios e inferiores de las Secuencias Estratificadas del Eoceno al Mioceno.
Depósitos Ignimbríticos del Mioceno al Presente	Mioceno al Presente	Flujos de ceniza y aglomerados, débilmente consolidados, y secuencias de tobas riolíticas a dacíticas soldadas.	Cubriendo extensas áreas de la Cordillera Occidental; en las faldas del Cordón de Lila y localmente en la parte norte de la Cordillera de la Sal y zonas de la Cordillera de Domeyko.	Discordantes sobre el Basamento y Secuencias Estratificadas del Eoceno al Mioceno; con estas últimas, también presentan relación de engrane. Parcialmente cubiertos por depósitos fluviales, aluviales y eólicos, y por sedimentos salinos del salar. Sobreyacen localmente a depósitos lacustres de limo y yeso del Salar.
Evaporitas Antiguas	Plioceno a Pleistoceno	Depósitos lacustres calcáreos a silíceos.	En el ápice de la Península de Tilocalar y en Peine.	Sobreyacen parcialmente, en discordancia, a la Ignimbrita Tucúcaro (Peine) y están cubiertas por depósitos aluviales y salinos.
Limos salinos del Llano de la Paciencia		Depósitos morrénicos de till y depósitos de limos y arcillas, con algo de evaporitas.	Localmente en el Llano de la Paciencia.	Parcialmente cubiertos por depósitos aluviales recientes.
Depósitos no consolidados (Aluvios Coluvios, PH)	Oligoceno a Holoceno	Depósitos aluviales, fluviales, eólicos, laháricos y morrénicos de tipo gravas, brechas, arenas y limos, con matrices arenosas, arcillosas y salinas.	En el Llano de la paciencia, y en piedemonte de la Cordillera Occidental, en las cercanías de los centros eruptivos (actuales e inactivos) y en las faldas del Cordón de Lila.	Sobreyacen discordantes al Basamento, a las Secuencias del Eoceno al Mioceno y a las Ignimbritas Neógenas. Con estas últimas presentan también relación de engrane.

Tabla 4-26. Resumen unidades geológicas superficiales.

Delta del Río San Pedro		Cloruros, carbonatos, arenas, limos y arcillas del lóbulo activo del Delta.	Sector norte centro-norte del Salar de Atacama.	Informes internos
Depósitos Cuaternarios evaporíticos		Facies carbonatadas, sulfatadas y cloruradas.	Zona Marginal y Núcleo del Salar de Atacama, formando una zonación química de Carbonatos, Sulfatos y Cloruros, respectivamente.	Las distintas facies engranan lateralmente entre ellas (Carbonatos-Sulfatos-Cloruros). Engranar también con las facies aluviales del este (Carbonatos y Sulfatos) y del oeste (Cloruros). Sobreyacen a las Evaporitas Antiguas.

Fuente: SQM, 2021.



#### 4.3.7.5.1.1.3 Geología Estructural

El Salar de Atacama es una cuenca de origen tectónico compresivo desde el Mioceno e.g. (Mpodozis et al., 2005; Rubilar & Sebastián, 2015), que se encuentra delimitada y disectada por fallas inversas activas que afectan desde el basamento a la cobertura actual (Kuhn, 2002; Mpodozis et al., 2005; Arriagada et al., 2006; Jordan, et al., 2002; 2007). Estas fallas son responsables de generar el espacio para la deposición de los materiales de relleno, así como de la morfología actual de la cuenca (Mpodozis et al., 2005; Arriagada et al., 2006).

En la Figura 4-35 se presentan las principales estructuras del Salar de Atacama, mientras que el detalle de sus características se resume a continuación:

**Sistema de Falla Los Vientos.** Sistema de fallas inversas de alto ángulo, de rumbo NNE, que se extiende en el borde oriental de la Cordillera de la Sal. Es responsable del alzamiento de las Secuencias Estratificadas del Eoceno al Mioceno sobre Secuencias Estratificadas del Mioceno Superior y Depósitos no consolidados, en forma de una faja plegada y corrida de 5 a 10 km de ancho (e.g. (Flint et al., 1993; Arriagada et al., 2006; Cembrano et al., 2007)).

**Sistema de Falla Caballo.** Estructura norte-sur a nor-oeste que nace en el Cordón de Lila y desde ahí se proyecta hacia el norte, afectando el relleno de la cuenca hasta la actualidad. Su componente principal es inversa, aunque no se descarta una de rumbo, de alto ángulo con vergencia este. Las unidades evaporíticas más recientes al oeste de la falla se encuentran elevados en relación con el bloque este (Arriagada, 2009).

**Sistema de Falla Salar.** Es el rasgo estructural más importante del centro del salar, desarrollándose en dirección NNW-SSE desde el Paleógeno hasta hoy (Jordan, et al., 2002; 2007; Arriagada et al., 2006), y extendiéndose en superficie desde el Cordón de Lila hasta el Delta del Río San Pedro en forma de un sistema de fallas inversas subverticales de vergencia este (e.g. (Muñoz et al., 2002)). Esta estructura separa los dos dominios estructurales principales del Núcleo del Salar de Atacama: el Bloque Este y el Bloque Oeste, siendo considerablemente más potentes las secuencias evaporíticas en el primero respecto al segundo.

**Sistema de Falla Tarar.** Se ubica en la parte norte de la zona marginal del Salar de Atacama y está conformado por fallas verticales a subverticales de vergencia este y rumbo NNE, que persisten por más de 20 km (Universidad de Chile, 2016).

**Sistema de Falla Quelana-Tilopozo.** Sistema de fallas inversas subverticales a verticales, con componente de rumbo, que se extienden desde el Sistema Aguas de Quelana hacia el norte. Las estructuras mayores mantienen al oeste y su actividad se registra hasta la actualidad (e.g.(Jordan et al., 2007)). Este sistema favorece la generación de depresiones locales con el subsecuente depósito de rellenos finos y evaporitas, sustentando así el desarrollo de la zona marginal al este del salar (Universidad de Chile, 2016).

**Sistema de Falla Tilocalar.** Sistema de fallas inversas a transpresivas de alto ángulo, de rumbo NNW y vergencia este, que se expresa en superficie por más de 20 km, al sureste del salar, en la Península de Tilocalar (Figura 4-36). Representa el límite natural entre los Sistemas de Tilopozo y Peine, expresado en las Lomas de Tilocalar (e.g. Arriagada, 2009; Universidad de Chile, 2016; Rubilar et al., 2017).

**Sistema de Falla Peine.** Sistema de fallas inversas subverticales, de rumbo noreste y vergencia oeste, emplazado en el Sistema Peine. Coincide parcialmente con el contacto en superficie entre facies carbonatadas y sulfatadas de la zona marginal, y afecta a los afluentes que van desde esta zona hacia el núcleo del salar.

#### 4.3.7.5.1.1.4 Geología Subsuperficial

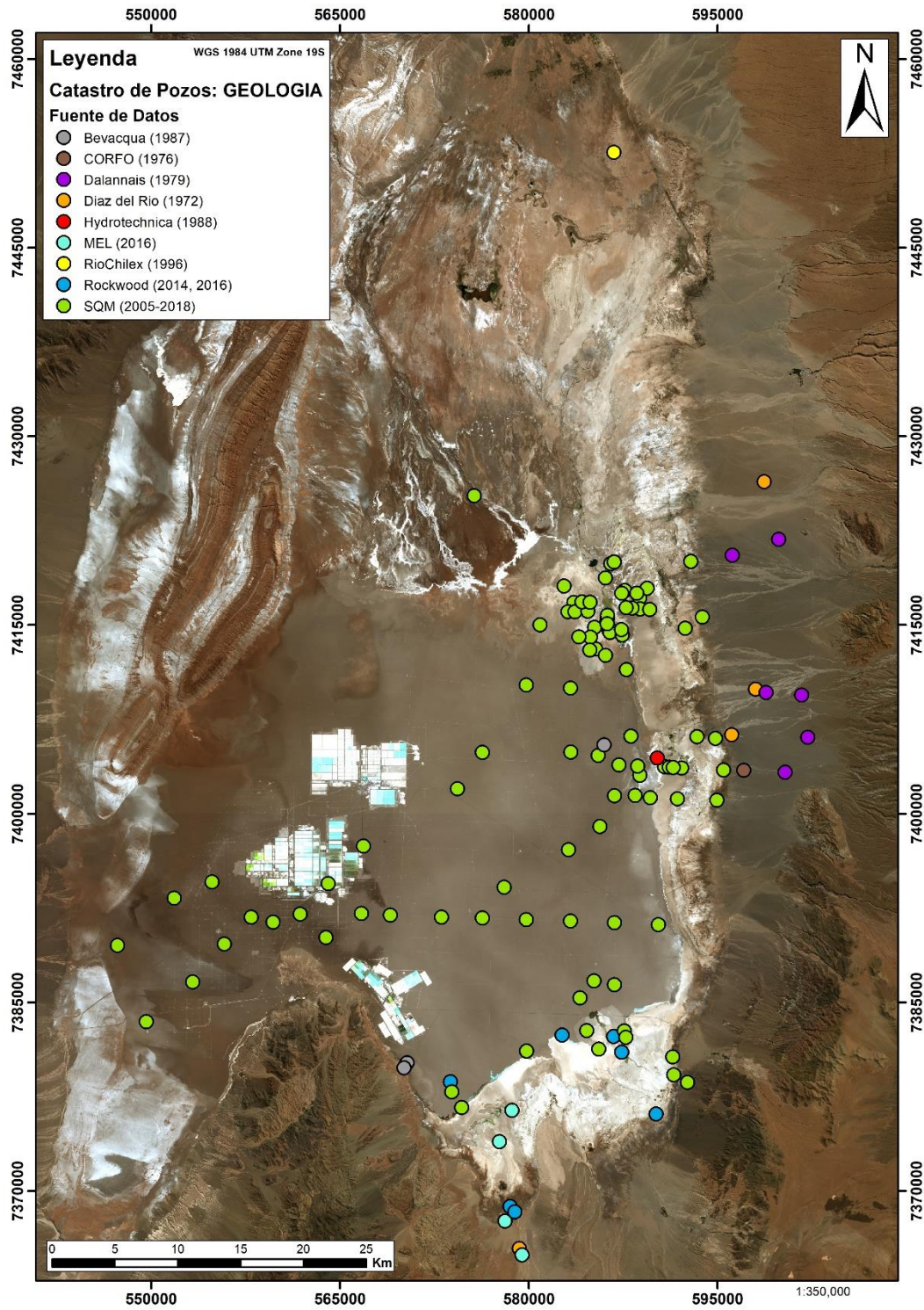
Para caracterizar la disposición y relaciones de contacto entre las unidades que conforman el relleno más reciente se compiló la información de 125 sondajes (Figura 4-37). Los pozos utilizados disponen de información representativa tanto de los márgenes como del núcleo del salar, y sus profundidades van desde 69 m (Pozo X-049) hasta 653 m (Pozo X-162). Esta información se ha extrapolado lateralmente de manera interpretativa, a través de la correlación de unidades geológicas, considerando los datos y bibliografía existente.

A partir de la información estratigráfica disponible, se distinguen tres tipos de material: (1) Secuencias principalmente evaporíticas, (2) Secuencias principalmente sedimentarias y (3) Rocas ígneas y volcánicas antiguas, que constituyen el basamento geológico (e.g. Amphos, 2008). Un resumen de las unidades geológicas en profundidad se presenta en la Tabla 4-27.

Adicionalmente, una serie de secciones subsuperficiales regionales se presentan en la Línea de Base de Geología y Geomorfología.



Figura 4-37 . Catastro de pozos cuyos datos fueron utilizados para la caracterización geológica en subsuperficie. Se distinguen los pozos según la fuente de la cual se obtiene la información.



Fuente: SQM, 2021.

Tabla 4-27. Resumen de las unidades geológicas en subsuperficie

Nro.	Unidad Geológica	Litología	Potencia	Relaciones de Contacto	Ubicación
1	Basamento	Rocas ígneas y volcánicas.		Subyacen en discordancia erosiva a las unidades que conforman el relleno del Salar de Atacama.	Afloran en el Cordón de Lila, en la ladera oeste de la Cordillera Occidental y en la Cordillera de Domeyko.
2	Secuencia Heterogénea de Sulfatos, Tobas y Tufitas	Facies evaporíticas intercaladas con tufitas. Hacia la zona marginal y aluvial, gradan lateralmente a facies clásticas con tufitas, formando depósitos no consolidados antiguos.	Su potencia puede superar los 80 m, y disminuye hacia el oeste y norte.	Su techo corresponde a un nivel tobáceo continuo. Sobreyace a (1) y subyace a (3).	Ubicación en profundidad según los sistemas estructurales principales, encontrándose su techo a 50 m en el Bloque Oeste; a 400 m en el Bloque Este.
3	Cloruros Inferiores	Secuencias de halita con contenido menor de sedimentos.	Entre 20 m (Bloque Oeste, al oeste y suroeste) y >300 m (Bloque Este).	Sobreyacen en discordancia erosiva a la (2).	
4	Evaporitas con Materia Orgánica	Halitas y yesos con materia orgánica intersticial y, en menor medida, sedimentos finos.	Mayor potencia hacia la Zona Marginal.	Entre los Cloruros Superiores y los Cloruros Inferiores.	Se distribuye en gran parte del núcleo.
5	Cloruros Superiores	Halitas con ocasional contenido menor de sedimentos.	Menor a 40 m; mayor potencia inmediatamente al este del SF Salar.	Engrana lateralmente con las unidades evaporíticas de la Zona Marginal.	Corresponde a la costra expuesta en la superficie del Núcleo del Salar de Atacama.
6	Secuencias Sulfatadas	Sulfatos (yeso) con variable contenido de sedimentos finos.	Alcanza hasta ~400-500 m en el extremo norte del salar.	Sobreyace en discordancia a (2) y engrana lateralmente con las demás unidades del Salar.	En la Zona Marginal, entre las facies de Carbonatos y el Núcleo del salar; y en Zona de Transición Este, intercalada con (5)
7	Depósitos No Consolidados	Areniscas finas y limos, con intercalaciones ocasionales de tobas y gravas. Muestran una tendencia grano decreciente en dirección al núcleo.		Engranadas lateralmente con las secuencias evaporíticas de la Zona Marginal.	En la planicie aluvial, entre la Zona Marginal y la Cordillera Occidental.
8	Secuencias Estratificadas del Mioceno superior	Areniscas y arcillolitas de colores pardo rojizo a anaranjado con abundantes evaporitas		Cubierta por depósitos de salar moderno, Depósitos no consolidados y Limos Salinos del Llano de la Paciencia. En contacto por falla por las	Al suroeste del núcleo del Salar de Atacama, al sur de la Cordillera de la Sal

				Secuencias estratificadas del Eoceno al Mioceno.	
9	Carbonatos y limos	Facies carbonatadas con aporte de material detrítico, sulfatos en menor cantidad y algo de materia orgánica.		Sobreyacen a las Evaporitas antiguas (PIP, en capítulo 2.2) y presentan una relación de engrane con facies sulfatadas y depósitos no consolidados, aluviales.	Franja entre sulfatos de la zona marginal y depósitos aluviales, al norte, este y sur del Salar de Atacama.

Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.2 Parámetros hidráulicos

Se utilizaron un total de 650 puntos con información de parámetros hidráulicos, de los cuales en 643 se posee valores de permeabilidad y en 80 de almacenamiento. En el Apéndice A del Anexo 5.1 Modelo hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama, se detalla la ubicación de cada uno de estos puntos, mientras que el detalle de los ensayos hidráulicos utilizados se presenta en el Apéndice D del Anexo 5.1 Modelo hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama

La mayor cantidad de pruebas se han realizado en las unidades definidas dentro del núcleo del Salar (Cloruros Superiores, Cloruros Inferiores y Evaporitas con Materia Orgánica), especialmente en la unidad Cloruros Superiores. Por el contrario, las unidades con menor cantidad de ensayos realizados corresponden a la unidad del Delta del río San Pedro, seguida por las unidades de Depósitos No Consolidados y Depósitos Cuaternarios Evaporíticos (facies Sulfato, Sulfato con limos y Carbonato con limos).

Un resumen de los valores máximos y mínimos obtenidos por unidad geológica se presentan en la Tabla 4-28, mientras que la distribución de estos valores se presenta en la Figura 4-38.

Adicionalmente, la distribución espacial de los parámetros hidráulicos obtenidos en cada una de las unidades geológicas se presenta en los subcapítulos siguientes.

**Tabla 4-28. Parámetros hidráulicos por unidad geológica.**

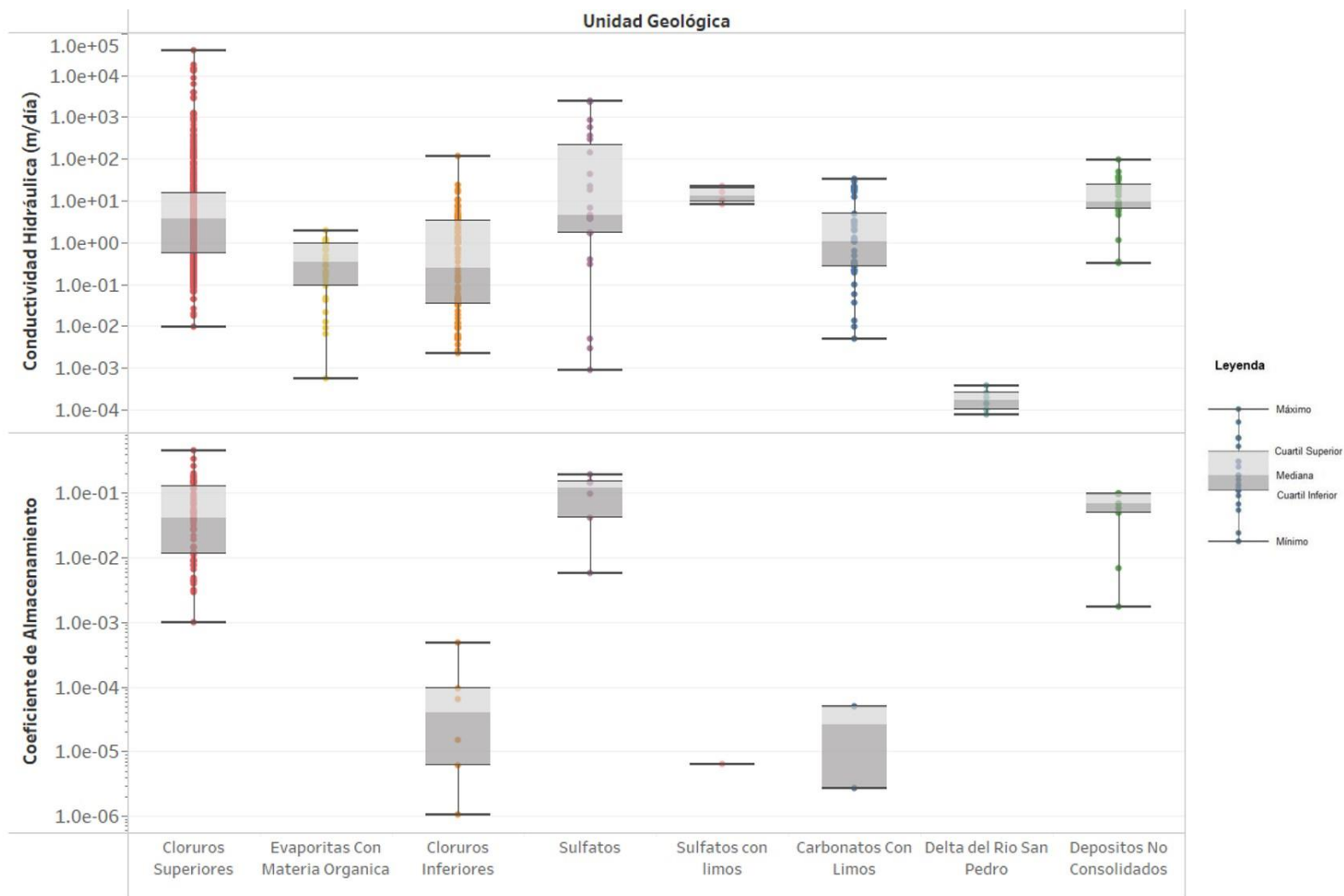
Unidad Geológica	Conductividad Hidráulica (m/día)		Coeficiente de Almacenamiento	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Depósitos No Consolidados	3,4E-01	1,0E+02	1,8E-03	1,0E-01
Delta del Rio San Pedro	8,0E-05	4,0E-04	S/I*	S/I
Carbonatos Con Limos	5,0E-03	3,4E+01	2,8E-06	5,0E-05
Sulfatos	9,2E-04	2,6E+03	6,0E-03	2,0E-01
Sulfatos con limos	8,7E+00	2,2E+01	6,5E-06	6,5E-06**
Cloruros Inferiores	2,3E-03	1,2E+02	1,1E-06	4,9E-04
Evaporitas Con Materia Orgánica	5,8E-04	2,0E+00	S/I	S/I
Cloruros Superiores	1,0E-02	4,0E+04	1,0E-03	4,6E-01

\*S/I: Sin información

\*\*En esta unidad existe un dato medido de coeficiente de almacenamiento

Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-38. Box Plot de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento de unidades geológicas.



Fuente: SQM, 2021.



#### 4.3.7.5.1.2.1 Conductividad Hidráulica (K)

Debido al amplio rango de valores de conductividad hidráulica presentes en el Área de estudio, su análisis se separará en 2 grupos, analizándose primero el sector del Núcleo, y luego, agrupados: Zona Marginal, Zona transición Este y Aluvial.

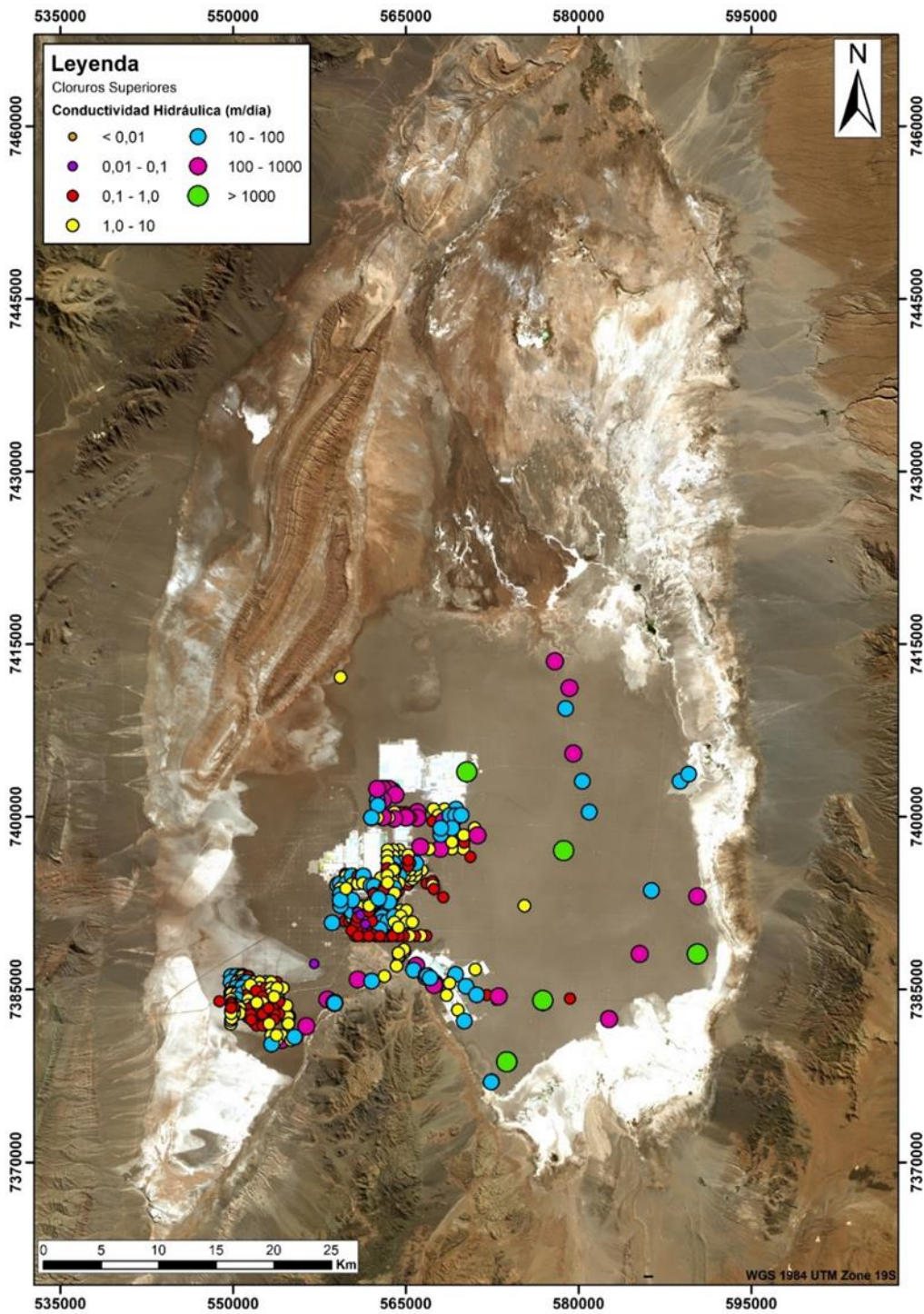
##### 4.3.7.5.1.2.1.1 Núcleo

Para caracterizar las unidades del núcleo del Salar, se han elaborado tres mapas (uno para cada unidad geológica) que muestran la distribución en planta de la conductividad hidráulica: Cloruros Superiores (Figura 4-39), Evaporitas con Materia Orgánica (Figura 4-40) y Cloruros Inferiores (Figura 4-41). Para la primera, se aprecia una buena distribución de información hidráulica, debido a que esta unidad es la de más fácil acceso. Las otras dos unidades del núcleo que se observan en profundidad están caracterizadas principalmente en el bloque oeste.

De las tres unidades del núcleo, los Cloruros Superiores muestran una mayor variabilidad de los datos, con rangos de conductividad que oscilan entre un mínimo de  $1 \times 10^{-2}$  m/d hasta máximos de  $4 \times 10^4$  m/d. Los valores más altos se ubican principalmente en el bloque este.

Los Cloruros Inferiores presentan rangos de  $2,3 \times 10^{-3}$  hasta  $1,2 \times 10^2$  m/día, siendo menos permeable que los Cloruros Superiores. Además, muestran una tendencia de aumento de conductividad hidráulica hacia el oeste, siendo en el norte de la península de Chépica donde se identifican los valores de conductividad hidráulica más bajos para esta unidad. Finalmente, las Evaporitas con Materia Orgánica presentan rangos de permeabilidad menores que las dos unidades mencionadas anteriormente, con rangos que oscilan entre  $5,8 \times 10^{-4}$  hasta 2 m/día.

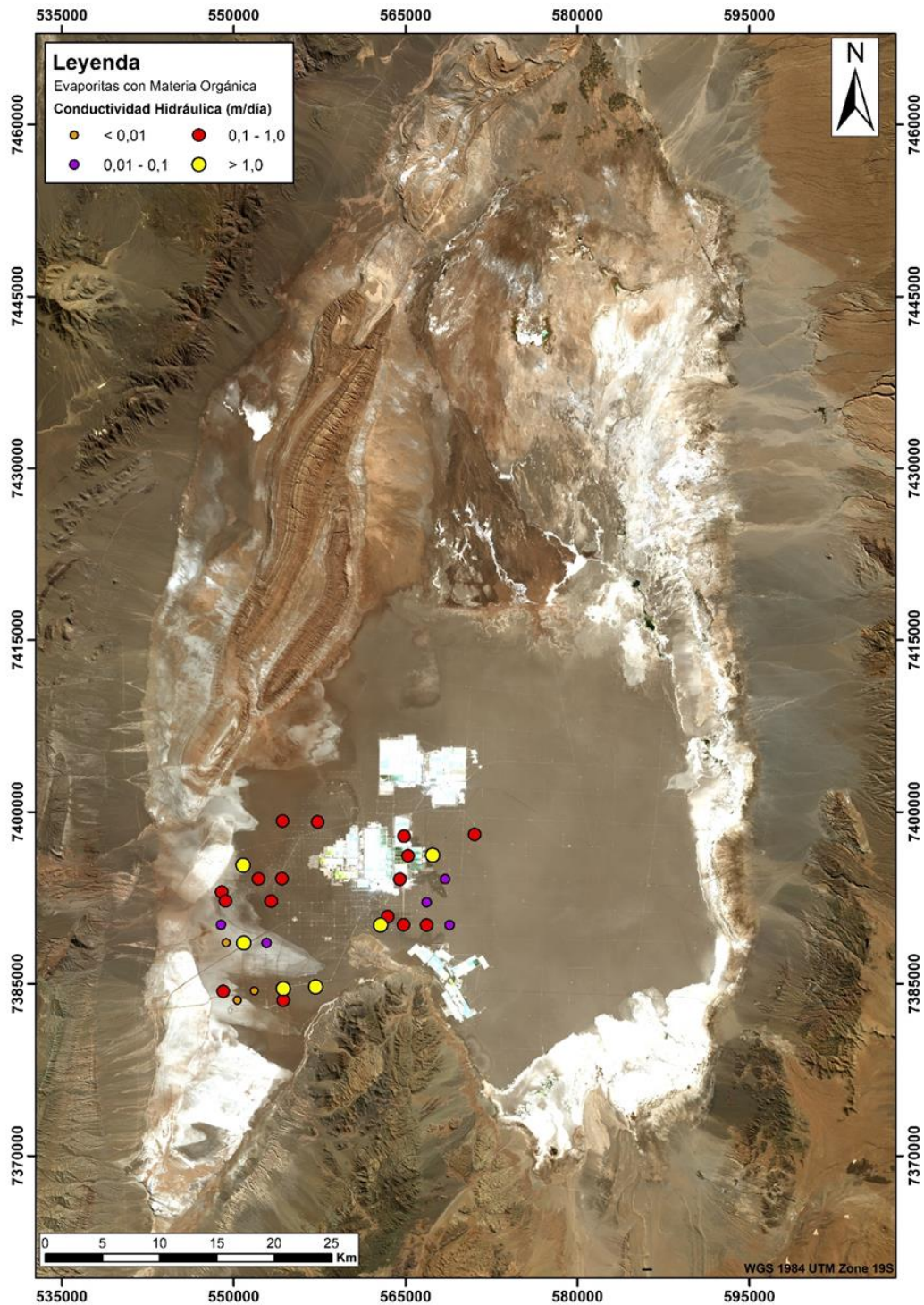
Figura 4-39. Distribución de permeabilidades en unidad Cloruros Superiores.



Fuente: SQM, 2021.

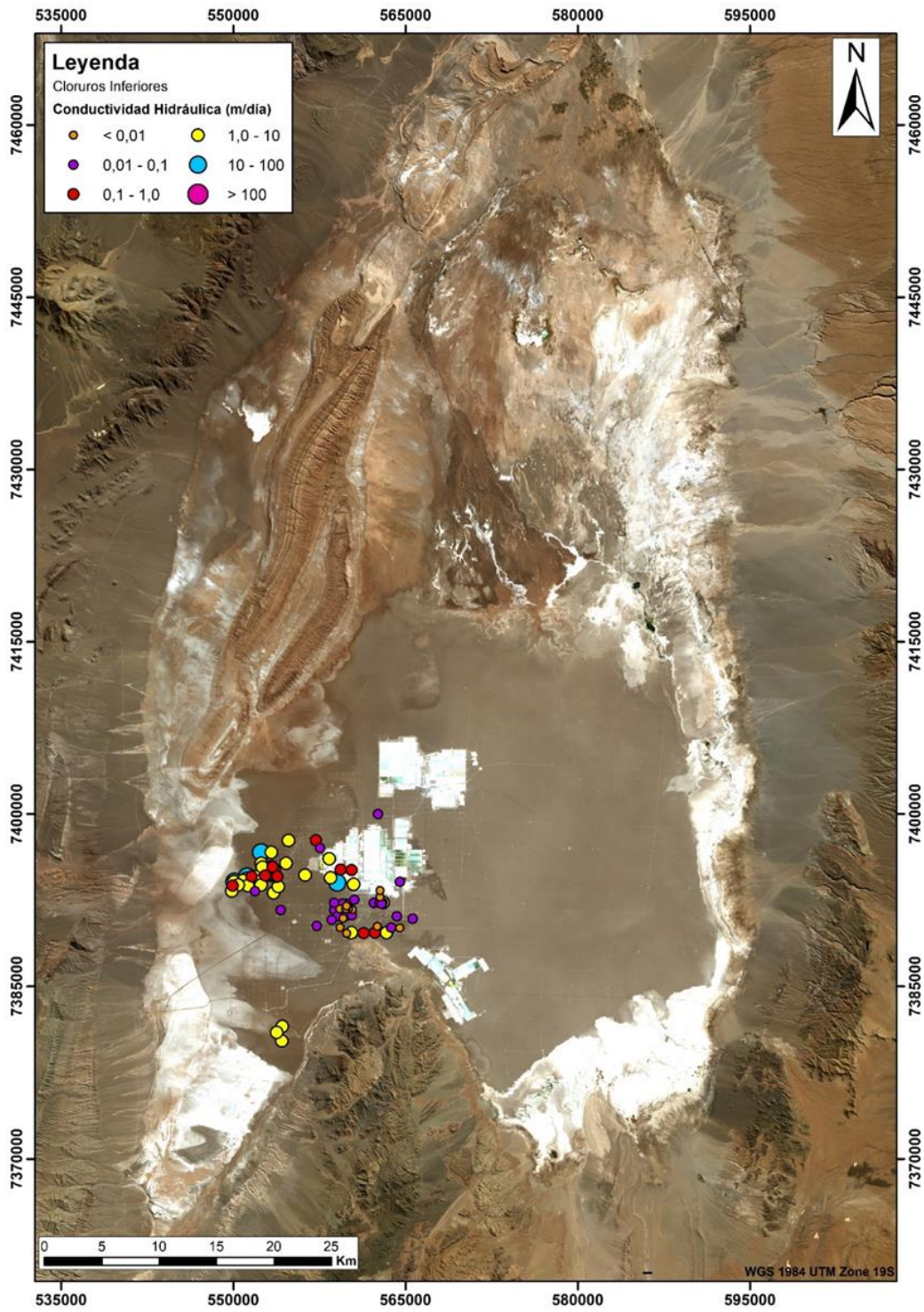


Figura 4-40. Distribución de permeabilidades en unidad Evaporitas con Materia Orgánica.



Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-41. Distribución de permeabilidades en unidad Cloruros Inferiores.



Fuente: SQM, 2021.



#### 4.3.7.5.1.2.1.2 Zona Marginal, Zona transición Este y Aluvial

La distribución de conductividad hidráulica en la Zona Marginal, Zona de Transición Este y Aluvial se presenta en el mapa de la Figura 4-42. Los datos de este mapa corresponden a las unidades Delta del Río San Pedro, Depósitos No Consolidados y Depósitos Cuaternarios Evaporíticos (facies Sulfatos, Sulfatos con Limos, Carbonatos con Limos).

Los valores de conductividad hidráulica de la unidad Delta San Pedro sugieren que esta unidad es la menos permeable, con valores entre  $8 \times 10^{-5}$  y  $4 \times 10^{-4}$  m/día. Estos valores son consistentes con todas las pruebas hidráulicas realizadas, y con las facies detríticas de limos y arcillas observadas en esta unidad.

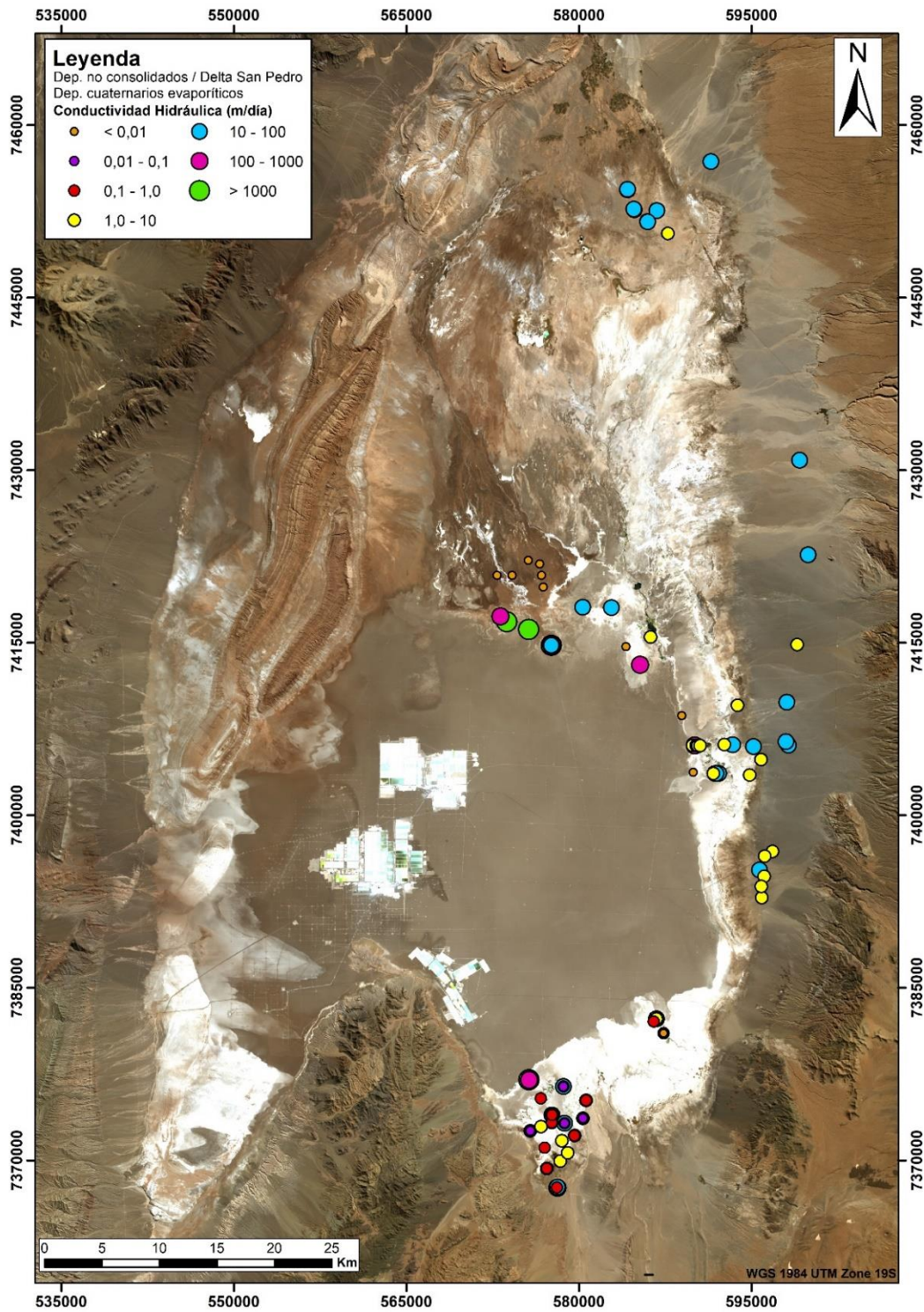
La unidad de Depósitos No Consolidados posee los mayores valores de conductividad hidráulica fuera de la zona del núcleo, de entre 0,3 y 100 m/día (Tabla 4-28). En planta, la distribución de la conductividad hidráulica es relativamente homogénea, aunque en la zona aluvial sur se observan valores relativamente menores. Geológicamente, esta unidad presenta sedimentos clásticos grano-decrecientes hacia el núcleo. Esto es consistente con una disminución de la conductividad hidráulica en los Depósito No Consolidados en sectores cercanos a la zona marginal.

La unidad Depósitos Cuaternarios Evaporíticos (facies Sulfatos, Sulfatos con Limos, Carbonatos con Limos) presenta rangos de conductividad hidráulica amplios, que oscilan entre los  $1 \times 10^{-3}$  hasta los  $2,6 \times 10^3$  m/día. De éstas, las pruebas que arrojan conductividades más altas están asociadas a pozos cortos (menos de 5 m de profundidad), y por tanto tienen relación con mecanismos de disolución de evaporitas por infiltraciones de aguas más dulces o salobres (karstificación), que se observan especialmente en los primeros metros desde la superficie. Por tanto, en esta unidad se observa una variación de conductividad, observando valores más altos cercanos al núcleo y cercanos a la superficie, disminuyendo tanto hacia la zona aluvial como en profundidad. Debido a las numerosas intercalaciones con depósitos clásticos de grano fino (limo, arcilla, materia orgánica), asociados a un ambiente lacustre (baja energía), la zona marginal (sector entre el núcleo y la zona aluvial) se comporta, en general, como una zona de relativamente baja permeabilidad. Ese comportamiento ha sido descrito anteriormente por Hydrotechnica (1988; Figura 4-43), basado en pruebas de bombeo de larga duración (6 meses).

En la Zona de Transición Este, los depósitos de Sulfatos y Sulfatos con Limos se intercalan con Halitas similares a las descritas en la unidad Cloruros Superiores, ampliando aún más el rango de sus parámetros hidráulicos observados. La distribución de los valores de permeabilidad puede ser observada en la Figura 4-38, mientras que la Tabla 4-28 resume los valores mencionados.

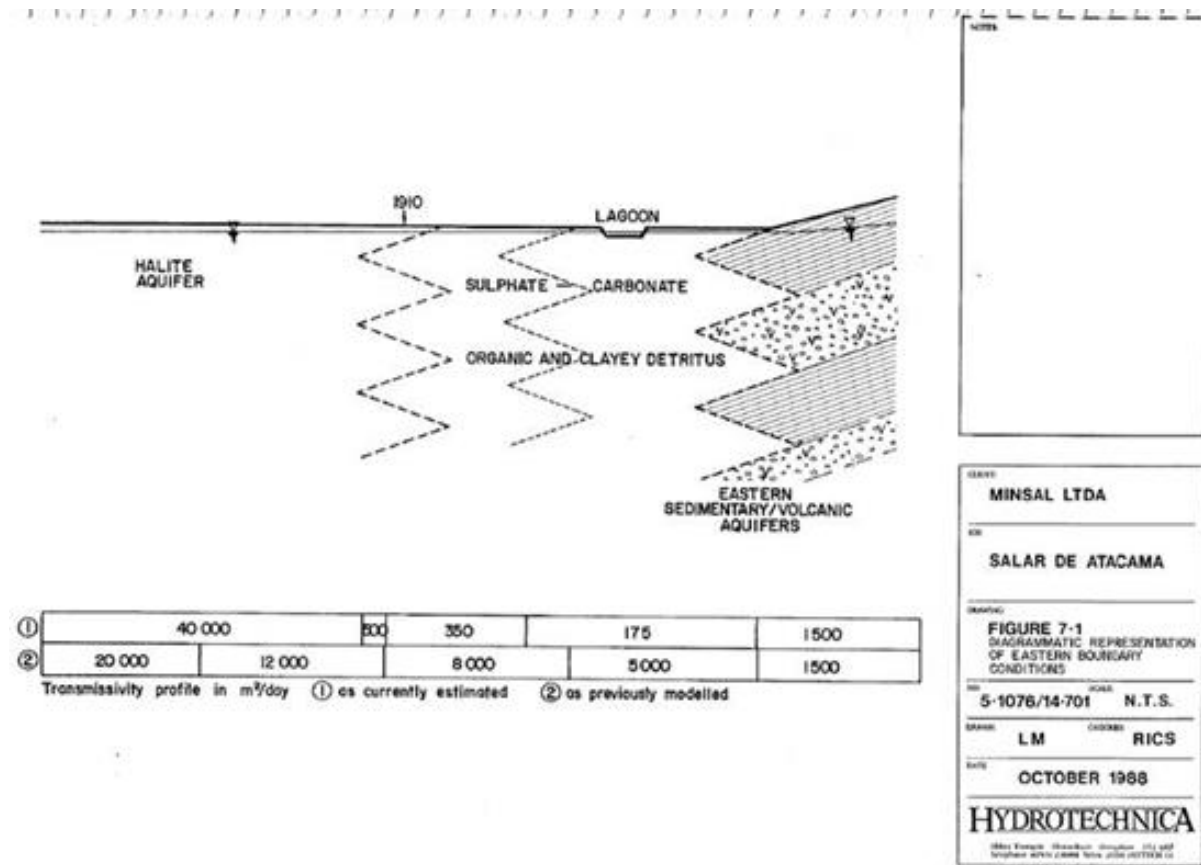


Figura 4-42. Distribución de permeabilidades en unidades Depósitos No Consolidados, Delta del Río San Pedro y Depósitos Cuaternarios Evaporíticos (facies Sulfato, Sulfato con limos y Carbonato con limos).



Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-43. Sección esquemática oeste-este que representa la variación de transmisividad desde el núcleo hasta la zona aluvial. Los valores son consistentes con lo observado en la actualidad.



Fuente: Hydrotechnica, 1988.

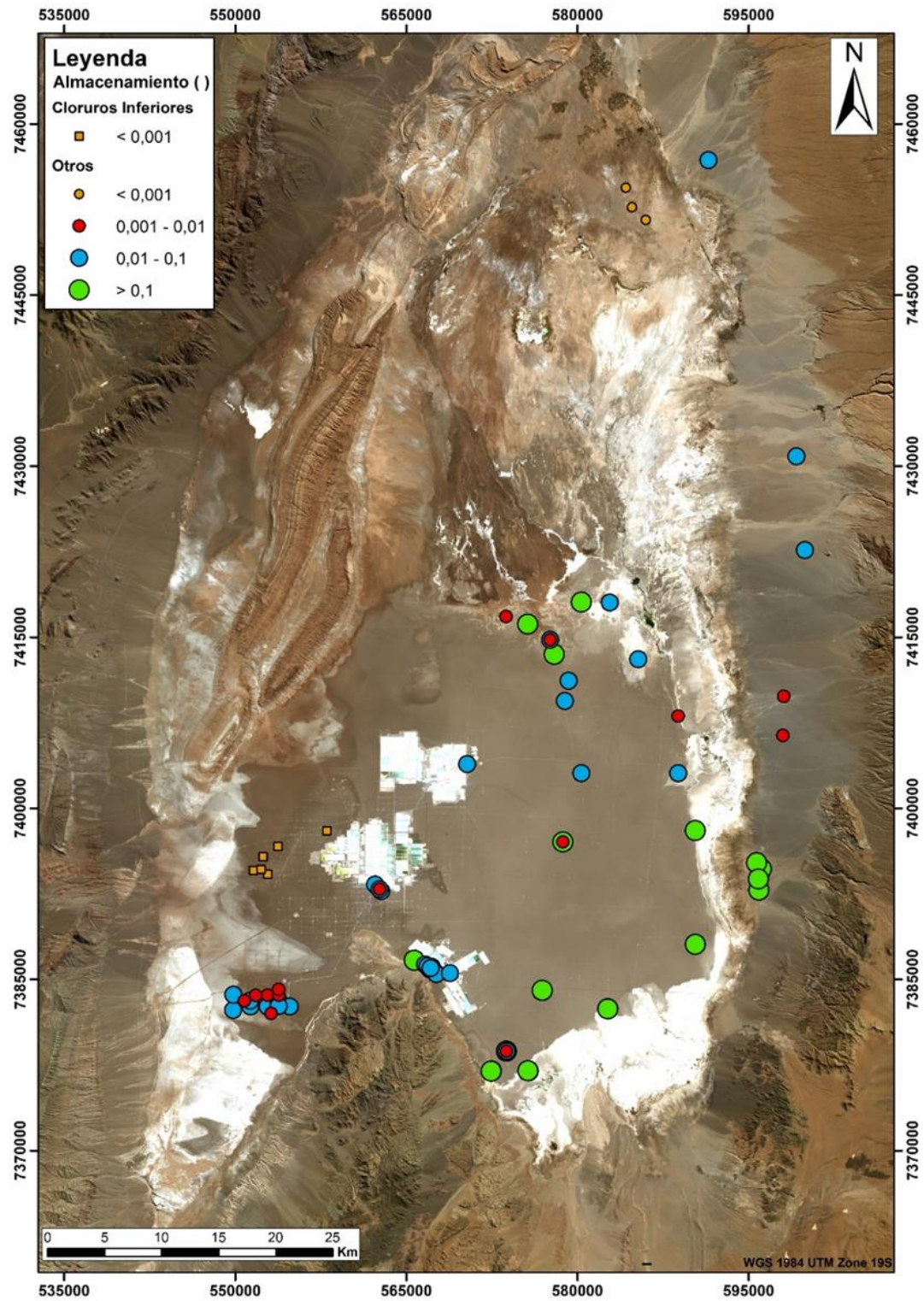
4.3.7.5.1.2.2 Almacenamiento

Para este parámetro se cuenta con información para las unidades Depósitos No Consolidados, Depósitos Cuaternarios Evaporíticos, facies Sulfatos, Sulfatos con Limos, Carbonatos con Limos y Cloruros (Superiores). La Figura 4-44 muestra la distribución del coeficiente de almacenamiento para todas las unidades con datos disponibles.

La unidad Depósitos No Consolidados posee rangos de almacenamiento del orden de  $6 \times 10^{-3}$  hasta  $3 \times 10^{-1}$ . La unidad Depósitos Cuaternarios Evaporíticos (facies Sulfatos, Sulfatos con Limos, Carbonatos con Limos), cuenta con información en el norte y sur del núcleo, y presenta valores de almacenamiento dentro de un amplio rango, que va desde los  $6 \times 10^{-6}$  hasta los  $3 \times 10^{-1}$ . Finalmente, la unidad Cloruros Superiores presenta valores mínimos de  $4 \times 10^{-4}$  hasta máximos en general de  $3 \times 10^{-1}$ ; sin embargo, existen dos pruebas de bombeo que arrojan valores de almacenamiento de  $5 \times 10^{-1}$  y  $6 \times 10^{-1}$ , estando estos últimos valores probablemente asociados a la presencia de cavernas en halitas.



Figura 4-44. Distribución de coeficiente de almacenamiento.

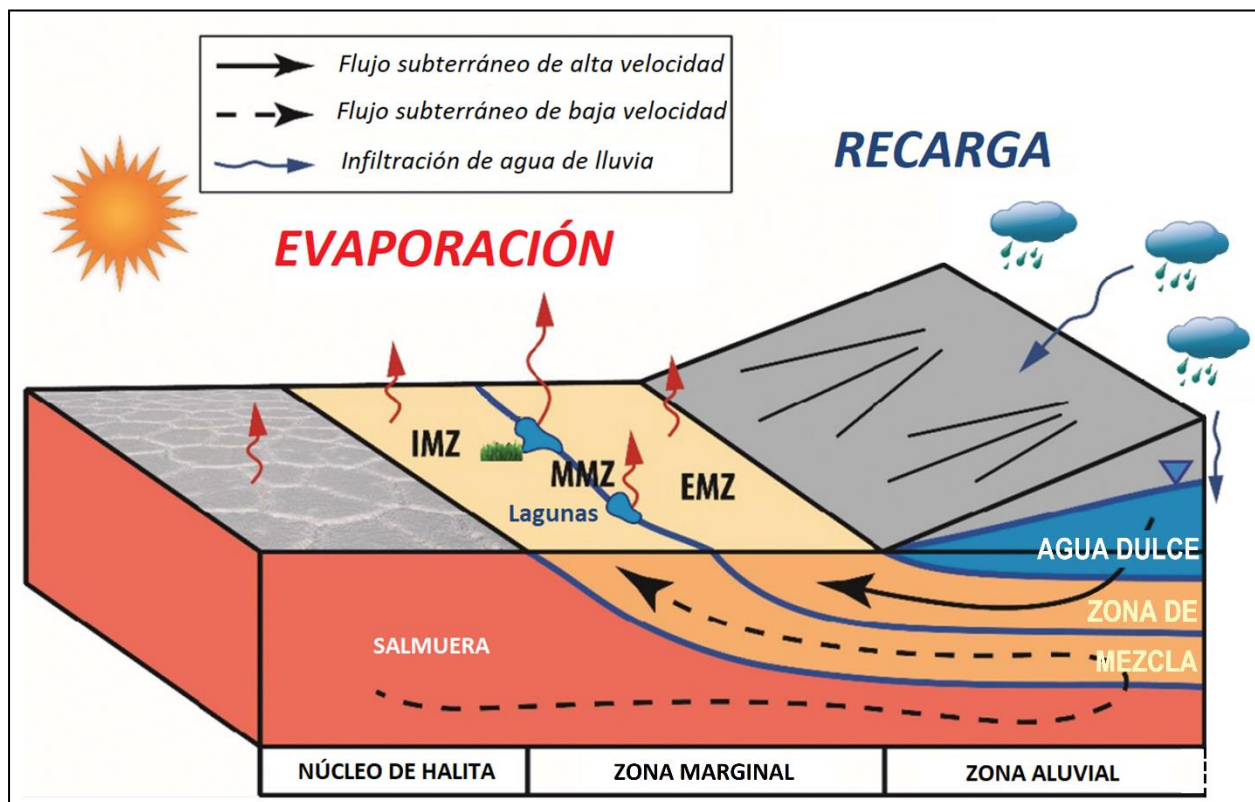


Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.3 Interfaz Salina

Uno de los elementos clave para entender el funcionamiento hidrogeológico del Salar de Atacama es la presencia de una cuña o interfaz salina en todos los márgenes del Salar (Figura 4-45). Esta interfaz se forma por el contraste de densidad del agua dulce, que fluye hacia el núcleo del Salar, con la salmuera que se encuentra almacenada en las unidades hidrogeológicas del núcleo. Cuando ambos fluidos entran en contacto, el agua dulce, al ser menos densa ( $<1,005 \text{ g/cm}^3$ ), tiende a posicionarse por sobre la salmuera próxima al equilibrio con halita, que posee una densidad mucho mayor ( $>1,2 \text{ g/cm}^3$ ). La zona de contacto o de mezcla entre ambos fluidos es la que se denomina cuña o interfaz salina (Figura 4-45).

Figura 4-45. Esquema de la zona de interacción salmuera-agua en el Salar de Atacama.



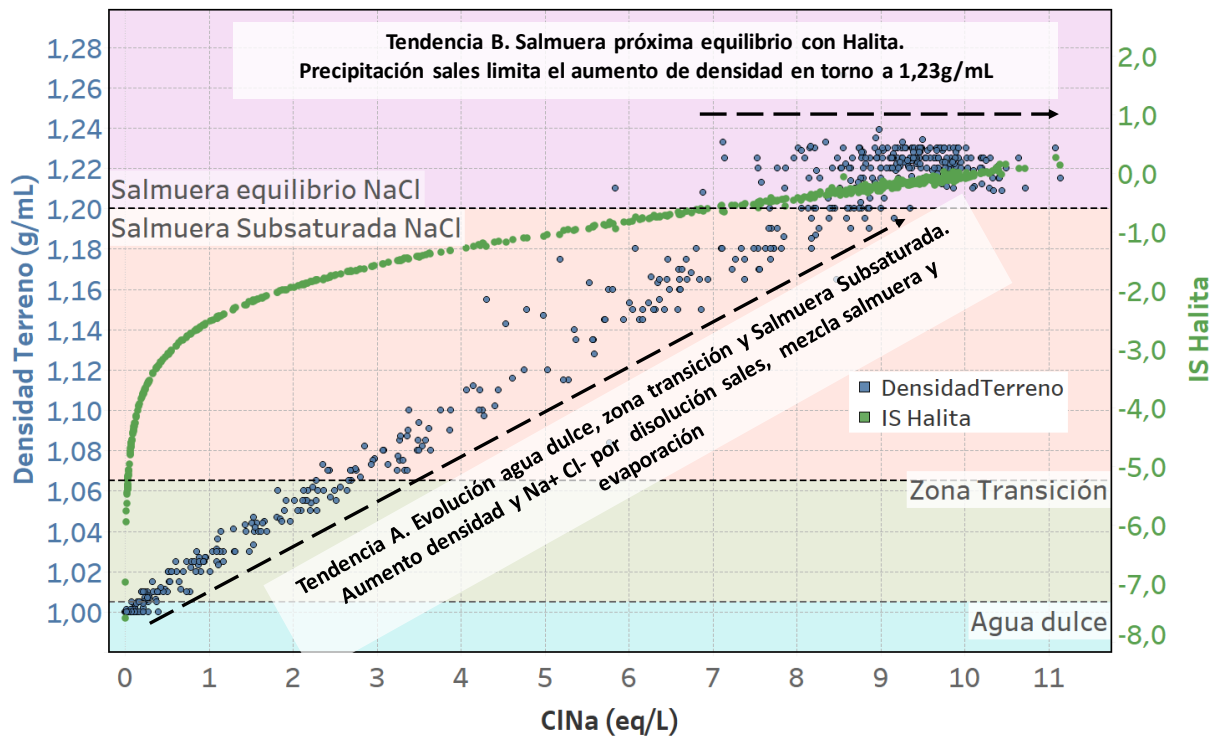
Fuente: Modificado de Marazuela et al. (2019)

En el Informe N° 28 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama” (SQM Salar 2021b) se definió una clasificación de tipos de agua a partir de valores de sólidos disueltos totales (SDT), conductividad eléctrica (CE) y densidad. Los tipos definidos corresponden a agua dulce, zona de transición y salmuera; sin embargo, para efectos del presente EIA, es necesario la reclasificación de la salmuera dependiendo de su equilibrio químico.

En la Figura 4-46 se muestra la distribución de las densidades (g/mL, en color azul) versus la concentración de NaCl expresada en eq/L para las muestras analizadas en Salar de Atacama. En el eje derecho, en color verde, se muestra el Índice de saturación en halita para las muestras en función de la concentración de NaCl (eq/L), y en el mismo gráfico se han marcado los límites para cada tipo de fluido definido. En la Figura 4-46 pueden verse dos tendencias que se describen a continuación:

- La tendencia A, representa una evolución desde agua dulce a salmuera subsaturada en NaCl. Esta evolución está controlada por procesos, combinados o no, de disolución de sales, mezcla con salmuera y evaporación. En la tendencia A se observa un aumento en la densidad proporcional a la concentración de NaCl hasta alcanzar densidad en torno a 1,2g/mL y concentraciones de 8eq/L para NaCl. Los fluidos de la tendencia A se encuentran subsaturados en NaCl.
- La tendencia B representa una evolución de la salmuera controlada por el equilibrio con NaCl. Esta evolución está controlada por procesos de disolución, mezcla con salmueras, evaporación y precipitación de sales. En la tendencia B se observa una estabilización de los valores de densidad en torno a 1,23g/mL y concentraciones de NaCl entre 8 y 11eq/L. Los índices de saturación en NaCl se encuentran en todas las muestras de esta tendencia próximos a 0.

Figura 4-46 Correlación entre Densidad Terreno (g/mL, color azul, eje izquierdo) vs NaCl (eq/L) e Índices de saturación en Halita (Verde, eje derecho).



Fuente: SQM, 2021.

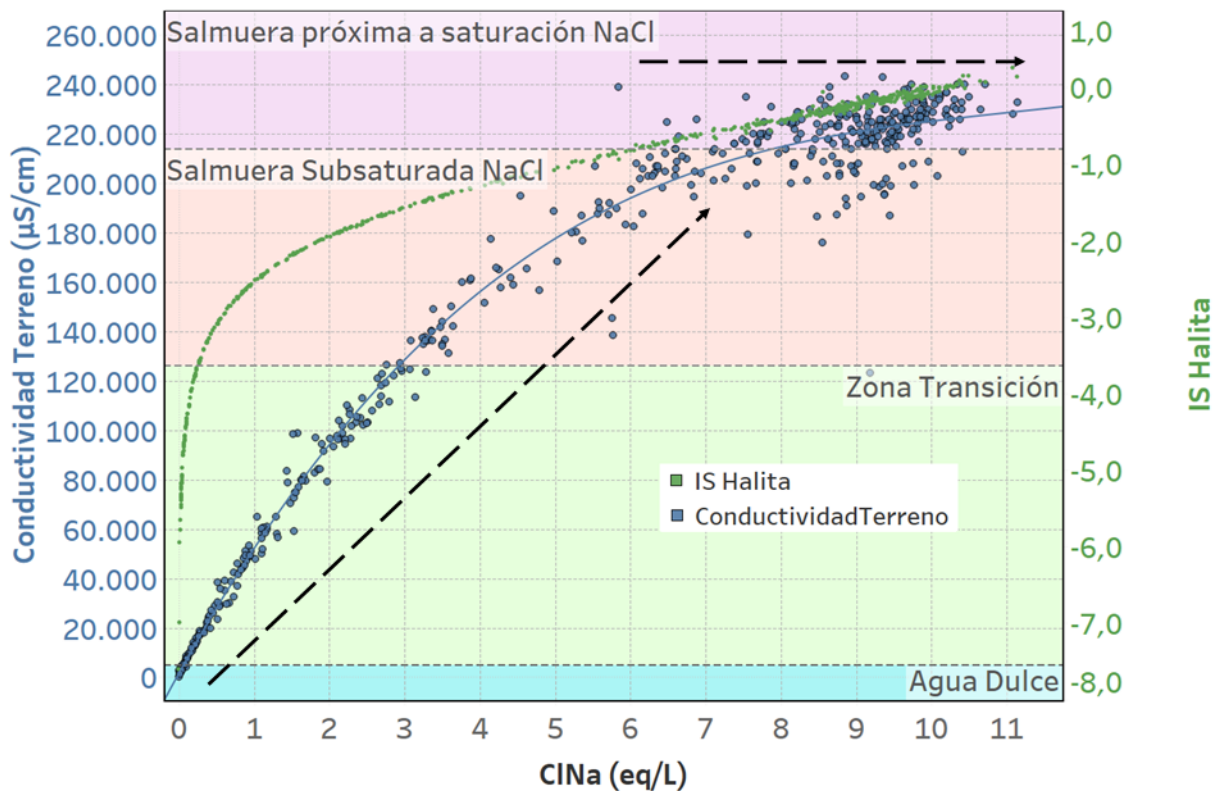
Análogamente a la figura anterior, en la Figura 4-47 se muestra la distribución de Conductividad Eléctrica de terreno ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en color azul) vs la concentración de NaCl expresada en eq/L para las muestras analizadas en Salar de Atacama. En el eje derecho, en color verde, se muestra el índice de saturación en halita para las



muestras en función de la concentración de NaCl (eq/L), y en el mismo gráfico se han marcado los límites de los distintos tipos de fluidos definidos.

En el caso de la conductividad, la correlación con la concentración de NaCl no es lineal si no polinómica. No obstante, las dos tendencias descritas antes quedan igualmente evidenciadas, porque para concentraciones mayores a 8 eq/L de NaCl la dispersión de los valores de CE aumenta mucho, mostrando una evolución lineal, paralela a las concentraciones de NaCl. Esta evolución queda determinada por la precipitación de sales, y en el caso de la conductividad también por el aumento en el error intrínseco en las mediciones de conductividad eléctrica para concentraciones muy altas, debido a que para éstas las especies iónicas presentan niveles de conductancia específica muy distintos (Custodio y Llamas, 2001).

Figura 4-47 Correlación entre Conductividad Terreno ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ , color azul en eje izquierdo) vs NaCl (eq/L) e Índices de saturación en Halita (color verde, eje derecho).



Fuente: SQM, 2021.

Con base a las tendencias observadas para la densidad y Conductividad frente a las concentraciones de NaCl, se diferencian dos tipos de salmueras:

- Salmuera subsaturada en NaCl: densidad <1,2g/mL y CE < 214.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Salmuera en equilibrio con NaCl: densidad 1,2 a 1,23 g/mL y CE > 214.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$

Considerando lo descrito anteriormente, la clasificación de fluidos en la cuenca del SdA se divide en cuatro tipos: agua dulce, zona transición, salmuera subsaturada y salmuera en equilibrio, como se muestra en la Tabla

4-29. Debido a la precisión e incertidumbre innata en los métodos analíticos para la determinación de la conductividad y densidad, se considera un error de  $\pm 10\%$  para el caso de la conductividad y  $\pm 0,002$  g/mL para la densidad. Se infiere entonces que la interfaz salina corresponde a la unión de las dos zonas “intermedias”: zona de transición y salmuera subsaturada.

Tabla 4-29. Límites de fluidos definidos para el Salar de Atacama.

Límites de fluidos	CE (mS/cm)	Densidad (g/mL)
Agua Dulce	$<5.000 \pm 500$	$<1,004 \pm 0,002$
Zona de Transición	$126.000 \pm 13.000$	$1,065 \pm 0,002$
Salmuera Subsaturada	$214.000 \pm 21.000$	$1,2 \pm 0,002$
Salmuera en equilibrio	$>214.000 \pm 21.000$	$>1,2 \pm 0,002$

Fuente: Modificado de (SQM Salar, 2021b)

En superficie, la presencia de las distintas zonas se estudió a través de las mediciones de densidad, para definir límites en planta de las cuatro zonas. Por otro lado, se utilizaron perfiles geofísicos y perfilajes de CE en pozos para determinar la profundidad y el volumen de la interfaz salina en la zona de transición y de agua dulce.

#### 4.3.7.5.1.3.1 Reconocimiento de zonas en superficie

Los principales criterios definidos para el reconocimiento de zonas en superficie corresponden a lo siguiente:

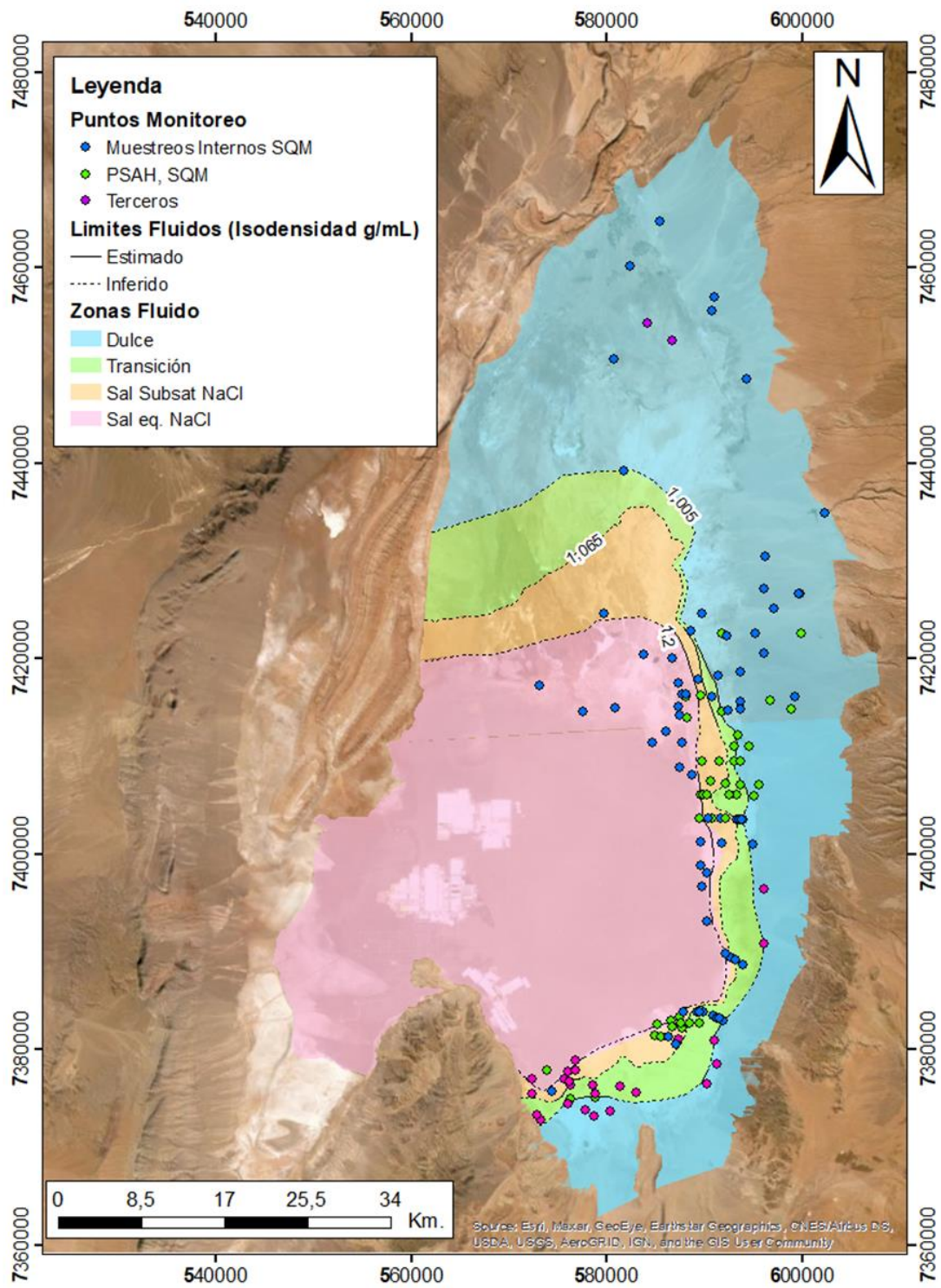
- Se dio prioridad a los pozos habilitados en tramos someros, con el fin de obtener medidas de densidad que no tuvieran influencia de la salmuera profunda en la zona de transición y de agua dulce.
- Para la definición de las zonas se consideró el último valor de densidad medida, dando mayor importancia a las mediciones posteriores a 2010.
- No se consideran los puntos que corresponden a mediciones de agua superficial, con el objetivo de representar únicamente procesos subterráneos. En este contexto, se considera que los aportes que pueden ocurrir por desbordes de cuerpos superficiales no modifican la caracterización de zonas asociadas a los distintos tipos de agua.
- Se descartaron mediciones de densidad más diluidas de lo habitual, considerándolas influenciadas por eventos de tormentas o desbordes sobre la interfaz.
- Asimismo, se descartaron datos puntuales inconsistentes con las tendencias observadas en planta, especialmente en puntos con un solo dato medido.
- Para los pozos sin habilitación, se supuso que la medición era representativa de aguas subterráneas someras, a menos que este supuesto no fuese consistente con las mediciones cercanas de pozos con habilitación o con el conocimiento general del sistema.
- Para aquellos puntos que solo contaban con medidas de CE, se utilizó la relación definida en el Informe del PSAH N° 28 de SQM (SQM Salar 2021b) para estimar los valores de densidad.
- En los pozos que contaban con perfiles de CE, se obtuvo el valor de CE medido en superficie y se realizó la transformación a densidad.

- En sectores sin información concluyente, los límites entre zonas fueron inferidos considerando antecedentes geomorfológicos como el borde del núcleo de halita y el canal de disolución.
- Para trazar el límite entre la zona de transición y la salmuera se consideraron los resultados de los estudios geomorfológicos (J. P. Le Roux 2019b, 2018), que definen el mapa de elevación de la interfaz salina presentado en la sección O.
- El análisis se realizó considerando la caracterización análoga en los sistemas hidrogeológicos aledaños, que están descritos en cada modelo conceptual local.

En el Salar de Atacama se cuenta con 148 puntos con información de densidad que cumplen con los criterios mencionados.

El detalle de los puntos empleados para cada sistema puede verse en la Figura 4-48. Esta misma figura muestra la traza de las isolíneas de densidad que separan los sectores donde resulta esperable encontrar agua dulce, agua de transición y salmuera con base en los criterios antes definidos. Para la zona de salmuera, se definió, además, el contorno en que la densidad alcanza un valor de 1,2 g/mL, donde la salmuera se encuentra próxima al equilibrio con halita, de acuerdo con lo indicado en la Figura 4-46.

Figura 4-48 Ubicación isolíneas de densidad que indican el afloramiento de la interfaz salina.



Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.3.2 Reconocimiento de interfaz salina en profundidad

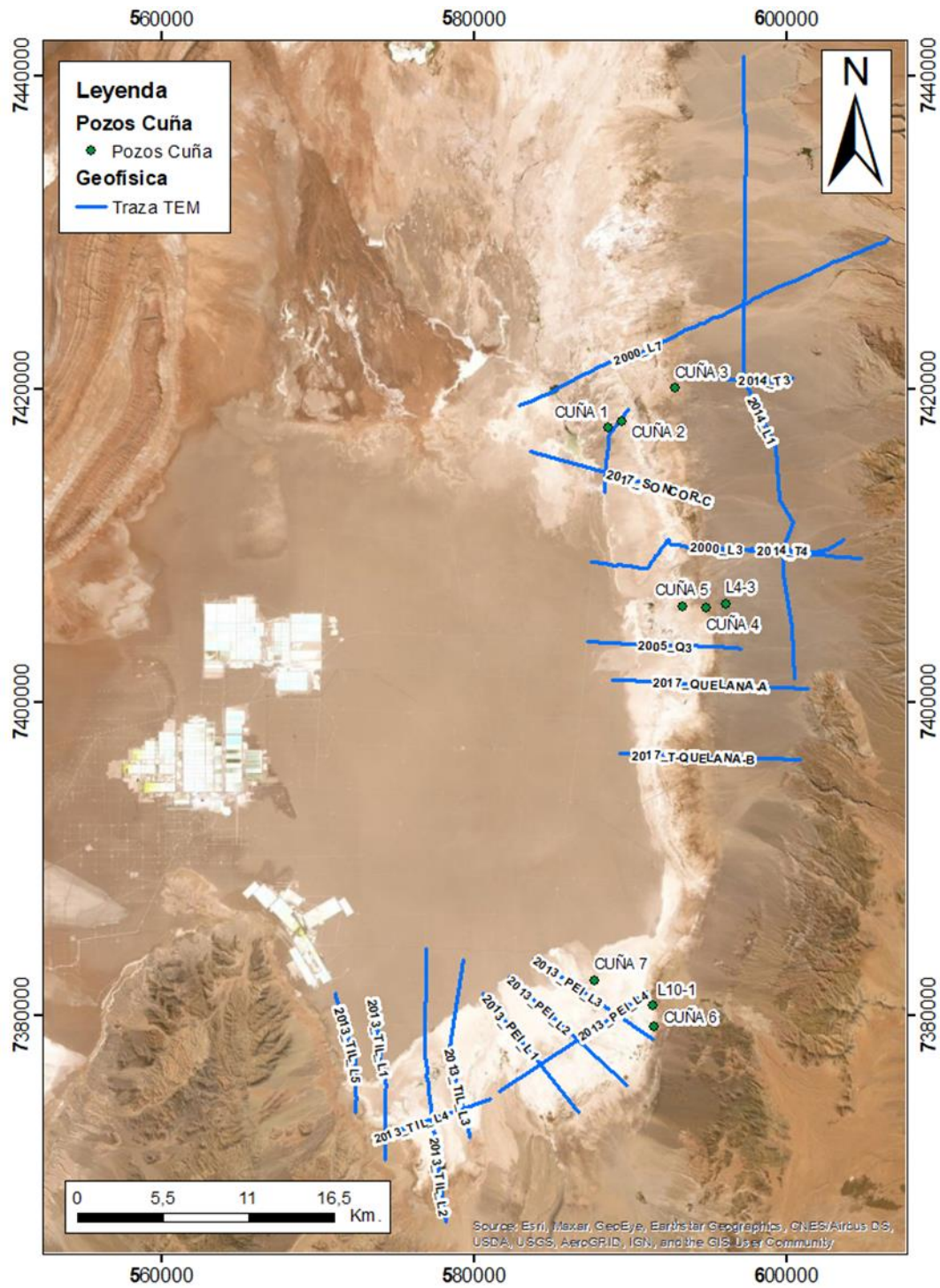
Para delimitar la interfaz salina en profundidad, se trabajó a partir de dos fuentes de información: (i) secciones de modelado de resistividad eléctrica obtenidas a través de estudios de Transiente Electromagnético (TEM), (Figura 4-49); y (ii) caracterización de la conductividad eléctrica de fluidos en pozos, donde se observa un quiebre en los valores de CE desde valores típicos de fluido de transición hasta salmuera próxima al equilibrio con halita, donde se alcanza el equilibrio de CE en dichos perfiles (valor de CE constante en torno a  $214 \pm 21 \text{mS/cm}$ ). La ubicación de los puntos medidos por SQM en su PSAH y otros autores se muestra en la Figura 4-50.

En la Figura 4-51, Figura 4-52 y Figura 4-53, se muestran los resultados de los perfiles de CE realizados por SQM para los sistemas Soncor, Aguas de Quelana, Peine, respectivamente. En general puede verse que todos terminan por estabilizarse en salmuera próxima al equilibrio con halita ( $>214 \pm 21 \text{mS/cm}$ , de acuerdo a la Tabla 4-29) y el comienzo de sus mediciones comienza en distintos fluidos, dependiendo de las características constructivas del pozo (habilitación) y de su ubicación relativa respecto a la zona donde afloran en superficie los distintos tipos de fluidos (Figura 4-48). Por ejemplo, en algunos pozos como Cuña 1, Cuña 2, Cuña 5 y Cuña 7, el límite entre la zona de transición y la salmuera subsaturada ya ha aflorado al este, por lo que en sus registros no muestran quiebre alguno, o sólo pasan de salmuera subsaturada a salmuera en equilibrio.

La Figura 4-54, Figura 4-55 y Figura 4-56 muestran las mediciones realizadas para el seguimiento de la interfaz en Peine y Tilopozo por Albemarle y MEL. En general, se aprecia que todos los quiebres (pasos de un tipo de fluido a otro) suceden a profundidades similares en cada pozo, lo que sugiere que la posición de la interfaz durante el periodo monitoreado no ha experimentado variaciones significativas, tal como se ha señalado en cada uno de los informes de PSAH presentados por SQM a la autoridad ambiental. Estos análisis son consistentes con los resultados obtenidos por los distintos autores que han analizado la variabilidad de la posición de la interfaz salina (Albemarle 2021) y (MEL 2019).

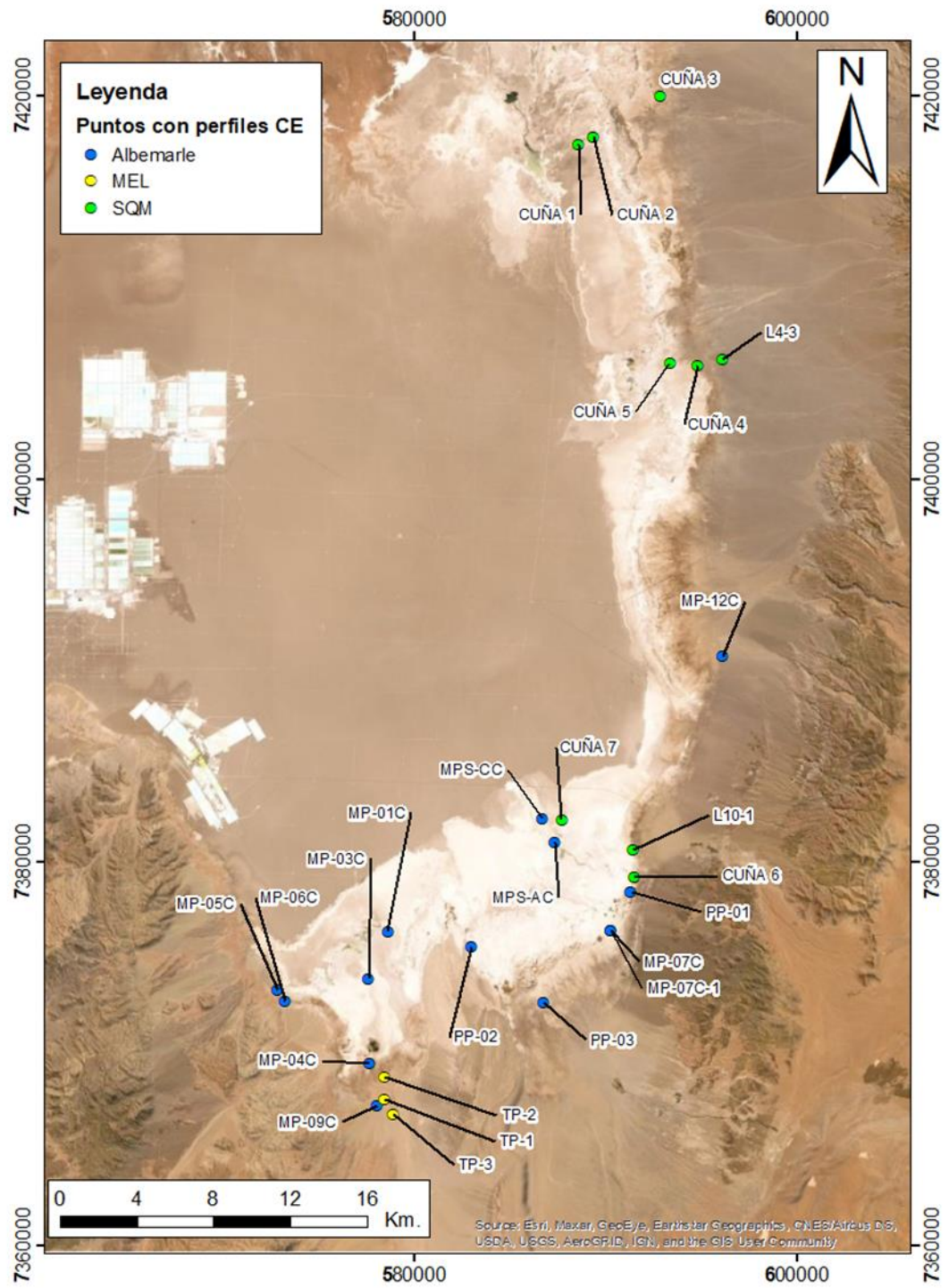


Figura 4-49 Ubicación de perfiles de estudios Geofísicos (TEM) y pozos de monitoreo compilados e integrados en delimitación de interfaz salina.



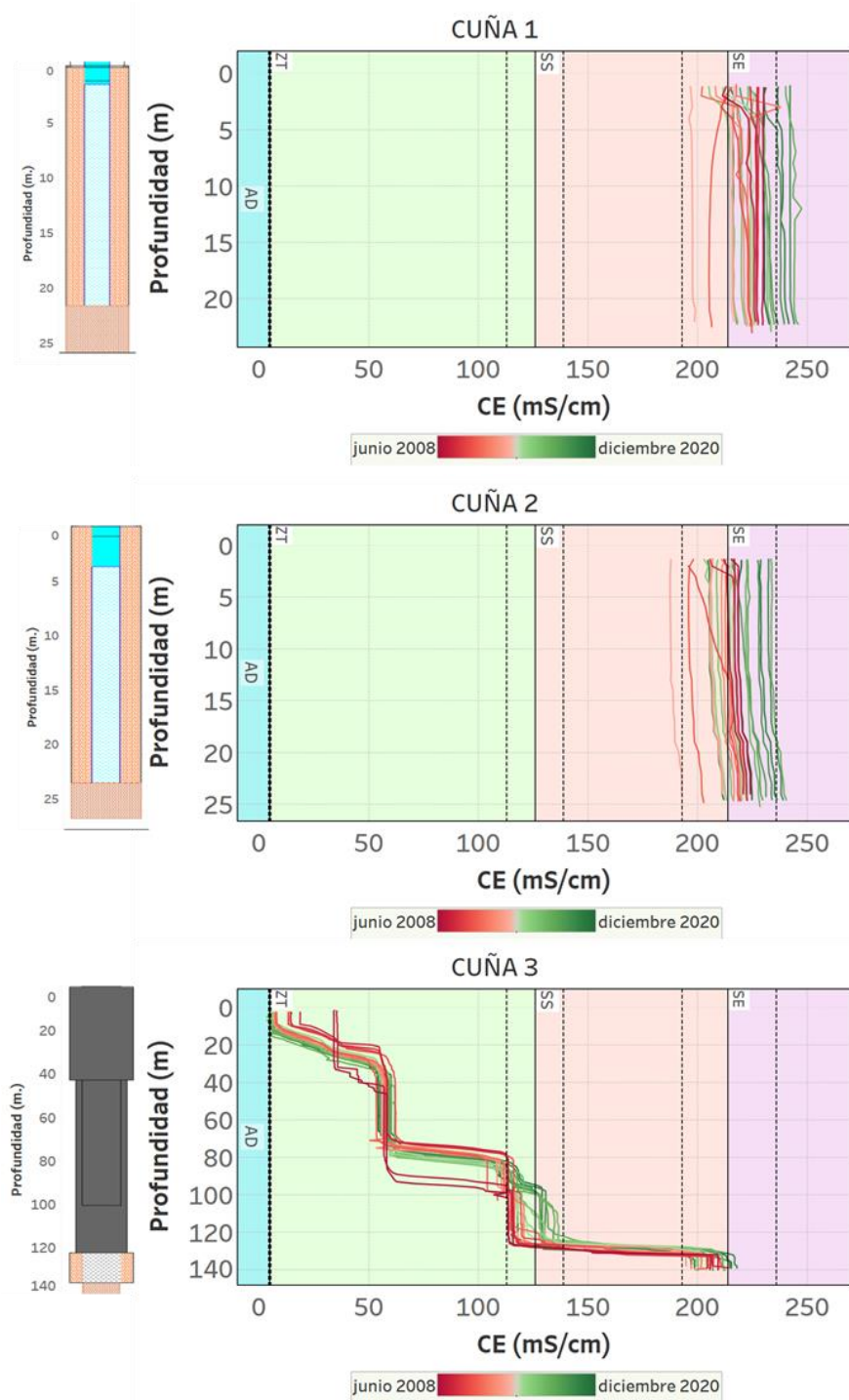
Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-50 Ubicación de puntos con perfiles de CE medidos por SQM y otros autores (Albemarle, MEL).



Fuente: SQM, 2021.

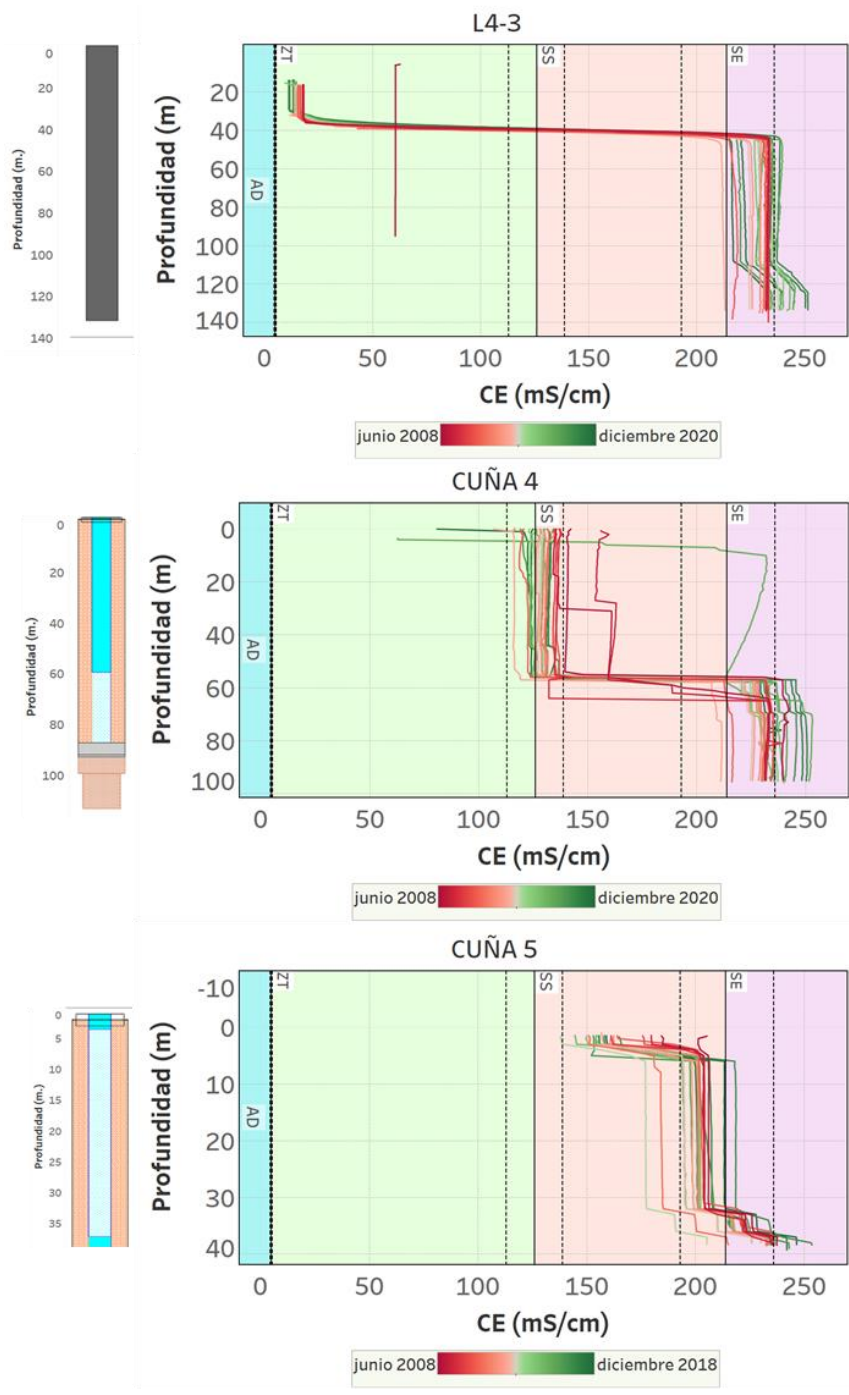
Figura 4-51 Perfiles CE en sistema Soncor para seguimiento de la interfaz y clasificación de los fluidos que intersecta cada pozo (AD: Agua Dulce, ZT: Zona transición, SS Salmuera Subsaturada y SE: Salmuera próxima a equilibrio NaCl. Las líneas discontinuas representan el error en la delimitación de cada una de las zonas (10% respecto del valor de CE calculado).



Fuente: SQM, 2021.

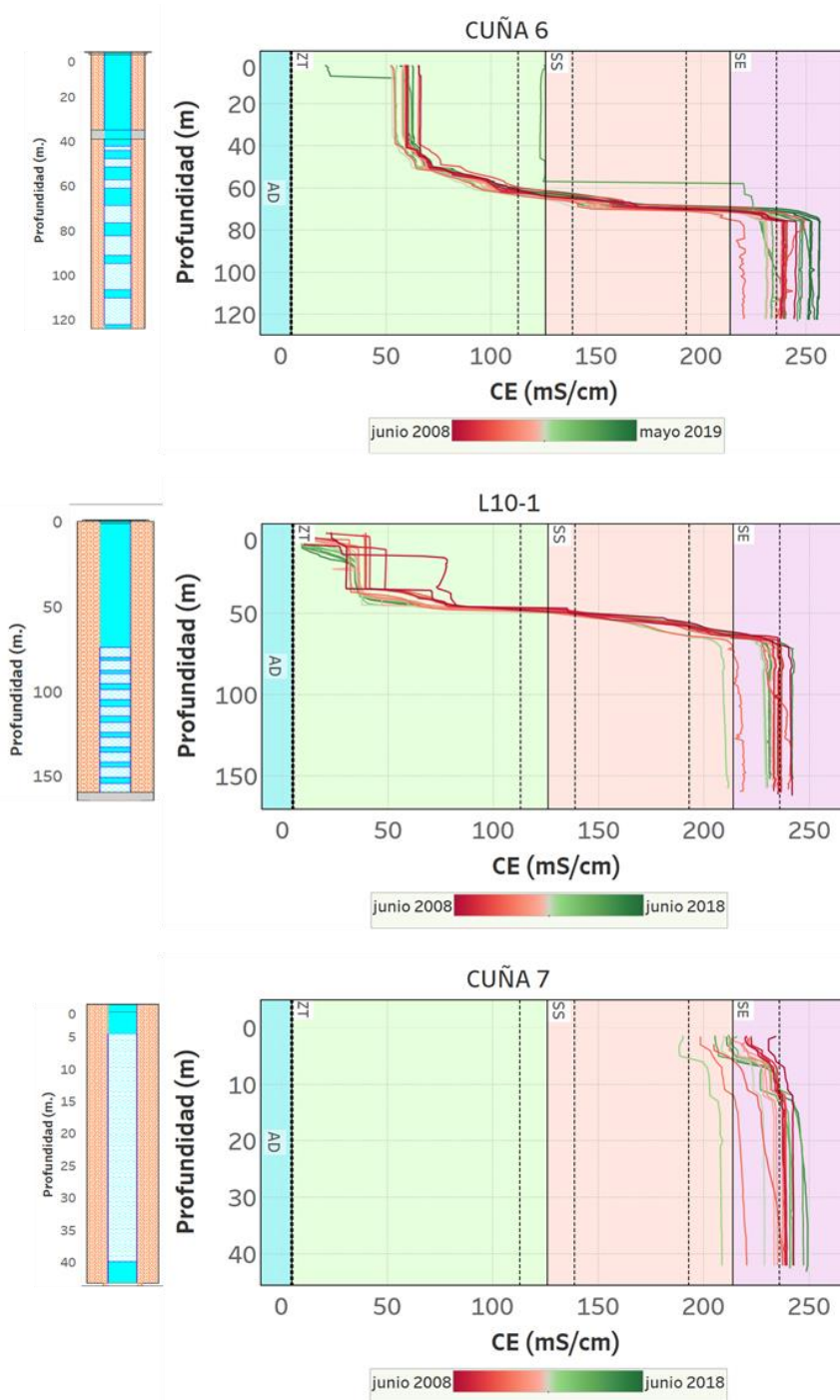


Figura 4-52 Perfiles CE en sistema Aguas de Quelana para seguimiento de la interfaz y clasificación de los fluidos que intersecta cada pozo (AD: Agua Dulce, ZT: Zona transición, SS Salmuera Subsaturada y SE: Salmuera próxima a equilibrio NaCl. Las líneas discontinuas representan el error en la delimitación de cada una de las zonas (10% respecto del valor de CE calculado).



Fuente: SQM, 2021.

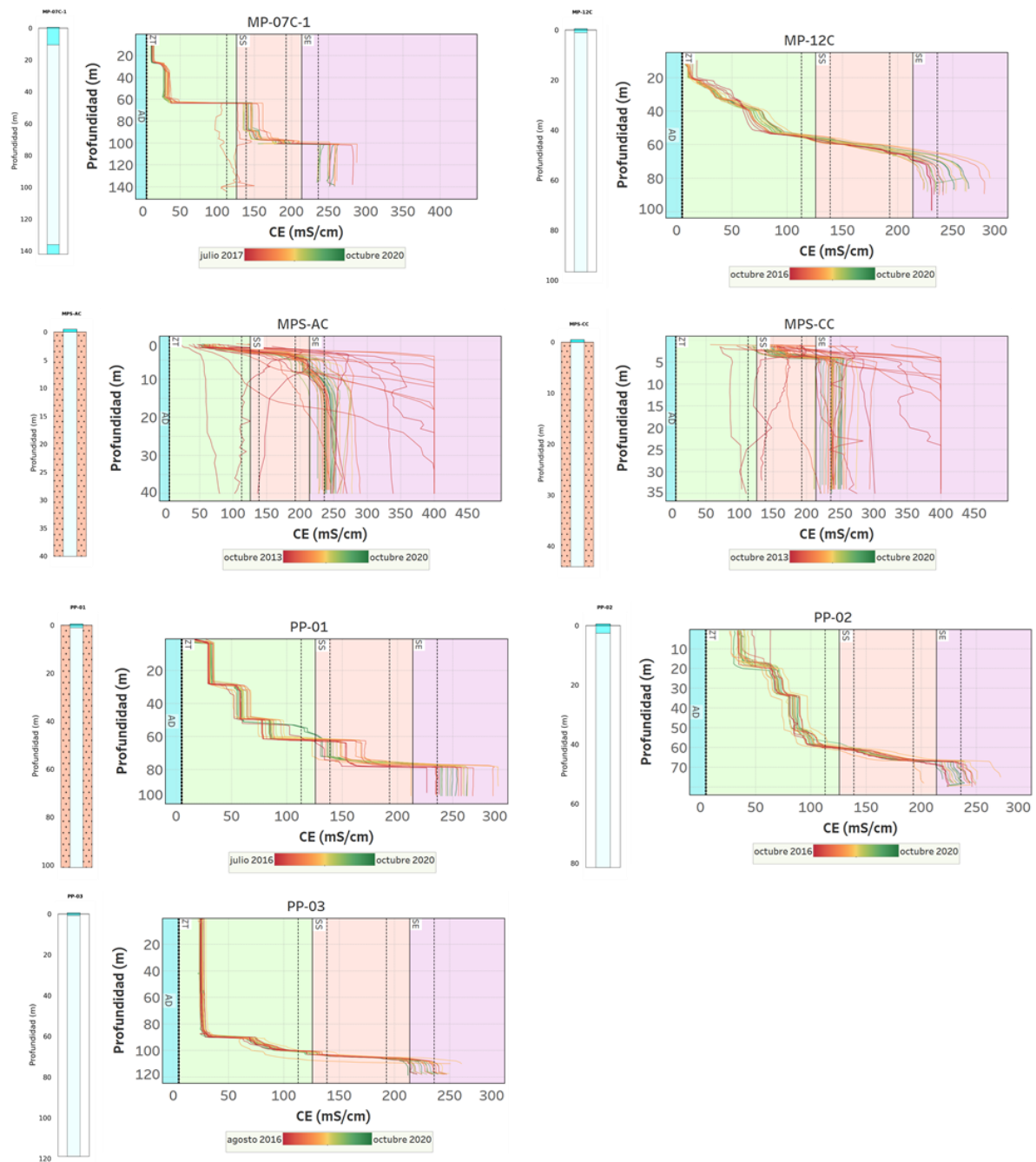
Figura 4-53 Perfiles CE en sistema Peine para seguimiento de la interfaz y clasificación de los fluidos que intersecta cada pozo (AD: Agua Dulce, ZT: Zona transición, SS Salmuera Subsaturada y SE: Salmuera próxima a equilibrio NaCl. Las líneas discontinuas representan el error en la delimitación de cada una de las zonas (10% respecto del valor de CE calculado).



Fuente: SQM, 2021.

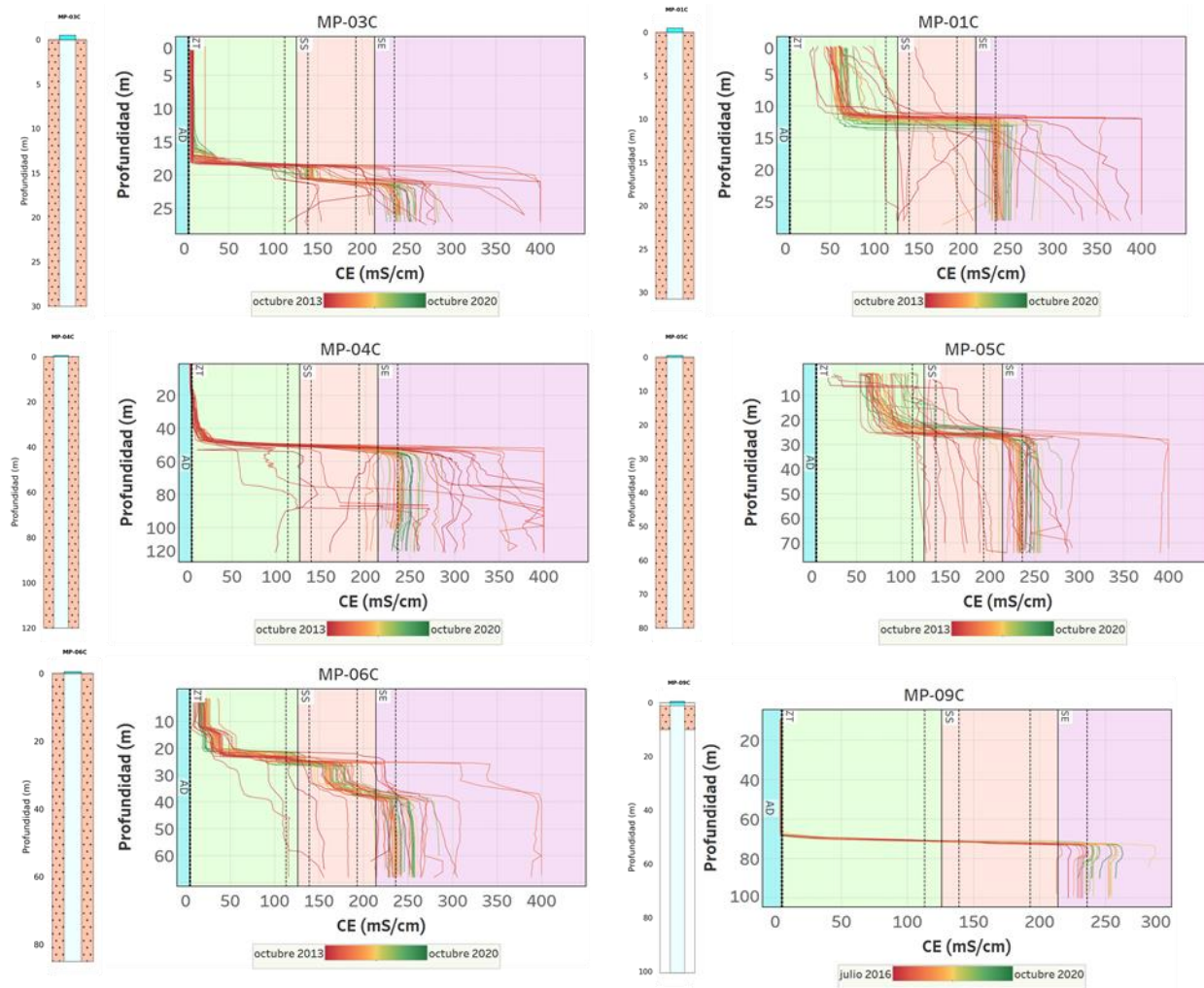


Figura 4-54 Perfilajes CE realizados en Peine por Albemarle.



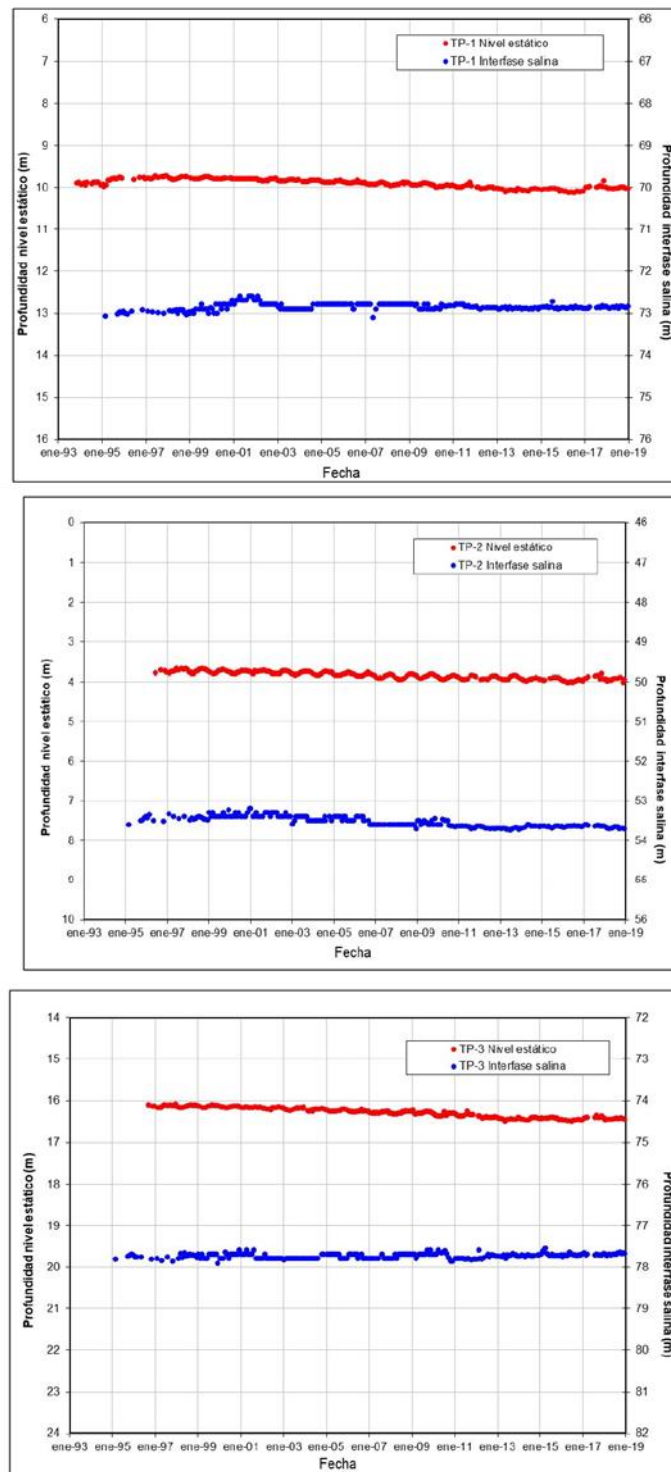
Fuente: A partir de datos de (Albemarle, 2021)

Figura 4-55 Perfilajes CE realizados en Tilopozo por Albemarle.



Fuente: A partir de datos de (Albemarle, 2021)

Figura 4-56 Perfiles geofísica realizados por MEL en Tilopozo.



Fuente: (MEL, 2019)

Con la información previamente descrita se ha interpretado la ubicación y el volumen de la interfaz en profundidad. En la Figura 4-57 se muestra la distribución en superficie de los distintos tipos de fluidos y la ubicación

de perfiles representativos para los distintos sistemas. Los perfiles previamente mencionados se presentan en los capítulos posteriores correspondientes a cada sistema ambiental local.

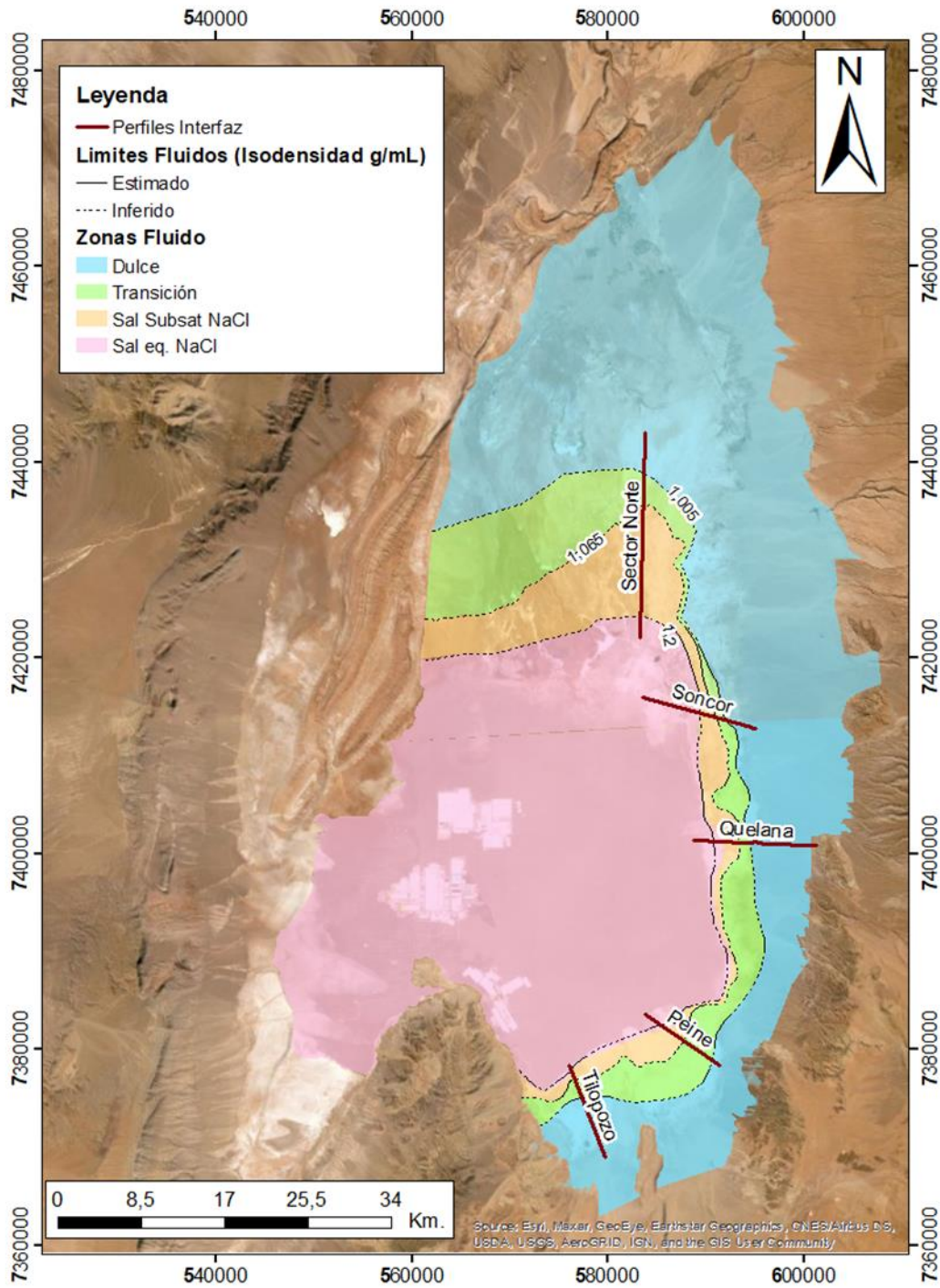
Sin embargo, y con el fin de establecer una comparación de la forma y pendiente de la interfaz entre los distintos sistemas de interés ambiental, la Figura 4-58 muestra las isodensidades de 1,065g/mL estimadas para los distintos perfiles.

Debe notarse que, la pendiente en Tilopozo de la isodensidad 1,065g/mL es notablemente menos acusada que en el resto de los sistemas. Esta diferencia de pendientes podría tener relación con las distintas deometrías de unidades geológicas y sus parámetros hidráulicos asociados, ya que, se ha propuesto que las distintas pendientes para la interfaz salina encontradas en el Salar del Atacama responden a distintos valores de permeabilidad hidráulica, siendo los sectores con menor pendiente donde existe mayor conductividad hidráulica (Marazuela et Al., 2018).

Al respecto de la estabilidad de la interfaz salina, como resultado del análisis de los datos de SQM, se ha inferido que la posición de la interfaz durante el periodo monitoreado no ha experimentado variaciones significativas (SQM, 2021). Estos análisis son consistentes con los resultados obtenidos por los distintos autores que han analizado la variabilidad de la posición de la interfaz salina (Albemarle 2021) y (MEL 2019).

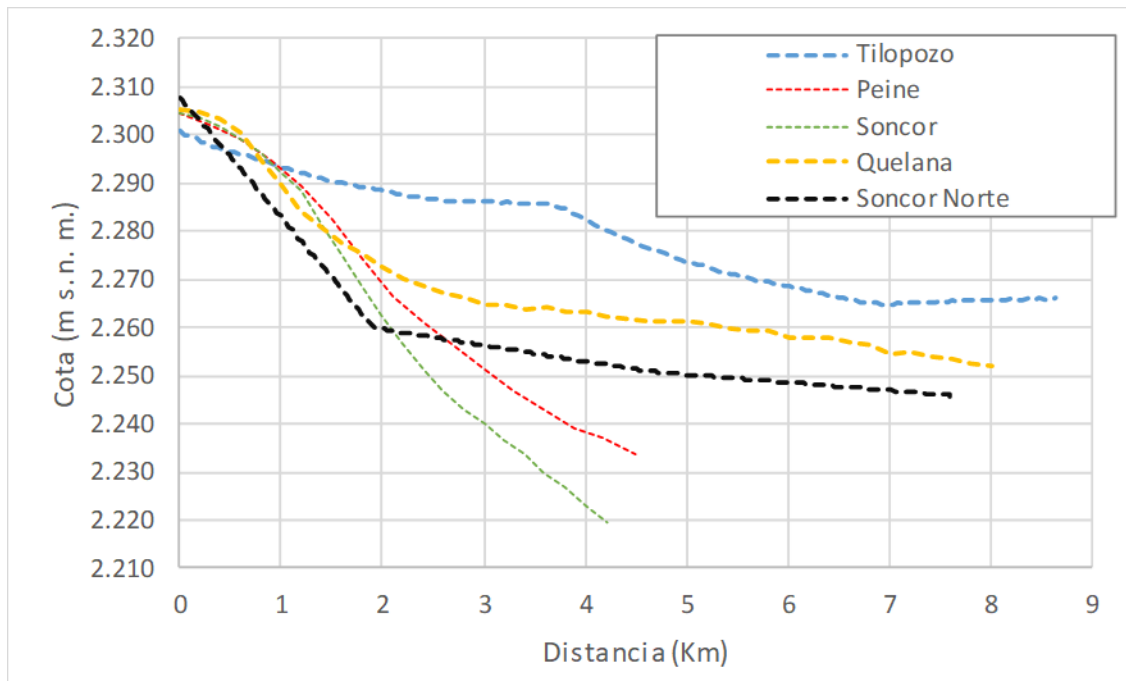


Figura 4-57 Mapa de distribución en superficie de distintos tipos de fluidos y perfiles para caracterizar la profundidad, pendiente, forma y volumen de la interfaz salina en distintos sectores.



Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-58 Perfiles de la profundidad de la interfase salina (densidad 1.065 g/mL) y su pendiente en distintos sectores del Salar.



Fuente: SQM, 2021.

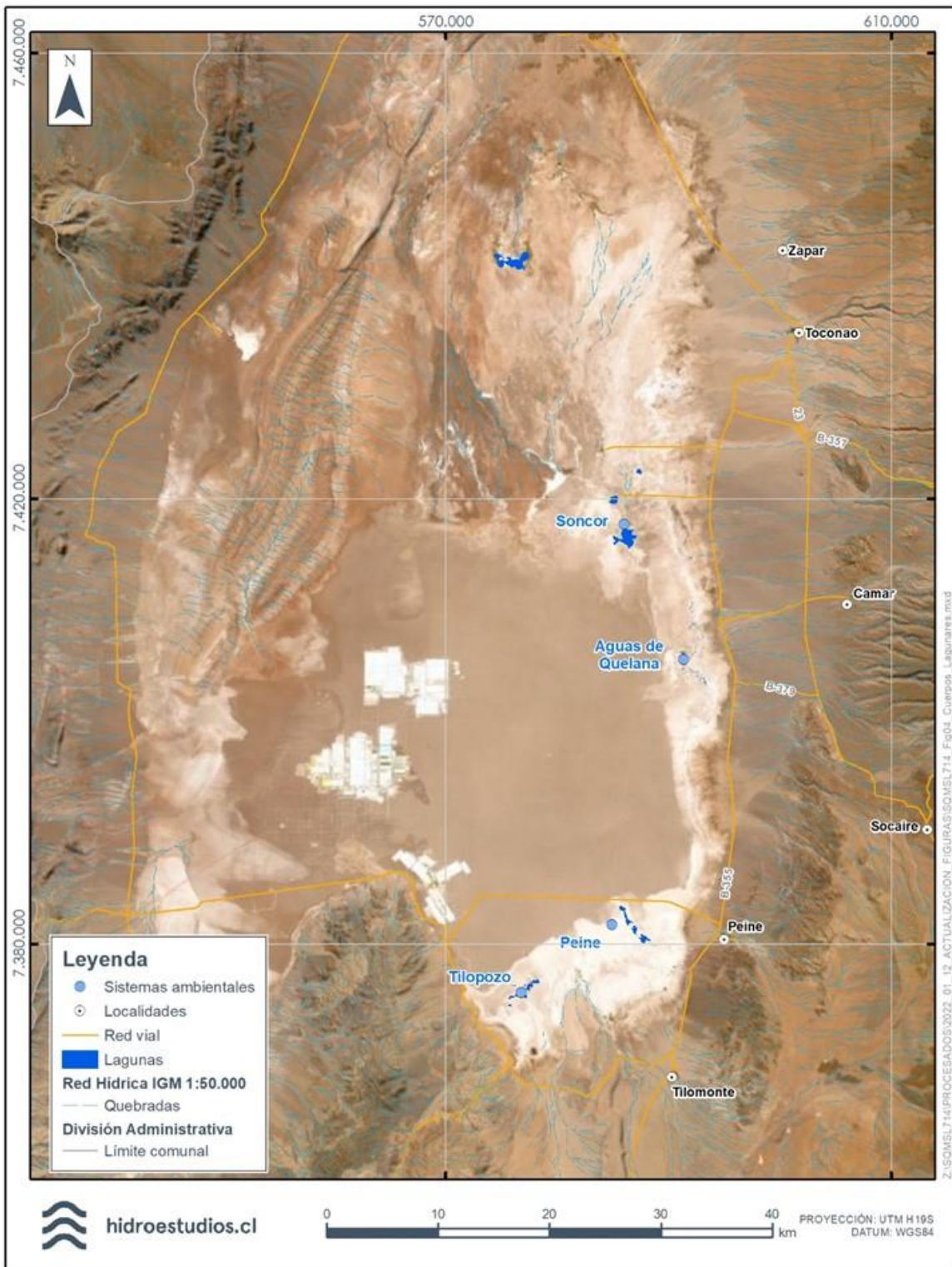
#### 4.3.7.5.1.3.3 Cuerpos de agua superficiales

El sector estudiado (polígono de contexto general) se compone de cuerpos lagunares que dan origen a los sistemas ambientales sensibles presentes en la cuenca. Estos cuerpos lagunares se alimentan de agua subterránea proveniente de la unidad aluvial que, al entrar en contacto con la salmuera de la cuña salina, por diferencia de densidades aflora en superficie.

En el caso de Soncor y Peine, el agua aflora también en forma de escurrimientos superficiales, que de igual manera se encuentran alimentando las lagunas de cada sistema.

En la Figura 4-59 se presenta la ubicación referencial de los cuerpos lagunares del Salar de Atacama, mientras que, en los capítulos subsiguientes de cada sistema, se presenta el detalle de su caracterización.

Figura 4-59. Ubicación de cuerpos lagunares Salar de Atacama.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

## 4.3.7.5.1.3.4 Caudales de extracción

## 4.3.7.5.1.3.4.1 Extracción de salmuera

## 4.3.7.5.1.3.4.1.1 Caudales aprobados vigentes de extracción Salmuera

Actualmente cuentan con autorización de extracción de salmuera en el núcleo del salar: SQM Salar S.A. y Al-bemarle.

En el caso de la autorización ambiental de SQM Salar S.A. esta se concedió como parte de la RCA 226/2006 asociada al Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del proyecto “Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama”. La regla operacional de extracción concedida (promedio anual) es la siguiente:

- La extracción de salmuera se realizará desde una serie de pozos localizados al interior de las zonas de extracción MOP y SOP
- Bajo el supuesto de que las operaciones de SQM no producen reinyección directa de salmuera, ni desde el sector MOP ni SOP, SQM podrá bombear como máximo lo indicado en la Tabla 4-30.
- La cantidad adicional de salmuera que SQM podrá bombear a medida que reinyecta, es de 0,13 l/s adicionales desde el área MOP y 0,13 l/s desde el área SOP, por cada litro por segundo total (MOP y SOP) que se reinyecte en forma directa.

Tabla 4-30. Bombeo máximo de salmuera por año de operación según RCA 226/2006

Año de operación	Sector MOP (L/s)	Sector SOP (L/s)
1 a 2	400	350
3 a 6	800	450
7 a 12	900	600
13 a 19	950	650
20 a 25	1000	700

Fuente: Hidroestudios, 2021.

Un resumen de la extracción neta (extracción menos reinyección) aprobada, incluyendo los caudales de extracción reales previa aprobación, se presenta en la Tabla 4-31.



Tabla 4-31. Resumen derechos extracción Salmuera SQM Salar S.A. RCA 226/2006.

Año	Extracción Neta Total Anual (L/s)	Año	Extracción Neta Total Anual (L/s)
1994	17	2013	1354
1995	280	2014	1500
1996	389	2015	1500
1997	623	2016	1500
1998	772	2017	1500
1999	934	2018	1500
2000	944	2019	1556
2001	727	2020	1600
2002	767	2021	1600
2003	780	2022	1600
2004	779	2023	1600
2005	864	2024	1600
2006	854	2025	1600
2007	827	2026	1639
2008	750	2027	1700
2009	958	2028	1700
2010	1250	2029	1700
2011	1250	2030	1700
2012	1250		

Fuente: SQM, 2021.

En el caso de la autorización ambiental vigente de Albemarle estos se concedieron como parte de la RCA 21/2016 asociada al Estudio de Impacto Ambiental (EIA) del proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Esta aprobación contempla una extracción de 300 l/s, la cual se logrará progresivamente en incrementos semestrales de 60 l/s, alcanzándose el máximo dos años luego del inicio del proyecto. Un resumen de las extracciones de salmuera aprobadas de Albemarle se presenta en la Tabla 4-32.

Tabla 4-32. Resumen derechos extracción salmuera Albemarle RCA 21/2016.

Área bombeo	Superficie (ha)	Año 2013	Año 1 desde término construcción pozos PAT (Año 2017)	Año 2 en adelante (Año 2018)	Incremento por área

Tabla 4-32. Resumen derechos extracción salmuera Albemarle RCA 21/2016.

A1	4119	60	240	360	300
A2	3999	82	82	82	0
TOTAL	8119	142	322	442	300

Fuente: RCA 21/2016

#### 4.3.7.5.1.3.4.2 Extracción de salmuera SQM

En este capítulo se presenta la extracción y reinyección de salmuera histórica de SQM desde noviembre de 1994 hasta diciembre de 2020.

La Figura 4-60 muestra la ubicación de los polígonos de explotación respectivos (MOP y SOP).

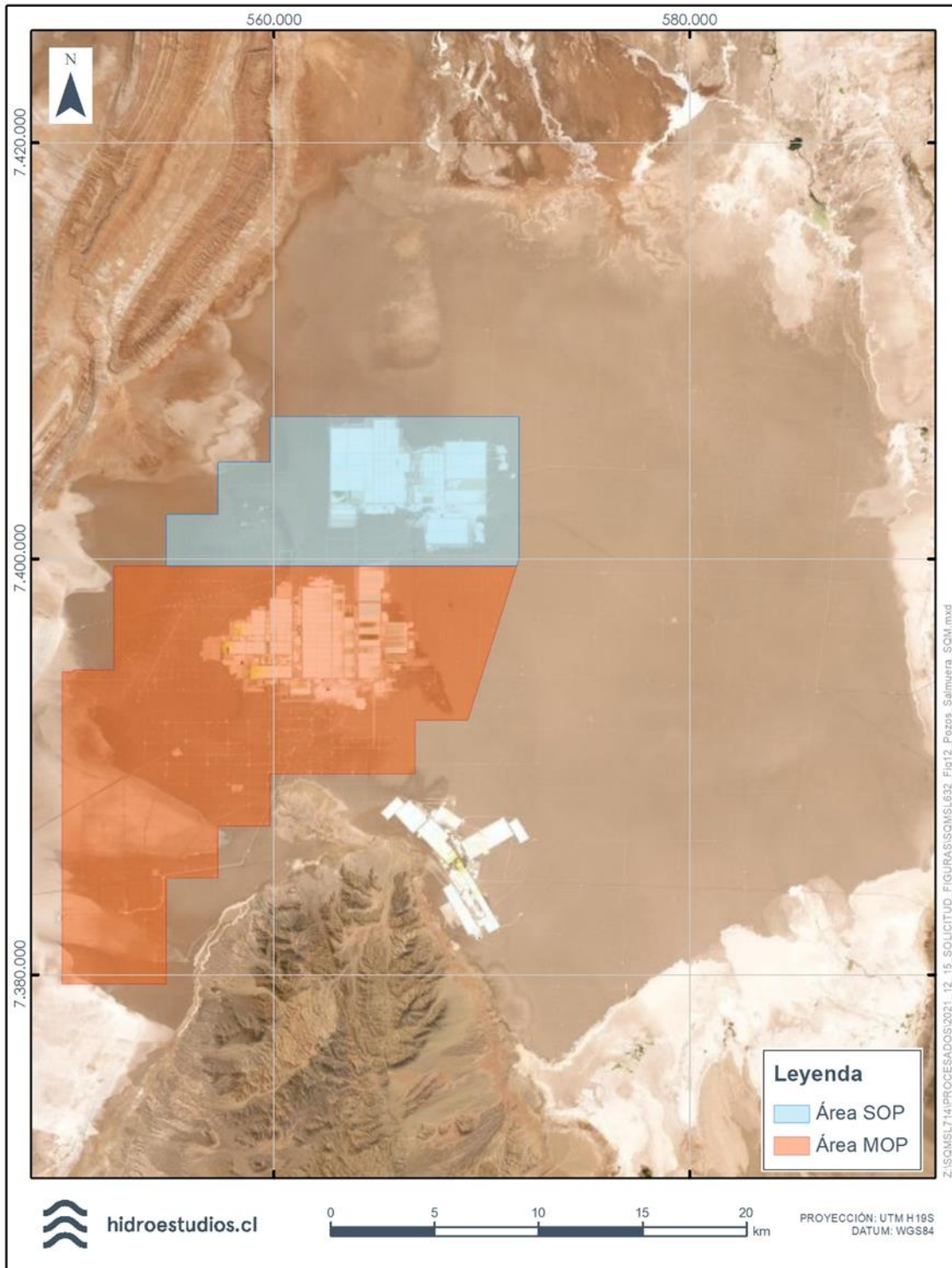
La Figura 4-61 muestra el caudal bruto medio anual extraído por SQM, el caudal medio anual es de 1.094 L/s con un aumento constante de las extracciones relacionados especialmente a la aprobación de la RCA 226/2006 y un descenso importante el año 2018, como parte de las medidas adoptadas por SQM en el marco del procedimiento sancionatorio iniciado por la SMA (Res. Ex. N° 1/ROL F-041-2016). Se observa, además, que la mayor parte del volumen ha sido extraído desde el sector MOP, el más alejado de los sistemas ambientales locales, y el restante desde el sector SOP.

La Figura 4-62 muestra el caudal medio anual inyectado por SQM, el caudal medio desde 1996 es de 241 L/s, con un ligero aumento en el tiempo, pero de menor ascenso respecto a las extracciones. El 55% corresponden al sector MOP y 45% al sector SOP y más del 80% corresponde a reinyección de tipo indirecta.

La Figura 4-63 muestra la extracción neta histórica de SQM, vale decir extracción bruta menos reinyecciones. El caudal medio es de 853 L/s, con el mismo patrón de comportamiento de las extracciones brutas.

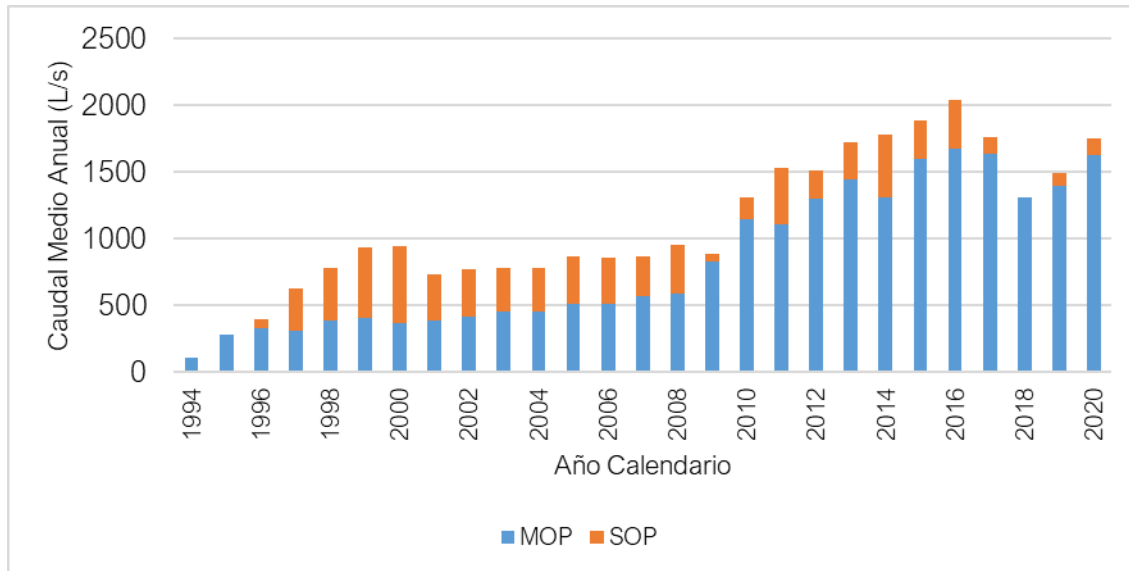
Es importante mencionar que todos los caudales presentados corresponden a los medios anuales según año calendario y que el valor relevante a considerar para las evaluaciones de los caudales en los capítulos posteriores corresponde a la extracción neta de Salmuera.

Figura 4-60. Ubicación zonas SOP y MOP



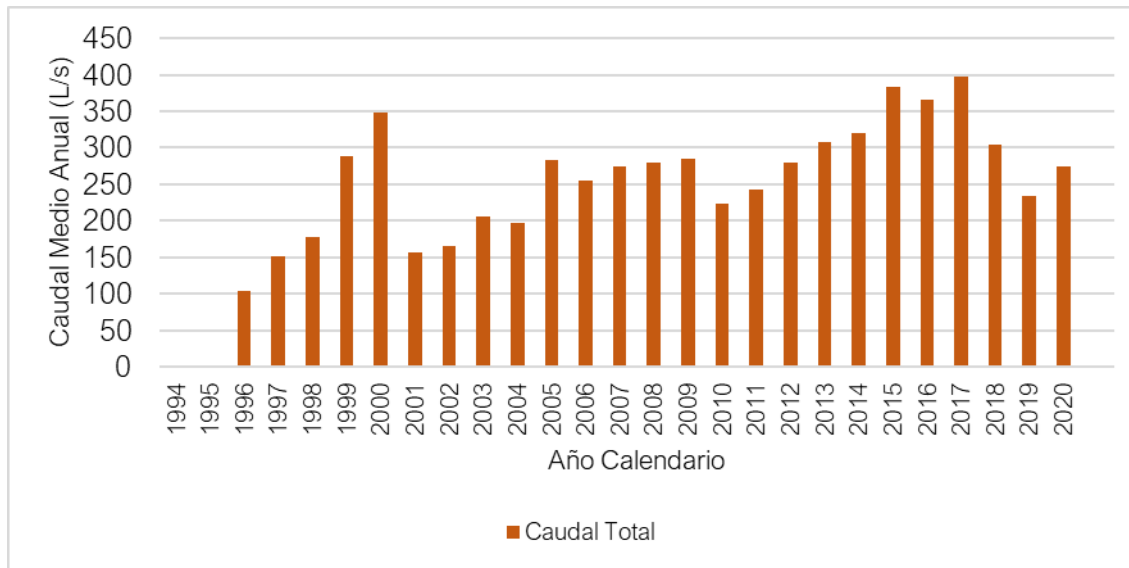
Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-61. Extracciones históricas de salmuera anuales de SQM



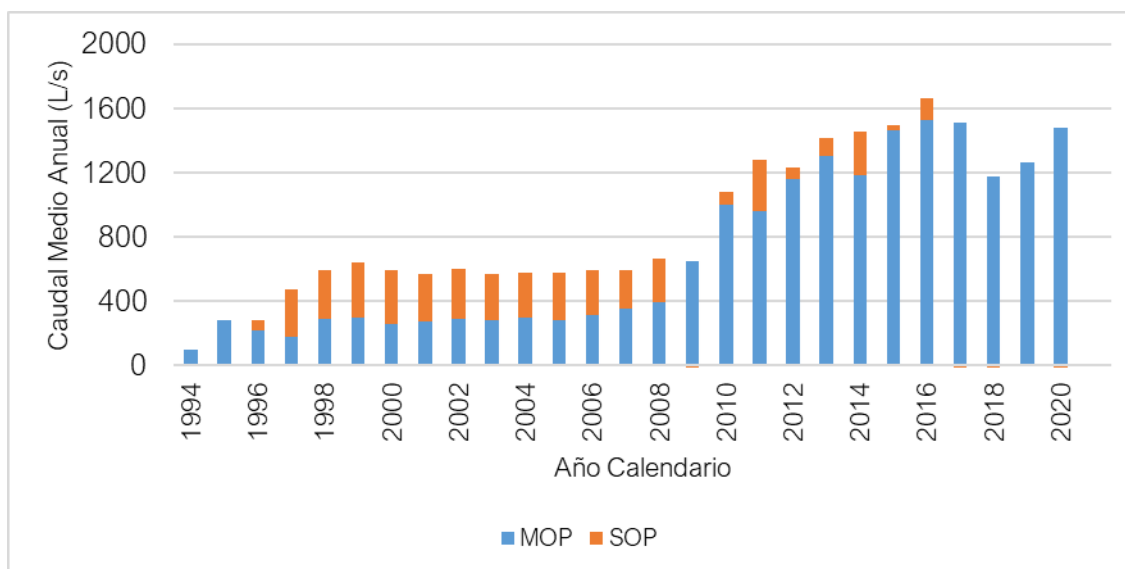
Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-62. Reinyecciones históricas de salmuera anuales de SQM



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-63 Extracción neta de salmuera SQM



Fuente: Hidroestudios, 2021.

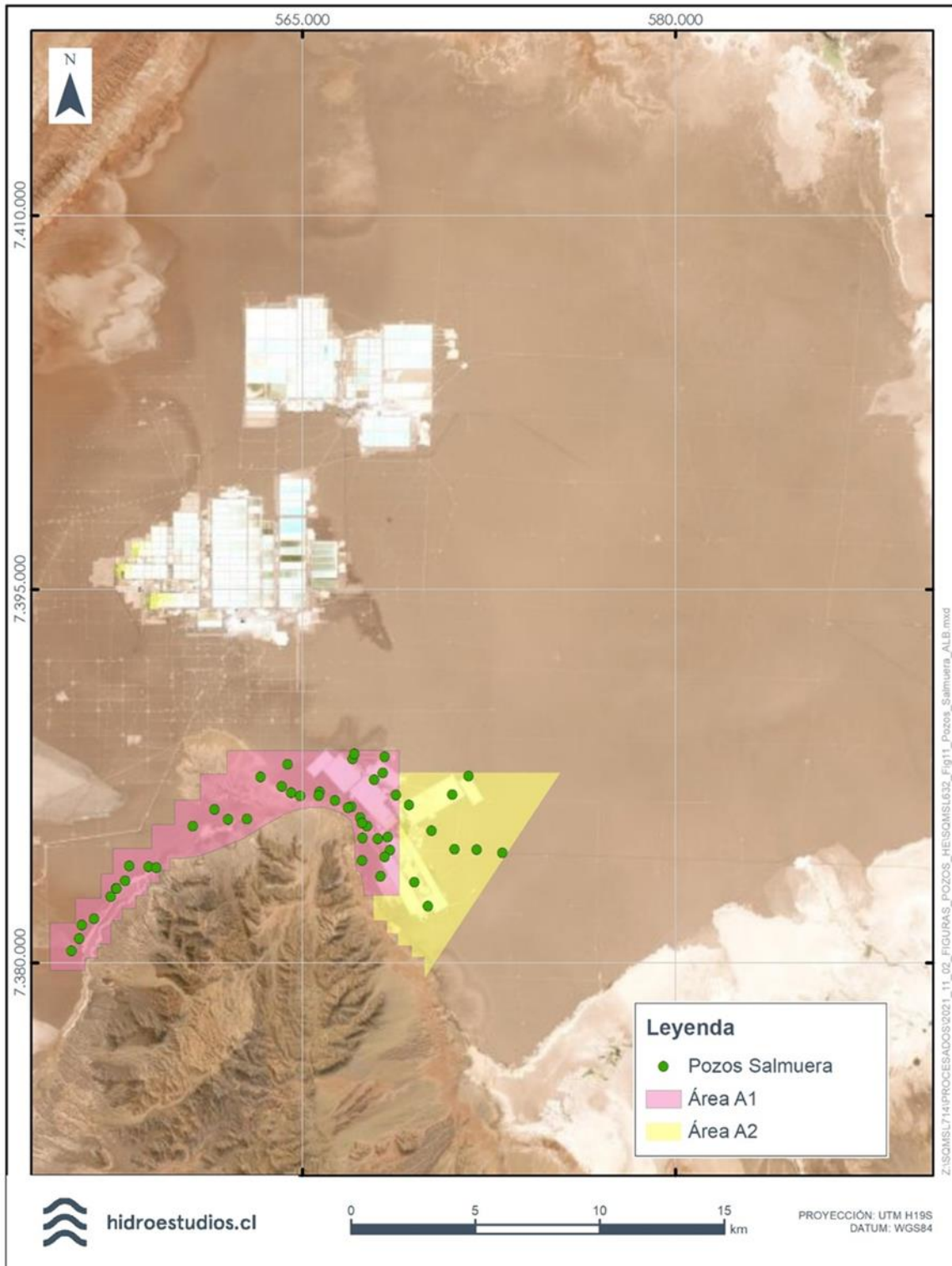
#### 4.3.7.5.1.3.4.3 Extracción de salmuera Albemarle

En este capítulo se presenta la extracción de salmuera histórica de Albemarle (ALB) desde enero de 1983 hasta diciembre de 2020 de acuerdo con los registros entregados por ALB a la SMA.

La Figura 4-64 muestra la ubicación de los pozos de extracción de salmuera de Albemarle (ALB) y los polígonos de explotación respectivos.



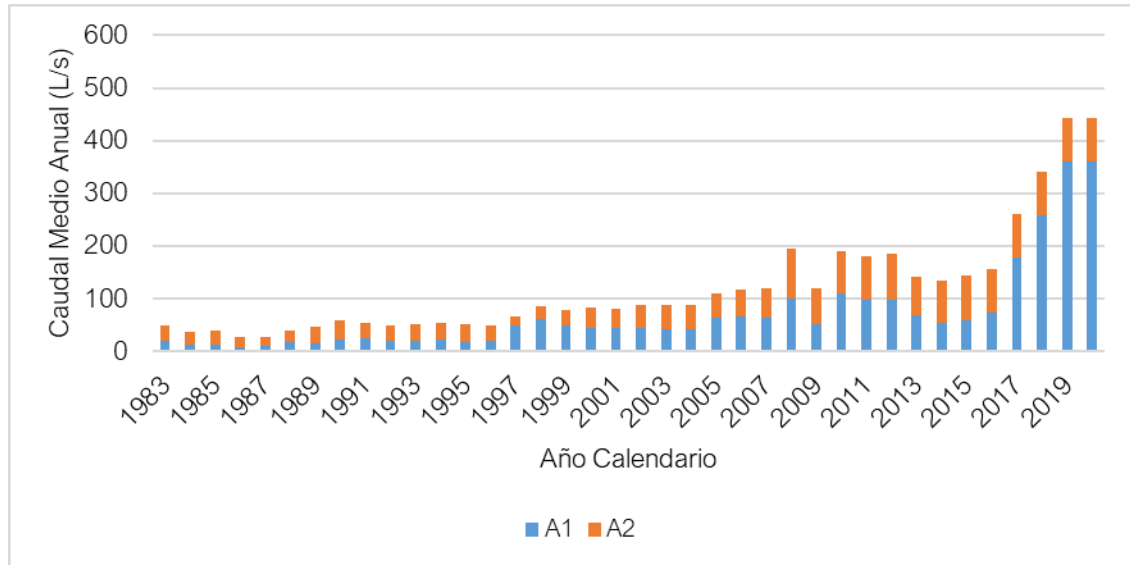
Figura 4-64 Ubicación zonas y pozos de extracción Albemarle.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

La Figura 4-65 muestra el caudal anual extraído por ALB, el caudal medio anual es de 121 L/s de los cuales, en promedio, el 57% ha sido extraído del polígono A1 y 43% del polígono A2. Se observa un aumento constante de las extracciones, siendo el mayor aumento el observado posterior a 2016, relacionado a la aprobación de la RCA 21/2016.

Figura 4-65 Extracciones de salmuera históricas anuales de ALB



Fuente: Hidroestudios, 2021.

4.3.7.5.1.3.4.4 Extracción de agua

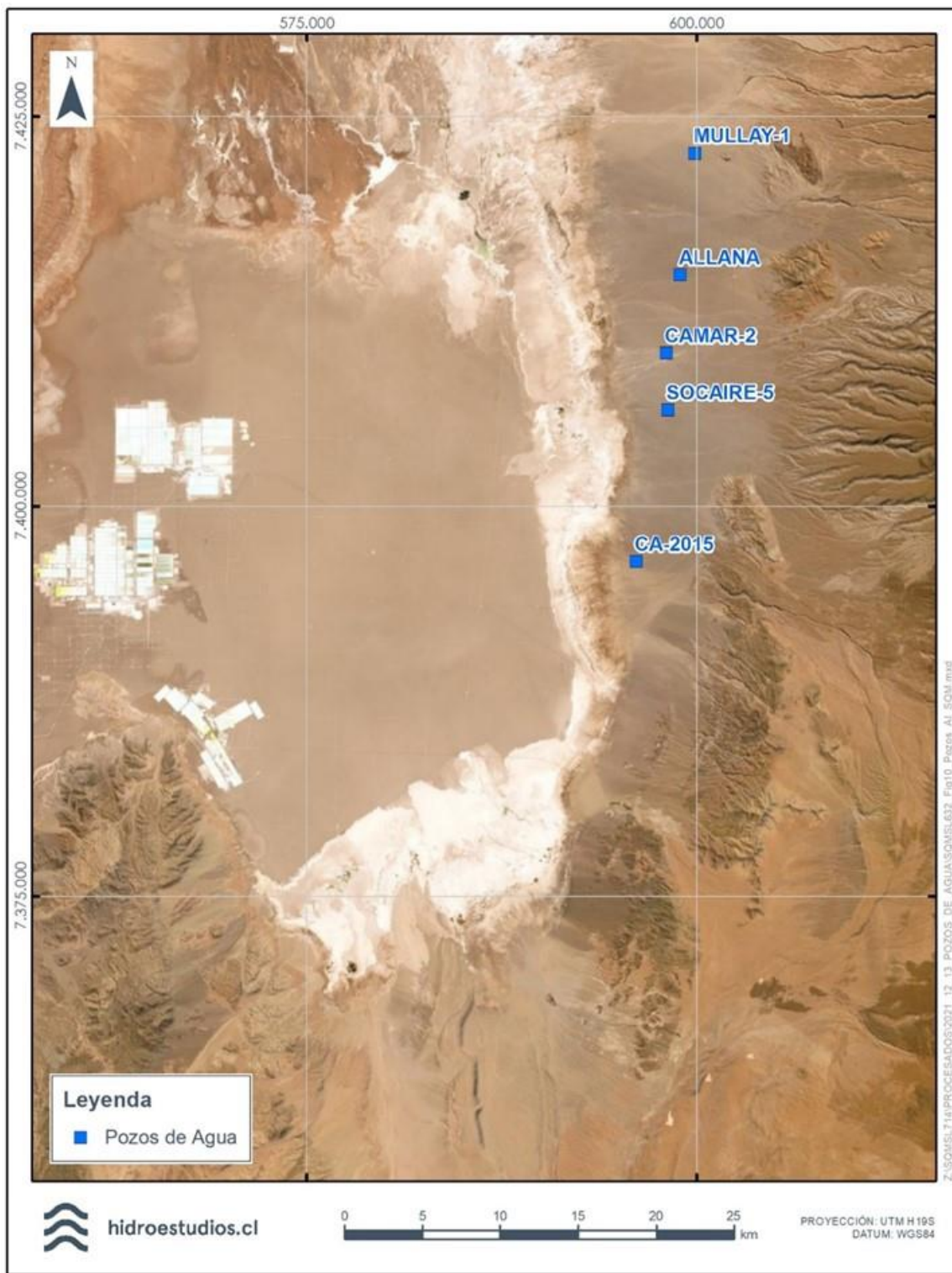
4.3.7.5.1.3.4.4.1 Extracción de agua SQM

Actualmente SQM cuenta con derechos de aprovechamiento de agua subterránea para extraer hasta 547 l/s, sin embargo, la actual RCA 226/2006 contempla únicamente la extracción de 240 l/s a través de los pozos Mullay-1, Allana, Camar-2, Socaire-5 y CA-2015 situados en el acuífero aluvial del margen Este del Salar (Sector acuífero B1).

En este capítulo se presenta la extracción de agua histórica de SQM desde noviembre de 1997 hasta diciembre de 2020.

La Figura 4-66 muestra la ubicación de los pozos de extracción de agua de SQM. Cabe notar que el pozo P-2 fue reemplazado por el pozo CA-2015 en febrero de 2017 y que el pozo Camar-2 se detuvo temporalmente entre abril de 2016 y enero de 2017 para posteriormente, detenerse completamente en 2018.

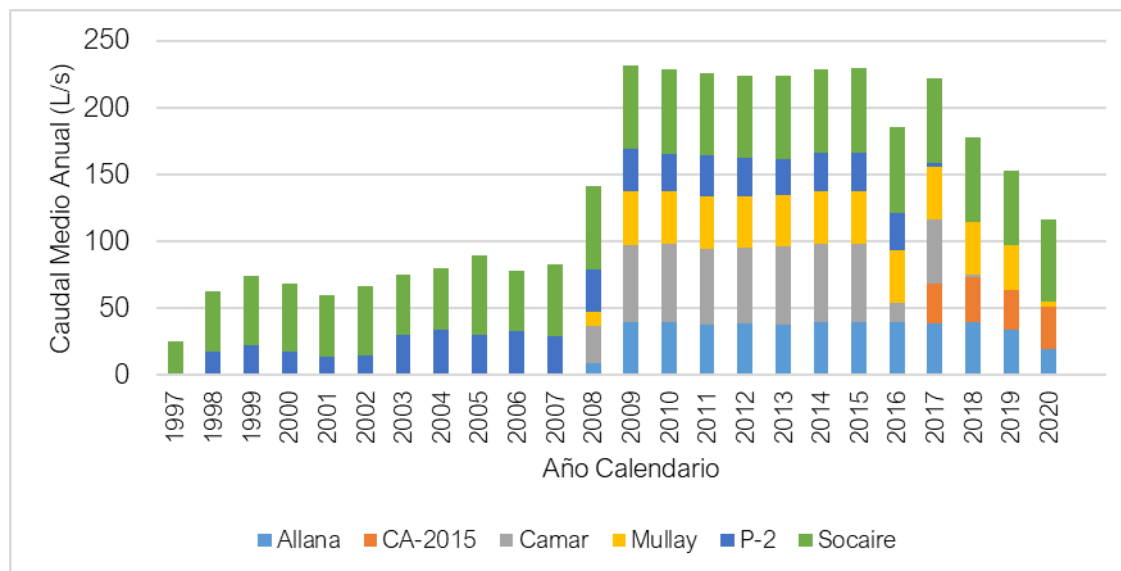
Figura 4-66 Ubicación pozos de agua de SQM



Fuente: Hidroestudios, 2021.

La Figura 4-67 muestra el caudal anual de agua extraído por SQM. El caudal medio anual es de 140 L/s y se observa un aumento de la extracción relacionado a la aprobación de la RCA 226/2006.

Figura 4-67 Extracciones históricas de agua SQM



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.7.5.1.3.4.4.2 Extracción de agua Albemarle

Albemarle es titular de 23,5 l/s de derechos otorgados de aguas subterráneas en tres puntos identificados como Tilopozo (8,5 l/s), Tucúcaro (10 l/s) y Peine (5 l/s) emplazados en la subcuenca sur del Salar de Atacama. De los cuales, ambientalmente se encuentran autorizados solo 16,9 l/s, a través de la RCA 21/2016.

En este capítulo se presenta la extracción de agua histórica de Albemarle desde octubre de 1997 hasta diciembre de 2020 de acuerdo con los registros entregados por ALB a la SMA en el marco del PSAH.

La Figura 4-68 muestra la ubicación de los pozos de extracción de agua de ALB. Cabe notar que el pozo Peine tiene derechos por 5 L/s y está destinado al abastecimiento del campamento ubicado en esa localidad, por lo que no es parte del proyecto industrial.



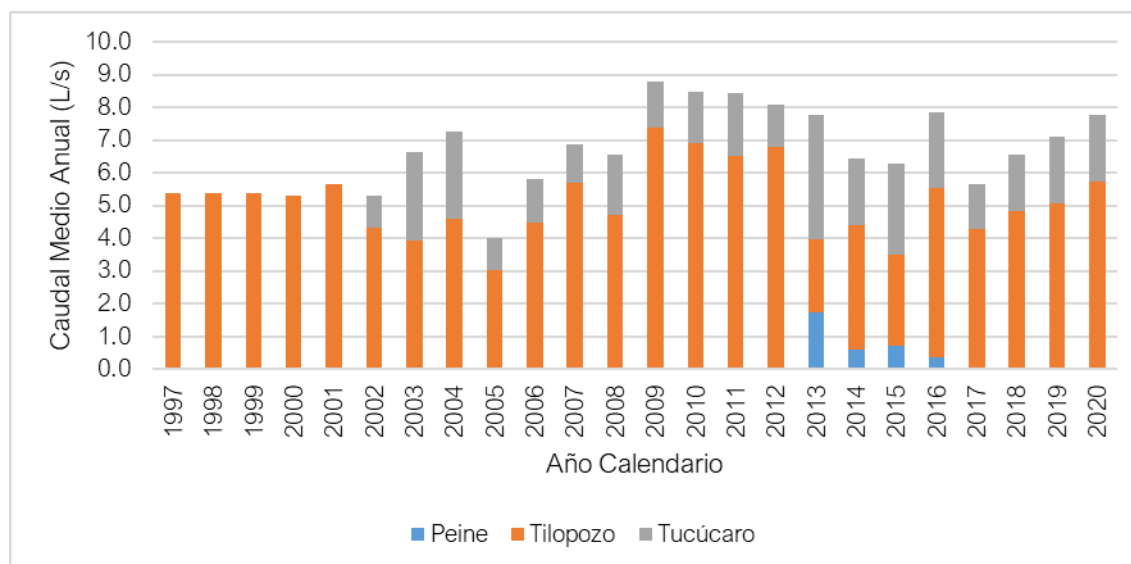
Figura 4-68 Ubicación pozos de agua Albemarle



Fuente: Hidroestudios, 2021.



Figura 4-69 Extracciones históricas de agua ALB



Fuente: Hidroestudios, 2021.

La Figura 4-69 muestra el caudal medio anual de agua extraído por ALB. El caudal medio es de 6,6 L/s.

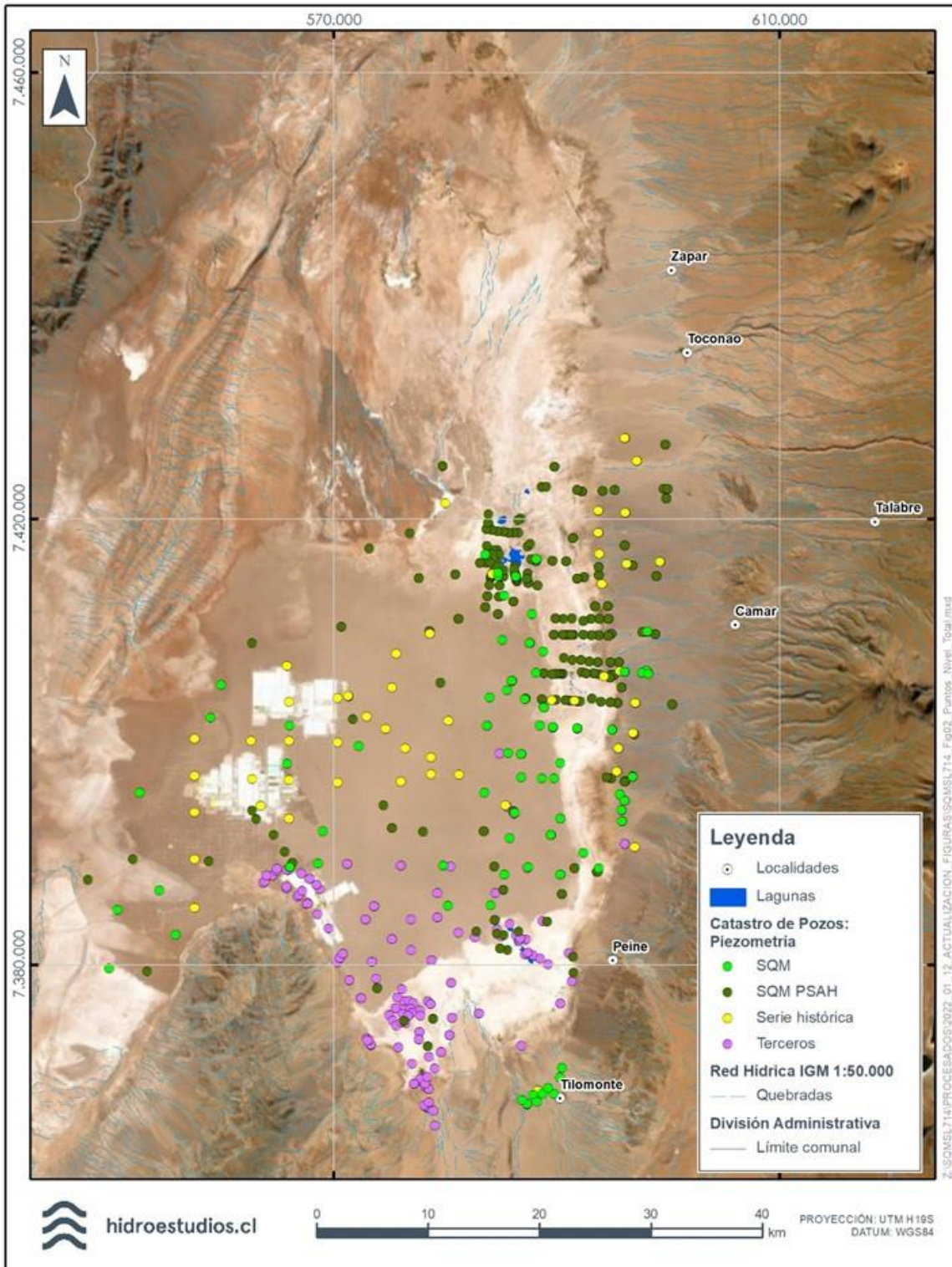
#### 4.3.7.5.1.3.5 Niveles de agua subterránea y piezometría

Como se mencionó en el acápite 4.3.7.4.1.3, se cuenta con un total de 519 puntos que poseen información de seguimiento de niveles piezométricos a lo largo del tiempo (Figura 4-70).

El origen de estos pozos corresponde fundamentalmente a los de la red del Plan de Seguimiento Ambiental (PSAH) y de monitoreo complementario de SQM. Adicionalmente, se presentan los pozos del plan de monitoreo ambiental de Albemarle, y datos de infraestructuras del registro histórico (eg. Hydrotechnica, 1987; MINSAL, 1988 y 1989).

Con el fin analizar el comportamiento de los niveles piezométricos a lo largo del tiempo, a continuación, se presenta la evolución de una serie de pozos representativos para los distintos tipos de fluidos.

Figura 4-70. Pozos con información de nivel piezométrico.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.7.5.1.3.5.1 Evolución histórica de niveles en el Sistema de Salmuera

Los pozos ubicados en el sector del núcleo del Salar de Atacama y habilitados en salmuera poseen un comportamiento que se caracterizan por presentar una tendencia a la baja durante todo el período de registro, variando sólo en su pendiente o tasa de descenso. También se caracterizan por presentar un comportamiento sensible a los eventos de precipitación directa sobre el núcleo del salar, respondiendo de forma inmediata a eventos significativos y recuperando la tendencia precedente al corto tiempo de haber ocurrido dichos eventos.

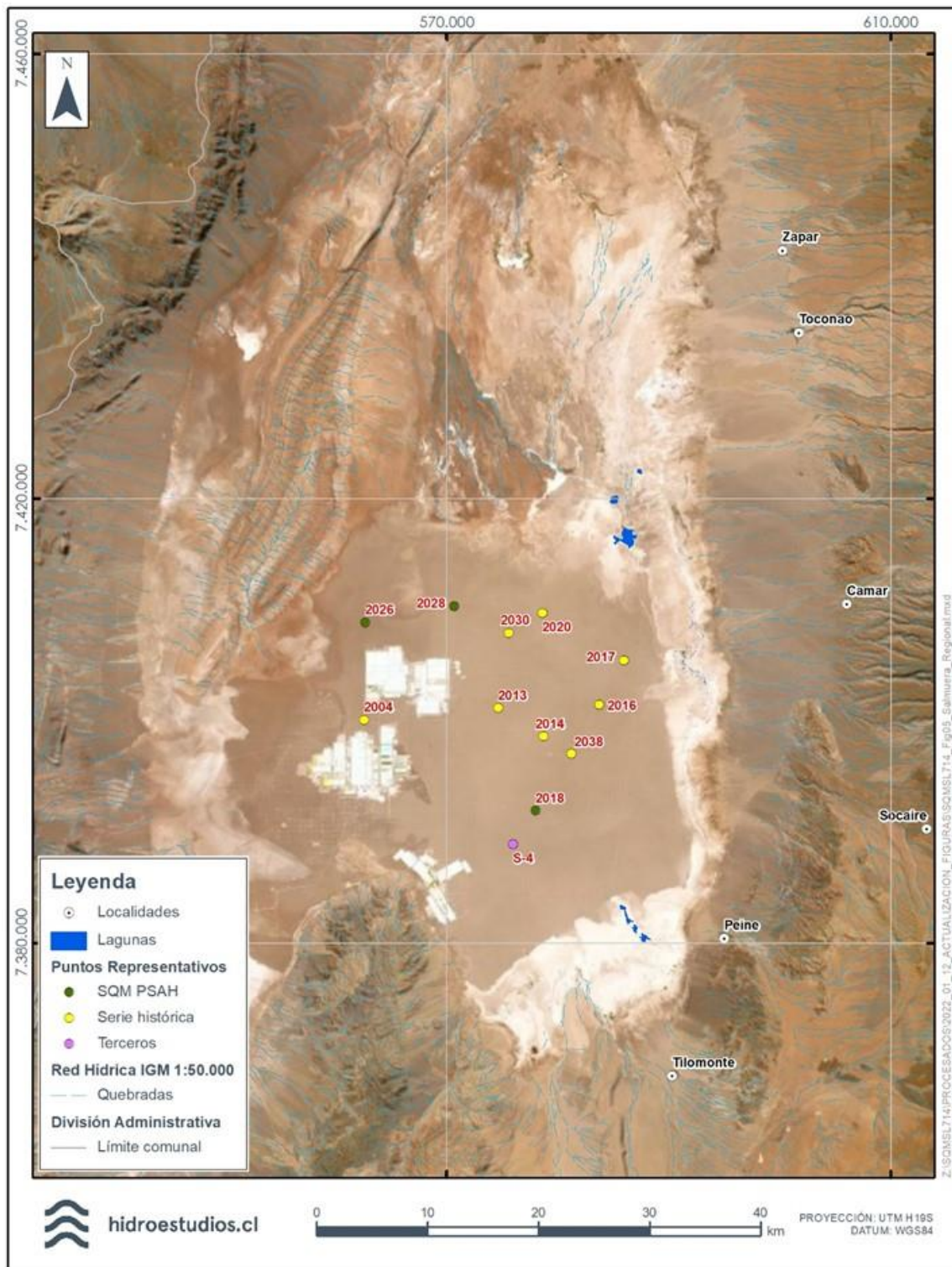
En la Figura 4-71 y Figura 4-72 se presenta la ubicación y series de nivel de pozos representativos del núcleo. Los 12 pozos incluidos se localizan en zonas del núcleo alejadas de los centros productores: sector norte y este. En esta figura también se incluyen los registros de precipitaciones desde el año 1997, pudiéndose observar la relación que existe entre eventos de precipitación y cambios de corto plazo en la tendencia de los niveles.

Durante el período preoperacional (1986 a 1994), en todos los pozos del núcleo se observa una tendencia a la baja, sin signos aparentes de eventos de precipitación. En este período, los niveles observados presentan un comportamiento oscilatorio estacional con una leve tendencia al descenso (-3,16 cm/año en promedio, con un rango entre -2 y -4 cm/año), presentando una oscilación promedio anual del orden de 6 cm. Los máximos locales se verifican en enero y febrero, mientras que los mínimos se dan en julio y agosto (Figura 4-72).

A partir del año 1994, cuando comienzan las operaciones de SQM (MINSAL en ese momento), se observa que las oscilaciones casi desaparecen y la pendiente del descenso de los niveles aumenta (-8,83 cm/año en promedio). Posteriormente, la tasa de descenso aumenta nuevamente, de forma leve, en el año 2001, cuando se aumentó el caudal de extracción de salmuera.

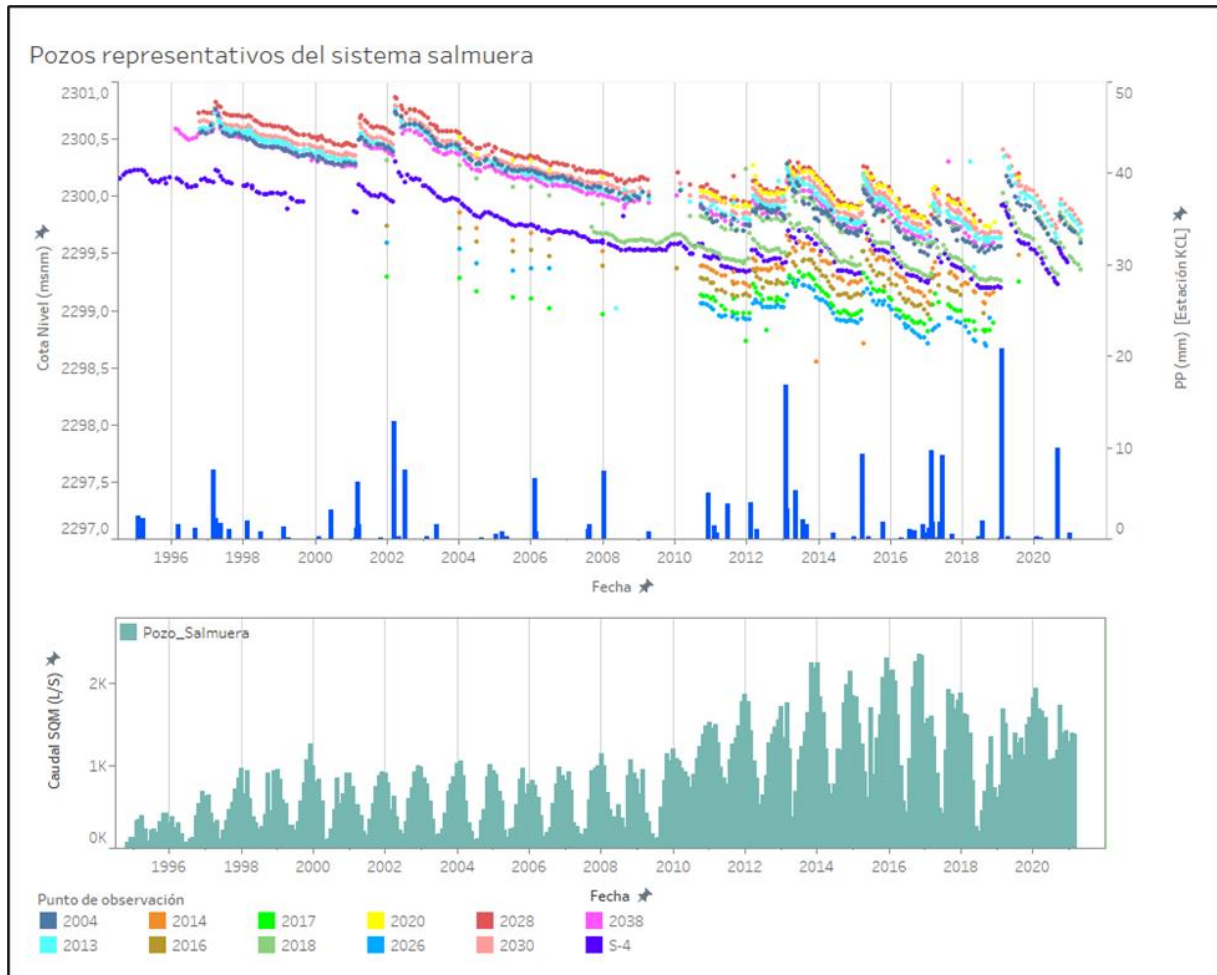


Figura 4-71. Ubicación puntos representativos sistema salmuera



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-72. Series de nivel en los puntos representativos del sistema salmuera, series de precipitación de la estación de KCL y caudales de bombeo salmuera SQM.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.7.5.1.3.5.2 Evolución histórica de niveles en el Sistema Agua

Existen diversos comportamientos de niveles en el sistema agua, dependiendo de la ubicación de los puntos de monitoreo analizados. Al igual que en el caso del Sistema Salmuera, se eligieron pozos representativos de estos comportamientos, con el fin de ejemplificar su evolución en el tiempo (Figura 4-73).

En el caso de los pozos ubicados en la zona marginal del salar de atacama (Figura 4-74), tienen la particularidad de reflejar principalmente la influencia estacional característica de la evaporación, debido a que los niveles en este sector se encuentran muy próximos a la superficie. De esta manera, es posible visualizar una ciclicidad producto de la estacionalidad de la evaporación durante el verano e invierno, a consecuencia de lo cual los niveles disminuyen y aumentan respectivamente.

Aunque la tendencia de las series mantiene los niveles en un mismo valor promedio a lo largo de todo su registro, mostrando de forma permanente la oscilación estacional antes descrita, se observa una leve tendencia a la

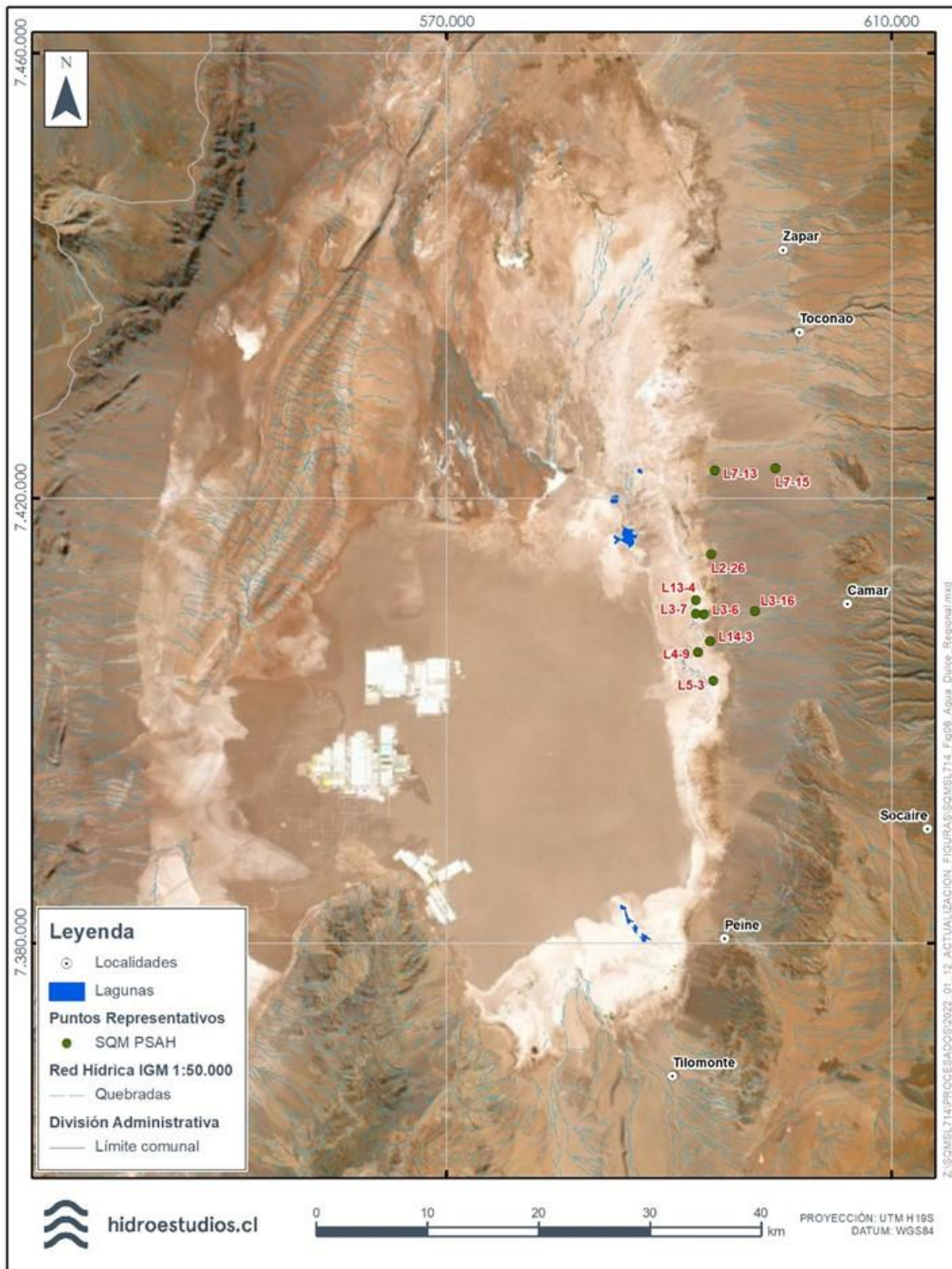


disminución en la amplitud de estas oscilaciones en algunos pozos (Figura 4-74). Adicionalmente se observa una tendencia al descenso en el pozo L5-3 y una leve tendencia al aumento en el pozo L14-3.

Por otro lado, los pozos más alejados del núcleo, ubicados en la planicie aluvial (Figura 4-75) se distinguen por mostrar una tendencia al descenso desde el comienzo de su registro, incluso antes que comenzara la operación de los pozos de agua (acápite 4.3.7.5.1.3.4.4). La tasa de descenso en este período se estima entre 1 y 2 cm/año, y era común a todos los pozos. Al comenzar la extracción de agua, la tasa aumentó hasta 10 cm/año con los 5 pozos en operación.

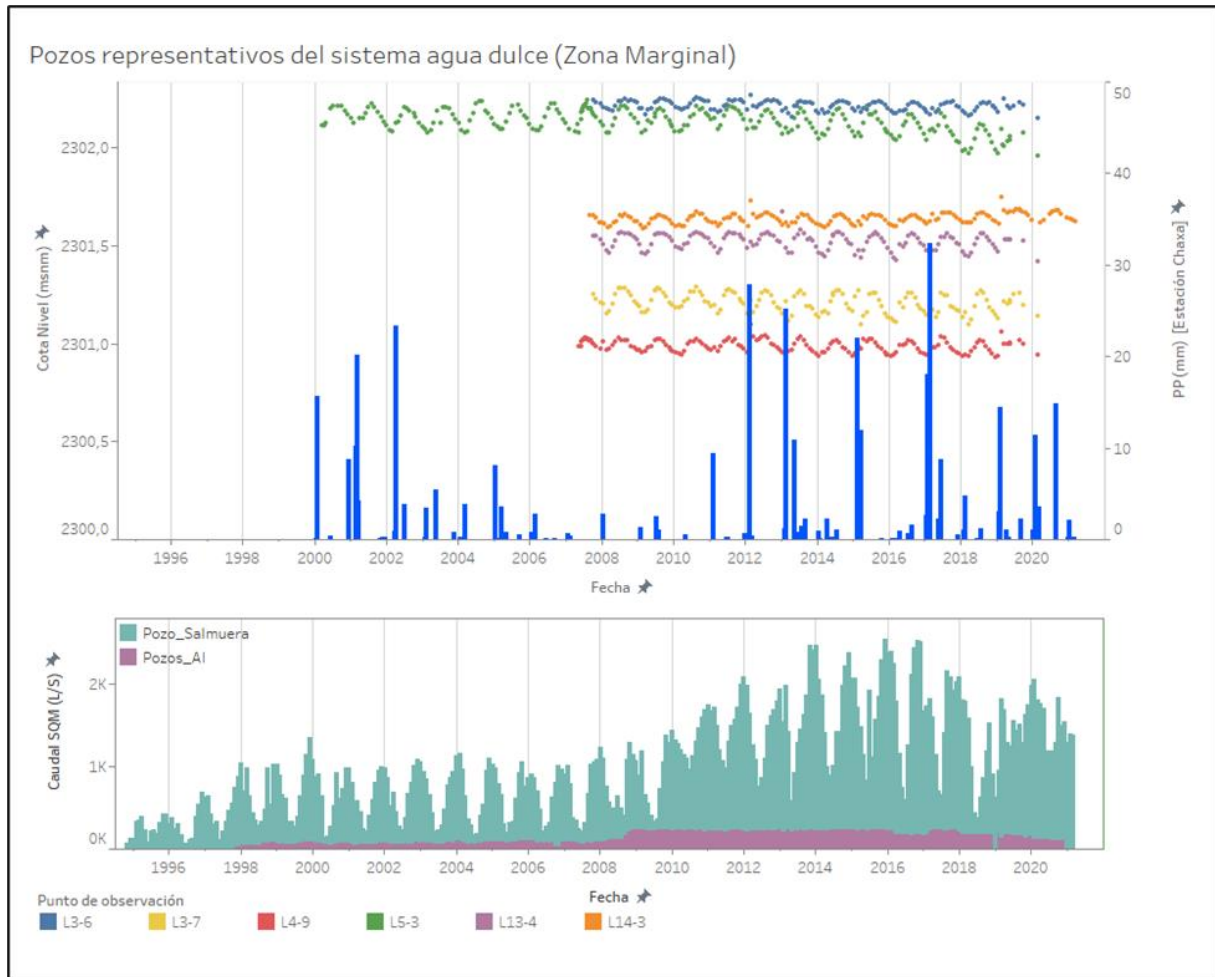
En general, los pozos ubicados en la planicie aluvial no presentan afecciones a estímulos inmediatos relacionados por eventos atmosféricos (precipitaciones o evaporación), debido especialmente a la mayor profundidad de los niveles en este sector (Figura 4-75).

Figura 4-73. Ubicación puntos representativos sistema agua.



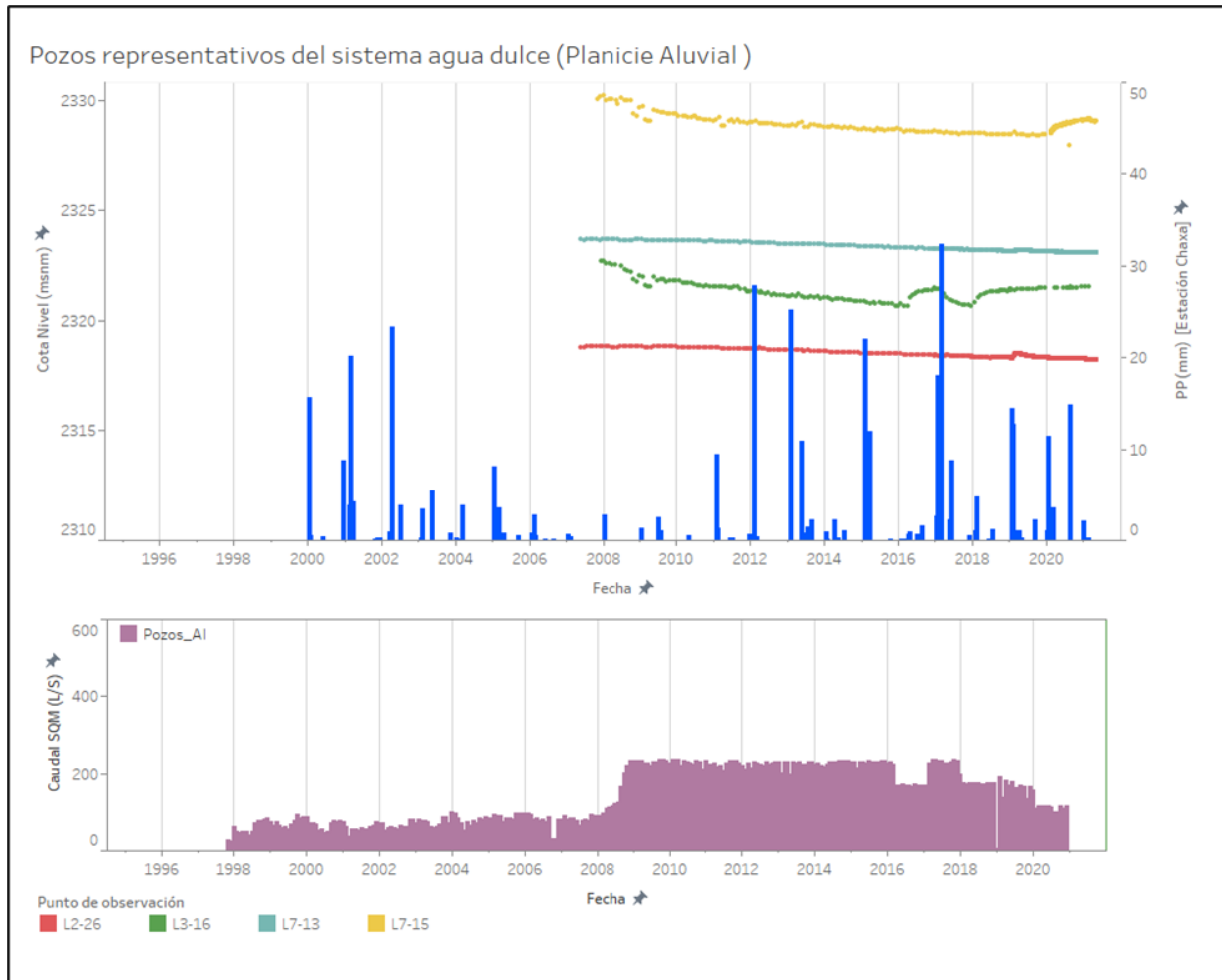
Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-74. Series de nivel puntos representativos sistema agua (Zona Marginal)



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-75. Ejemplo de pozos con comportamiento sistema agua (Planicie Aluvial)



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.7.5.1.3.5.3 Piezometría y direcciones flujo

Para el análisis de la piezometría y caracterización del gradiente hidráulico se debe tener en consideración que el sistema hidrogeológico de la cuenca del Salar de Atacama involucra la interacción que dos fluidos de distinta densidad: el acuífero aluvial (agua, densidad  $\sim 1,001 \text{ g/cm}^3$ ) y el reservorio del núcleo (salmuera, densidad  $\sim 1,223 \text{ g/cm}^3$ ). Por tanto, para poder analizar una piezometría que involucre a ambos fluidos, y poder comparar las diferencias de presiones entre ambos, es necesario realizar una corrección por densidad, llevando los niveles freáticos a una misma referencia.

Se debe tener en consideración que un determinado volumen de fluido con mayor densidad tiene más peso que un mismo volumen de otro fluido de menor densidad. Análogamente, dos fluidos de distinta densidad, pero igual masa, ocuparán un volumen distinto, siendo el de mayor densidad el que ocupe el menor volumen. Una manera simple de entender qué significa la corrección por densidad es considerando que, al corregir desde salmuera (ej.  $\rho_s = 1.22 \text{ g/cm}^3$ ) a agua dulce ( $\rho = 1.00 \text{ g/cm}^3$ ), se está evaluando cuánto volumen ocuparía dicha salmuera si, manteniendo su masa, disminuyera su densidad. En ese escenario, sus partículas se separarían respecto de su estado inicial y el volumen resultante sería, por supuesto, mayor. Sin embargo, dado que el contenedor de la salmuera -el acuífero o reservorio- tiene un volumen limitado, ocurrirá que la presión equivalente que se ejercería si el fluido fuese agua dulce sería más alta. Por lo tanto, el nivel piezométrico que se mediría, si fuese agua dulce, sería mayor. En resumen, al corregir por densidad hacia agua dulce, la presión (los niveles) de salmuera ascenderán respecto de su valor inicial, mientras que los niveles de agua dulce tenderán a mantenerse similares

Por ende, para poder realizar el análisis piezométrico, se presenta la piezometría corregida a salmuera. El detalle de la distribución de densidad y metodología utilizada para la corrección se presenta en el Anexo 5.1 Modelo hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama

Para la confección del mapa piezométrico se considera la información de distintas fuentes de datos que poseen algún registro de nivel. Estas fuentes son mayoritariamente internas (Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico -PSAH- y Monitoreo No Operativo), o de registros históricos: datos del trabajo de Hydrotechnica (1987), MINSAL (1988) y MINSAL (1989). Otras fuentes de datos corresponden a la información disponible de Albemarle (ALB) y Minera Escondida Limitada (MEL), del trabajo de Water Management (1993) y del trabajo de RIOCHILEX (1999). El detalle de los puntos de medición utilizados para realizar este análisis se presenta en los Apéndice F del Anexo 5.1 Modelo hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama

#### 4.3.7.5.1.3.5.3.1 Piezometría corregida por densidad a salmuera

Se construyeron mapas piezométricos con corrección por densidad para la etapa preoperacional (año 1986) y etapa operacional actual (año 2020). Los mapas piezométricos con corrección a salmuera para los años 1986, y 2020 se muestran en la Figura 4-76 y Figura 4-77, respectivamente. El detalle metodología utilizada para la corrección de la piezometría se presenta en el Anexo 5.1 Modelo hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama

En la piezometría corregida a salmuera, puede verse, de manera general, que existe un mínimo piezométrico en toda la zona marginal, especialmente marcado en la situación preoperacional de 1986. En dicho año se observa que, dentro del núcleo, los niveles piezométricos más altos se encuentran localizados aproximadamente en el límite del núcleo con el Cordón de Lila, especialmente en su costado oriental. El agua dulce, en tanto, fluye desde el norte, este y sureste en dirección hacia la zona marginal. El hecho de que la salmuera confluya hacia



la zona marginal es coherente con que esta zona sea donde se registran las máximas salidas por evaporación de la cuenca.

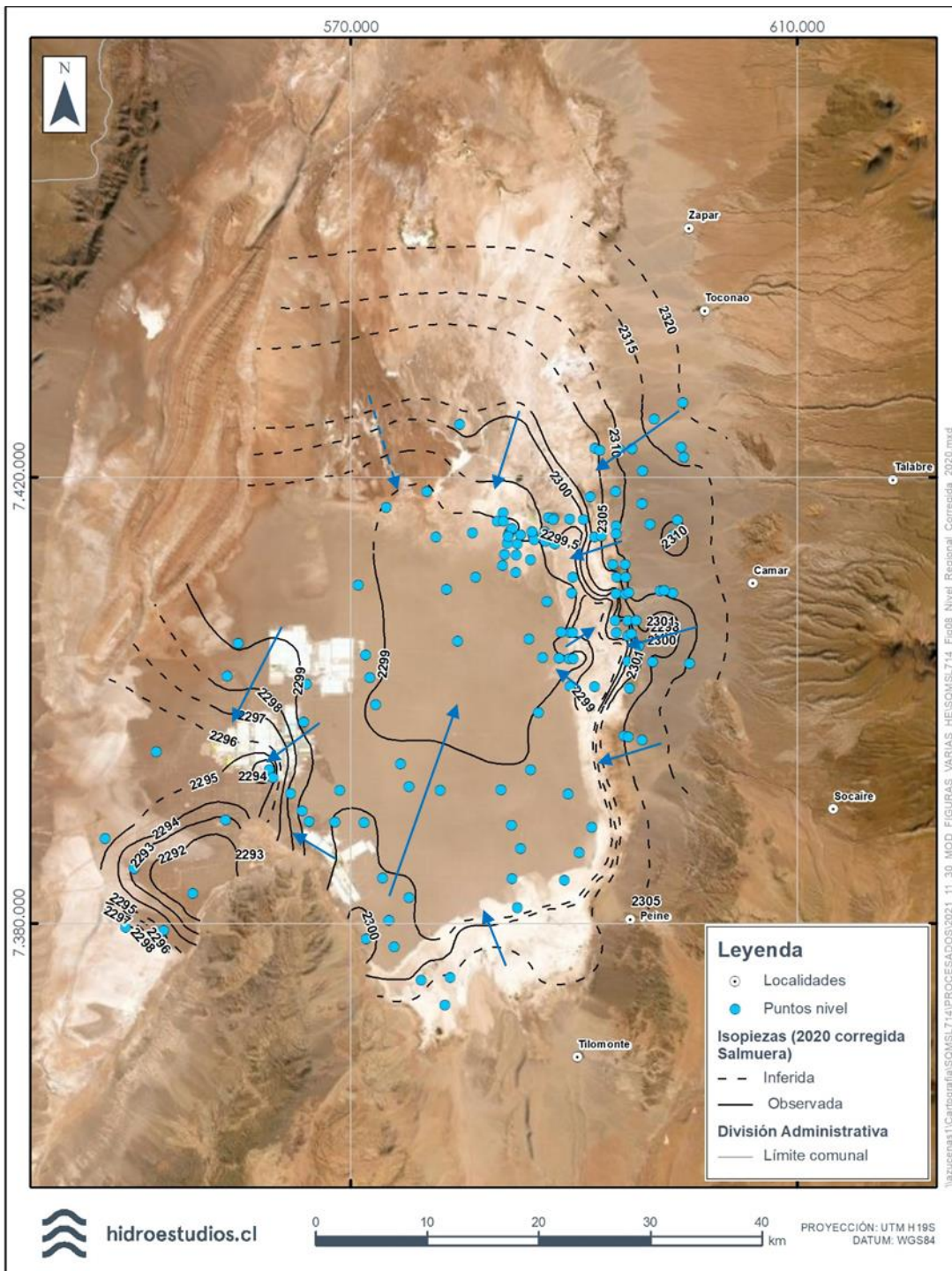
Por otro lado, para la piezometría del año 2020, se observa que la zona marginal sigue siendo la zona donde confluyen los flujos desde el bloque este, aunque no de forma tan marcada como en la etapa preoperacional. Para este año, además, se observa un mínimo piezométrico en el sector SW del bloque oeste del núcleo, debido al cono de bombeo generado por las operaciones de SQM. La existencia de este mínimo hace resaltar las zonas por donde existen potenciales aportes al Salar, mostrándose una recarga por el SW y otra por el ya mencionado borde oriental del Cordón de Lila.

Es interesante notar, en la piezometría del año 2020, que las operaciones de SQM están claramente marcadas al oeste de la Falla Cabeza de Caballo, la que se comporta como una barrera hidráulica para el cono de bombeo generado por las extracciones. Esta barrera podría implicar la existencia de alguna recarga no cuantificada por esta falla dentro del núcleo. Además, en la zona de contacto entre el Cordón de Lila, el núcleo del salar y la Falla Cabeza de Caballo, se observa un claro alto piezométrico, lo que sugiere que efectivamente esta falla es capaz de transmitir flujos, los que probablemente estén recargando al núcleo del Salar de Atacama.

Finalmente, haciendo una comparación entre las piezometrías de 1986 y 2020, es claro que las extracciones tanto de salmuera como de agua dulce han disminuido los niveles en el núcleo y en el acuífero aluvial. Sin embargo, dentro del núcleo los descensos en el bloque este alcanza aproximadamente 1m, mientras que al oeste de Falla Cabeza de Caballo se observan descensos de 8m. En el acuífero aluvial, en tanto, se aprecian claramente los conos de descenso de los pozos de agua.



Figura 4-77. Piezometría corregida por densidad para diciembre de 2020. Corrección realizada a salmuera (1,23 g/mL).



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.7.5.1.3.5.4 Unidades Hidrogeológicas

Considerando la información presentada en los capítulos previos, se han definido las unidades hidrogeológicas (UH) regionales presentes en la zona<sup>3</sup>. Esto se realizó agrupando aquellas unidades geológicas que se encuentren en contacto, que posean un rango similar de parámetros hidráulicos (K y S), y que presenten un comportamiento hidráulico similar (por ejemplo, tipo de acuífero libre o confinado). Así, para el Salar de Atacama se han definido 8 unidades hidrogeológicas (UH) regionales, de las cuales una de ellas se ha subdividido en dos (Unidad Hidrogeológica Aluvial Superior de Alto y de Medio potencial).

La distribución en planta de las UH que se observan en superficie se muestra en la Figura 4-78. Además, en la Figura 4-79 y la Figura 4-80 se muestra la disposición de estas unidades en profundidad, mientras que la Figura 4-81 muestra los parámetros hidráulicos obtenidos a partir de la interpretación de pruebas hidráulicas. Finalmente, la Tabla 4-33 muestra un resumen de cada UH con sus rangos estimados de K y S.

En general, el funcionamiento hidrogeológico del núcleo del Salar de Atacama está fuertemente condicionado por la presencia de los sistemas de fallas Salar y Caballo, las que alzan el bloque oeste respecto del bloque este, generando un gran depocentro en este último. Esto explica la gran potencia de evaporitas observada en el bloque este comparado con el oeste, que impacta directamente en el volumen de salmuera almacenada en el Salar de Atacama. Las unidades hidrogeológicas definidas se describen a continuación:

- Unidad Hidrogeológica Núcleo Superior

Corresponde a la unidad más somera ubicada en el núcleo del Salar de Atacama, y está compuesta principalmente por la unidad geológica Cloruros (halita porosa, pura o con sedimentos) del núcleo. Se extiende lateralmente en todo el núcleo del Salar, con una potencia que fluctúa entre 15 y 45 m, siendo mayor al este de la Falla Salar (Figura 4-78). Por información de pruebas hidráulicas se le ha asignado un rango de K entre 0,01 y 40.000 m/día, y un rango de almacenamiento (S) entre 0,1 y 15%; la presencia de cavernas en algunas zonas de esta unidad, especialmente en los primeros metros cercanos a la superficie, aumenta abruptamente tanto la conductividad hidráulica como el almacenamiento de manera local. Esta unidad se comporta como un acuífero libre.

Su techo está en superficie, y su base está limitada por la UH Núcleo Intermedio. Lateralmente se encuentra en contacto con la UH Zona Marginal en su margen este, sureste y noreste, con la UH Zona de Transición Este en su margen norte, mientras que por el oeste y por el sur se encuentra en contacto tanto con el Basamento Hidrogeológico y en parte con la UH Aluvial Superior.

---

<sup>3</sup> Unidad Hidrogeológica: Cualquier unidad de roca o suelo, o zona en general, que por sus propiedades hidráulicas generan una influencia distintiva en el almacenamiento y/o movimiento del agua subterránea. Fuente: traducido de USGS ([https://or.water.usgs.gov/projs\\_dir/willgw/glossary.html](https://or.water.usgs.gov/projs_dir/willgw/glossary.html)).



- Unidad Hidrogeológica Núcleo Intermedio

Corresponde a una unidad intermedia del núcleo del Salar de Atacama, compuesta por la unidad geológica Evaporitas con materia orgánica (halitas y yesos con materia orgánica). Se extiende en todo el núcleo, y tiene una potencia estimada entre 1 y 5 m en el bloque oeste, aumentando hasta 100-150 m en el bloque este, especialmente en la zona cercana a la zona marginal de todo el Salar. Al igual que la UH Núcleo Superior, se extiende lateralmente en todo el núcleo. Con base en pruebas hidráulicas se le ha asignado un rango de K entre  $6 \times 10^{-4}$  y 2 m/día. Para el S, se le ha asignado, con base en valores de literatura (ver capítulo 4.3.7.5.1.2), un rango entre 0,1% y 10%. Se comporta como un acuitardo, confinando parcial a totalmente a la UH Núcleo Profundo.

Su techo corresponde a la UH Núcleo Superior y en parte a la UH Zona de Transición Este, mientras que su base corresponde a la UH Núcleo Profundo. Análogo a la UH Núcleo Superior, lateralmente se encuentra en contacto con la UH Zona Marginal (bordes E, SE y NE), y con el Basamento Hidrogeológico y UH Aluvial Superior (bordes oeste y sur).

- Unidad Hidrogeológica Núcleo Profundo

Corresponde a la unidad hidrogeológica más profunda del presente modelo del núcleo del Salar de Atacama, compuesta por la unidad geológica de Cloruros inferiores (halitas muy poco porosas). Se extiende en todo el núcleo, y tiene una potencia estimada entre 20 y 50 m en el bloque oeste y 300 m en el bloque este del núcleo. Con base en pruebas hidráulicas, complementada con información de literatura, se la asignado un rango de K entre  $2 \times 10^{-3}$  y 120 m/día, y un rango de S entre  $1 \times 10^{-6}$  y  $5 \times 10^{-3}$ .

Su techo corresponde a la UH Núcleo intermedio (y pequeñas zonas a la UH Núcleo Superior), mientras que su base corresponde al Basamento Hidrogeológico; particularmente, en su base ha sido identificada una unidad de tobas y tufitas que son reconocibles prácticamente en todo el sector del núcleo, en la zona marginal, y en los depósitos aluviales, y que se correlaciona con la unidad geológica Depósitos ignimbríticos del Mioceno al presente.

Análogo a las otras UH del núcleo, lateralmente engrana con la UH Zona Marginal (bordes este, sureste y norte), y con el Basamento Hidrogeológico y UH Aluvial superior (bordes oeste y sur; relación esquemática en Figura 4-43 y en secciones de unidades hidrogeológicas del presente informe, por ejemplo Figura 4-79 y la Figura 4-80).

Considerando el almacenamiento calculado, la relación geológica e hidrogeológica con el entorno y el análisis de los gráficos diagnóstico de las pruebas de bombeo realizadas en esta unidad, se infiere que esta unidad se comporta hidráulicamente como acuífero confinado.

- Unidad Hidrogeológica Zona Marginal

Corresponde a la unidad hidrogeológica que engloba la mayor parte de los depósitos evaporíticos localizados en la zona marginal del Salar de Atacama (unidades geológicas Sulfatos y Carbonatos que se observan en los bordes noreste, este, y sureste del Salar), intercalados con depósitos sedimentarios detríticos de grano fino (arcillas y limos) y materia orgánica, dispuestos en su mayoría en capas de poco espesor y/o lenticulares. Su extensión lateral es acotada en el borde este (sector Quelana), entre 4 y 7 km, más ancha en el borde sureste (sectores Peine y Tilopozo), entre 4 y 9 km de ancho, mientras que en el borde norte del Salar tiene una extensión mucho mayor, alcanzando en planta de más de 10 km.



Lateralmente está engranando completamente con las UH del núcleo, por lo que su base corresponde al Basamento Hidrogeológico. También engrana lateralmente con la UH Zona de Transición Este en la zona norte del núcleo, mientras que su techo corresponde a la actual superficie. Se ha estimado un espesor mínimo de 100 m, pudiendo llegar a los 200 m en el borde este y algunas zonas del borde norte. Por información de pruebas hidráulicas, complementadas con datos de literatura, se le ha asignado un rango de K entre  $1 \times 10^{-3}$  y 10 m/día, y un rango de S entre  $3 \times 10^{-6}$  y 0,2; este rango de almacenamiento se explica por la gran cantidad de intercalaciones de sedimentos finos, resultando en el confinamiento parcial de esta unidad. En general, las pruebas hidráulicas que arrojan mayor conductividad hidráulica han sido en pozos cortos (menor a 5m de profundidad), lo que da cuenta de procesos de karstificación cercanos a la superficie, probablemente por la infiltración de fluidos de menor salinidad que disuelven evaporitas superficiales.

#### 1. Unidad Hidrogeológica Zona de Transición Este

Unidad Hidrogeológica definida sólo en la zona norte del núcleo. Corresponde a una alternancia entre capas sulfatadas y cloruradas, además de sedimentos clásticos de grano fino. Por ende, es básicamente producto del engranaje existente entre la unidad geológica cloruros superiores, las unidades evaporíticas sulfatadas, y depósitos clásticos de grano fino producto de inundaciones intermitentes del sistema lagunar de Soncor y del Delta del río San Pedro.

Limita por el oeste con el Delta San Pedro, por el sur con la UH Núcleo Superior, y por el este y norte con la UH Zona Marginal. Tiene una potencia entre 20 y 30 m, siendo más potente hacia su límite sur. Su techo es la actual superficie de erosión, y su base corresponde a la UH Núcleo Intermedio.

Es una unidad altamente heterogénea, y como tal, su rango de parámetros hidráulicos es amplio. Esto, ya que prácticamente corresponde a una mezcla entre la UH Núcleo Superior y la UH Zona Marginal. Esto explica el amplio rango de K y S que arrojan las pruebas hidráulicas localizadas en este sector. Es en esta unidad y en la zona marginal, donde se desarrollan la mayoría de los lentes discretos de sedimento fino. Por todo lo anterior, tiene un rango de K entre  $1 \times 10^{-3}$  y 40000 m/día, y un rango de S entre  $3 \times 10^{-6}$  y 0,4. Hacia su zona sur se espera que presente K más elevadas, debido a la presencia de cavernas en su tramo más somero (karstificación cerca de la superficie, lo que también explica su alta cota superior de coeficiente de almacenamiento), mientras que hacia el norte se espera que su K disminuya drásticamente, debido al aumento de capas detríticas más finas producto del sistema lagunar de Soncor y de depósitos del Delta San Pedro.

#### 2. Unidad Hidrogeológica Aluvial

Corresponde a la unidad hidrogeológica que alberga el agua dulce en las zonas aluviales. Está compuesta por facies detríticas (unidad geológica Depósitos no consolidados) dispuestas en forma granodecreciente desde los bordes del área hacia el Salar de Atacama, desde gravas hasta arenas finas y limos. Se extiende prácticamente en todos los bordes del Salar de Atacama, con una potencia estimada desde 25 hasta 300 m.

En el borde oriental del Salar es donde se tiene más información sobre esta unidad (geológica, hidráulica, niveles, química e isotópica), definiéndose allí como de “alto potencial” y comportándose como una clásica unidad sedimentaria aluvial. En este sector, lateralmente engrana con la UH Zona Marginal, mientras que su techo y base corresponde a la actual superficie y al Basamento Hidrogeológico, respectivamente.

En contraste, en el borde occidental, debido a la falta de información hidráulica y de niveles, se le ha asignado un “medio potencial”. Esta porción de “medio potencial” abarca principalmente la zona al oeste de la Cordillera

de la Sal (Llano de la Paciencia hacia el sur) y los abanicos aluviales y coluviales inmediatamente al este de la Cordillera de la Sal, al norte del núcleo. En esta última se presenta, localmente, como depósitos superficiales de poco espesor, y se apoya directamente sobre la UH Núcleo Superior.

Por otro lado, y también en el borde oriental del salar, en esta unidad se observa el nivel de tobas y tufitas que define la base de la UH Núcleo Profundo. Esta unidad volcánica atraviesa completamente a la UH Aluvial, por lo que esta última se podría subdividir en una porción superior y otra inferior, produciendo un confinamiento total a parcial en la porción inferior de la UH Aluvial.

Por información de pruebas hidráulicas complementadas con datos de literatura se le ha asignado un rango de conductividad hidráulica entre 1 m/d y 100 m/d, y un rango de almacenamiento entre 1% y 25%. Este rango aplica principalmente a los primeros 100 m de profundidad desde la superficie, que es la zona en la cual se cuenta con pruebas hidráulicas; además, por procesos de compactación, es esperable que, a mayor profundidad, su conductividad hidráulica sea mucho menor. Cabe destacar que, a medida que la unidad se acerca a la zona marginal, su conductividad hidráulica tiende a disminuir, debido al aumento en la proporción de sedimentos clásticos de grano fino, correspondiente a los depósitos distales de los abanicos aluviales.

- Delta San Pedro

Corresponde a la unidad hidrogeológica conformada por los depósitos de delta del Río San Pedro, en el borde norte del núcleo del Salar de Atacama. Está compuesto de sedimentos finos (limos y arcillas) en profundidad, con una potencia mínima de 100 m. Su base son las UH Núcleo Intermedio y UH Núcleo Profundo, y su techo es la actual superficie. Lateralmente engrana con la UH Aluvial en el borde noroeste, con la UH Zona de Transición Este por el sur y este, y con la UH Zona Marginal por el norte. Pruebas hidráulicas indican una K de entre  $8 \times 10^{-5}$  y  $4 \times 10^{-4}$  m/día, siendo una unidad muy poco transmisiva. Según datos de literatura, se le ha asignado un rango de S entre  $1 \times 10^{-4}$  y  $1 \times 10^{-2}$ .

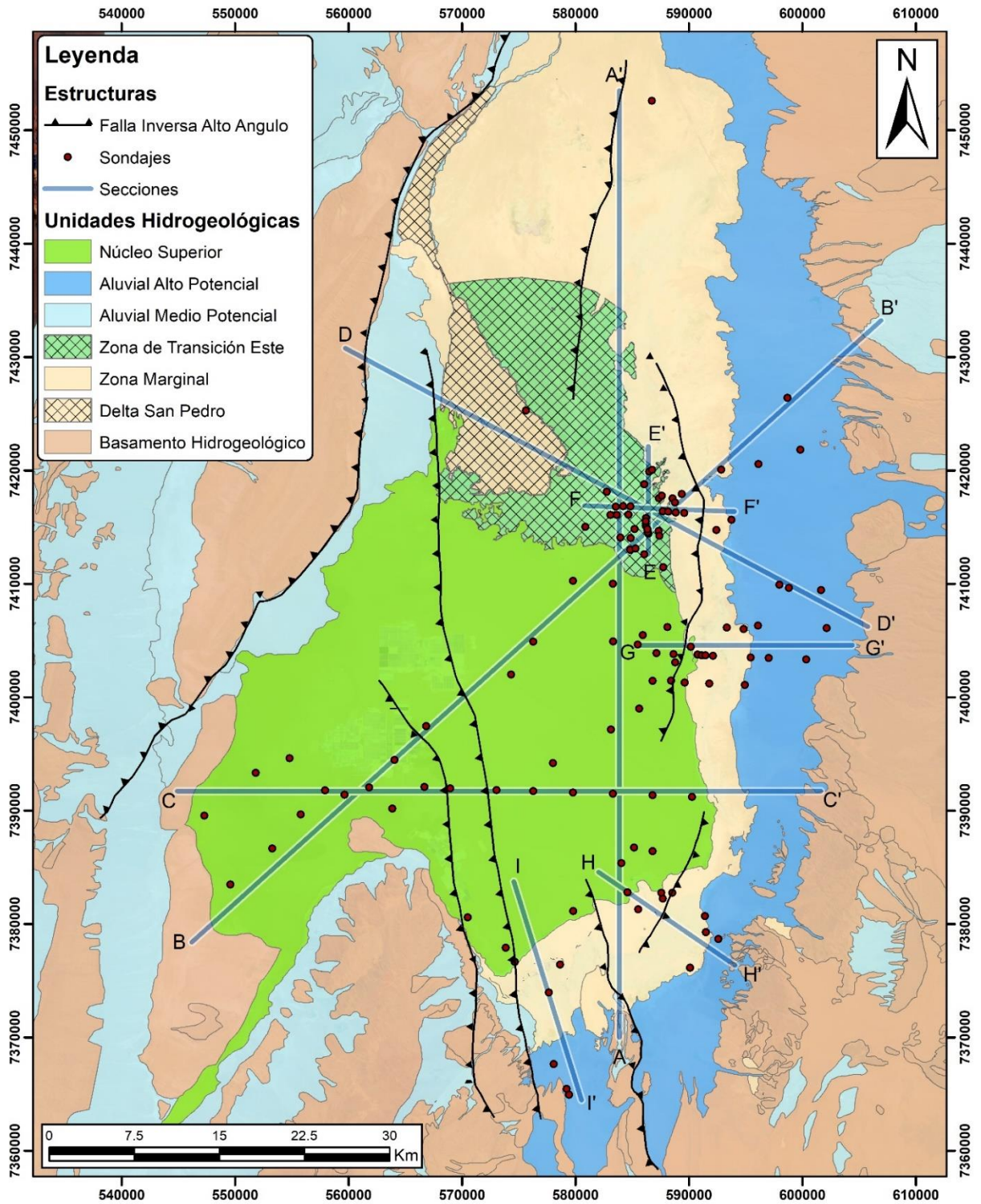
- Basamento Hidrogeológico

El Basamento Hidrogeológico comprende todas las unidades geológicas localizadas bajo la unidad geológica Depósitos ignimbríticos del Mioceno al presente. En el bloque oeste del núcleo, esta unidad se observa a los 60-80 m de profundidad, mientras que en el bloque este se observa entre 100 y 400 m de profundidad. Esta profundidad disminuye progresivamente desde la zona marginal (200m) hacia los depósitos no consolidados aluviales.

Si bien bajo esta capa de ignimbritas se han reconocido algunas facies evaporíticas (especialmente en el bloque este), no se consideran relevantes para explicar el funcionamiento hidrogeológico del sistema ya que los antecedentes disponibles no indican una conexión con los niveles superiores.

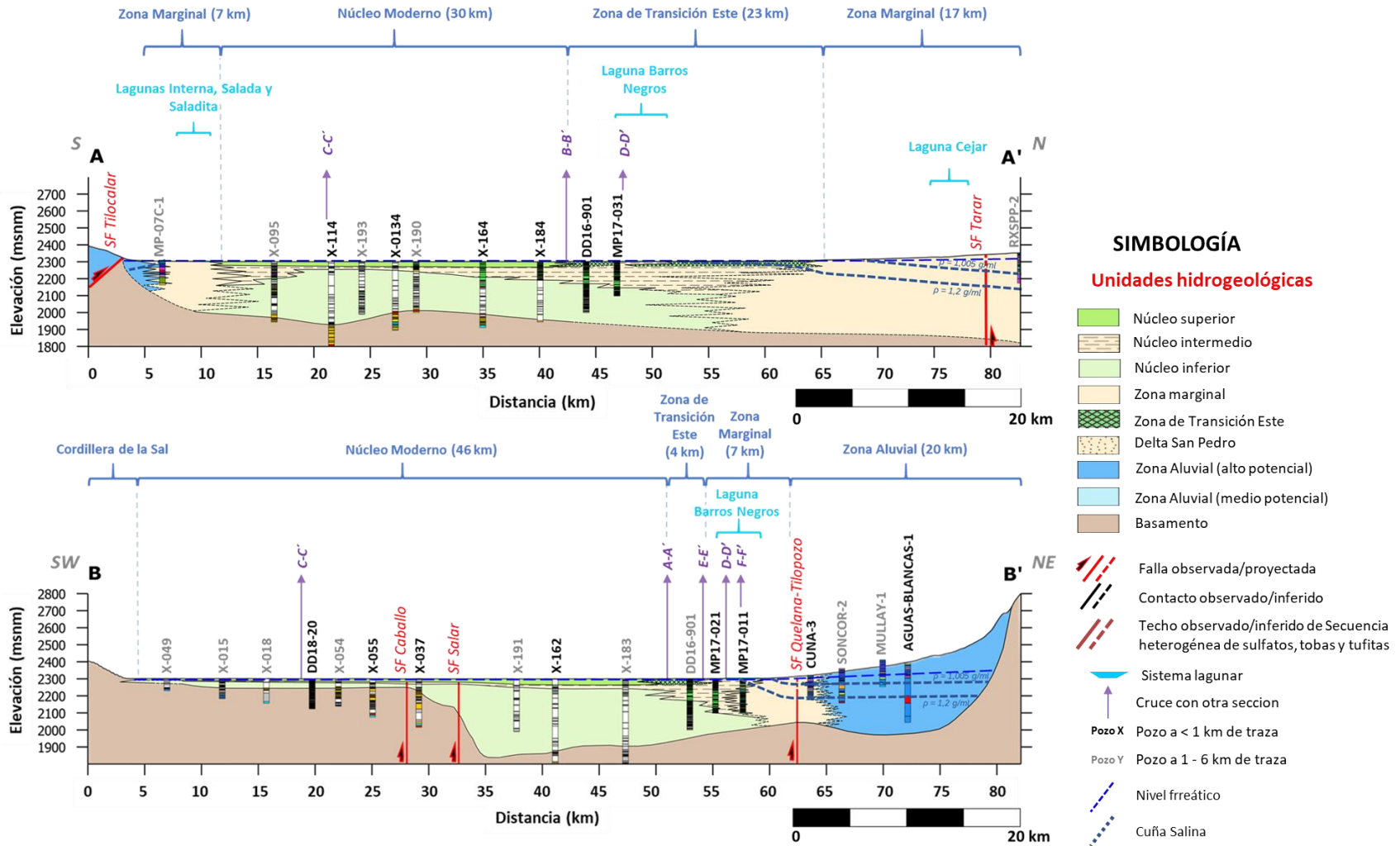
La geometría de cada una de las unidades hidrogeológicas descritas ha sido representada en un modelo 3D hidrogeológico (utilizando el software Leapfrog Geo). Este modelo comprende gran parte de los sondajes que SQM ha perforado en el sector, además de información geofísica levantada en la cuenca. Este modelo 3D se ha utilizado como base para el modelo numérico regional realizado en la cuenca del Salar de Atacama.

Figura 4-78. Mapa de unidades hidrogeológicas de la cuenca del Salar de Atacama. Se incluyen aquellos sondeos utilizados para la construcción de las secciones hidrogeológicas y las trazas en planta de dichas secciones.



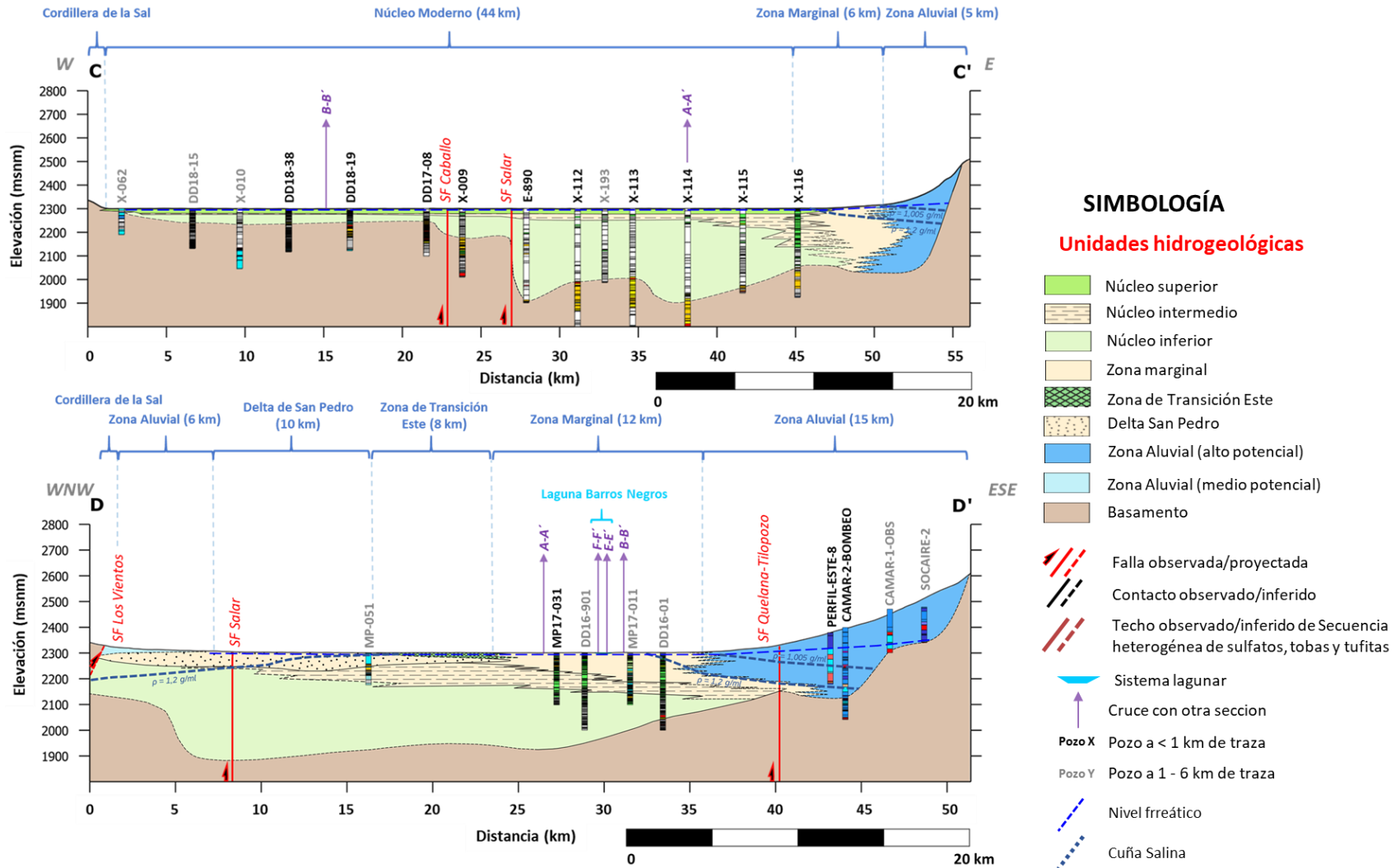
Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-79. Secciones hidrogeológicas regionales A-A' y B-B'. Trazas de las secciones en Figura 4-78.



Fuente: SQM, 2021.

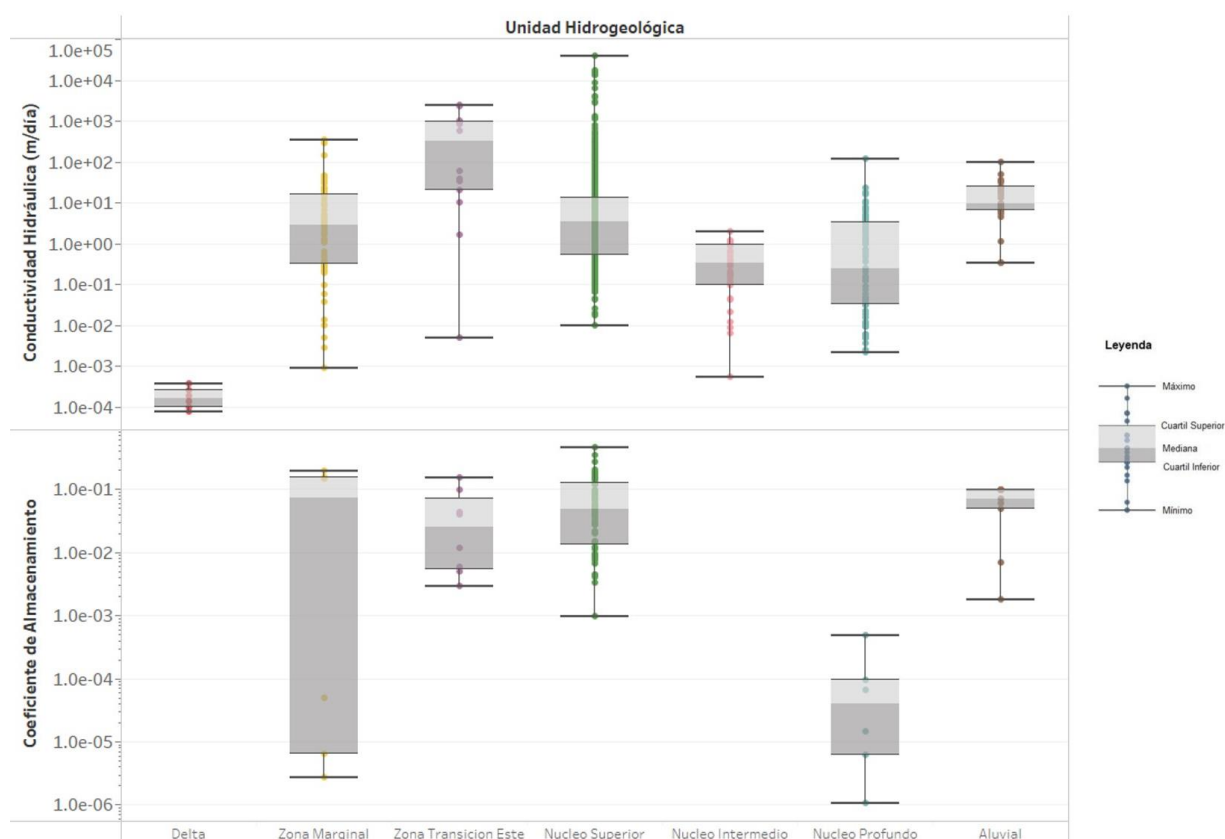
Figura 4-80. Secciones hidrogeológicas regionales C-C' y D-D'. Trazas de las secciones en Figura 4-78.



Fuente: SQM, 2021.



Figura 4-81. Diagrama de Caja y Bigotes de conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento de unidades hidrogeológicas. Datos obtenidos a partir de mediciones de SQM.



Fuente: SQM, 2021.

Tabla 4-33. Parámetros hidráulicos por unidad hidrogeológica. Se incluyen datos de SQM y antecedentes de terceros.

Unidad Hidrogeológica	Unidad Geológica Asociada	Conductividad Hidráulica (m/día)		Coeficiente de Almacenamiento	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Aluvial	Depósitos No Consolidados	0,1	100	1x10-3	0,25
Núcleo Profundo	Cloruros Inferiores	2x10-3	120	1x10-6	5x10-3
Núcleo Intermedio	Evaporitas con Materia Orgánica	6x10-4	5	1x10-3	0,1
Núcleo Superior	Cloruros Superiores	0,01	40.000	1x10-3	0,4
Delta San Pedro	Delta San Pedro	8x10-5	4x10-4	1x10-4	0,01

Tabla 4-33. Parámetros hidráulicos por unidad hidrogeológica. Se incluyen datos de SQM y antecedentes de terceros.

Zona Transición Este	Sulfatos, Sulfatos con limos, Cloruros Superiores	1x10 <sup>-3</sup>	40.000	3x10 <sup>-6</sup>	0,4
Zona Marginal	Sulfatos, Sulfatos con Limos, Carbonatos con Limos	1x10 <sup>-3</sup>	10	3x10 <sup>-6</sup>	0,2

Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.3.6 Balance Hídrico

El balance hídrico es una herramienta que permite representar y cuantificar los principales procesos del ciclo hidrológico que operan sobre un sistema, dentro de un período de tiempo dado, incorporando principios de continuidad de masa (Davie, 2008). Si bien existen numerosas formas de representar la ecuación del balance hídrico, a continuación, se muestra en su forma más fundamental:

$$\text{Recargas (R)} - \text{Descargas (D)} = \text{Variación Almacenamiento } (\Delta S) \pm \text{error (e)}$$

Cabe señalar que tanto las recargas como las descargas pueden ser de origen natural o antrópico, donde en este caso, las recargas son generadas a partir de la infiltración de las precipitaciones, la escorrentía y de la reinyección asociada a la operación de SQM, mientras que las descargas corresponden a las salidas por evaporación desde el suelo, desde lámina libre, evapotranspiración y las extracciones realizadas por los distintos actores presentes en la cuenca.

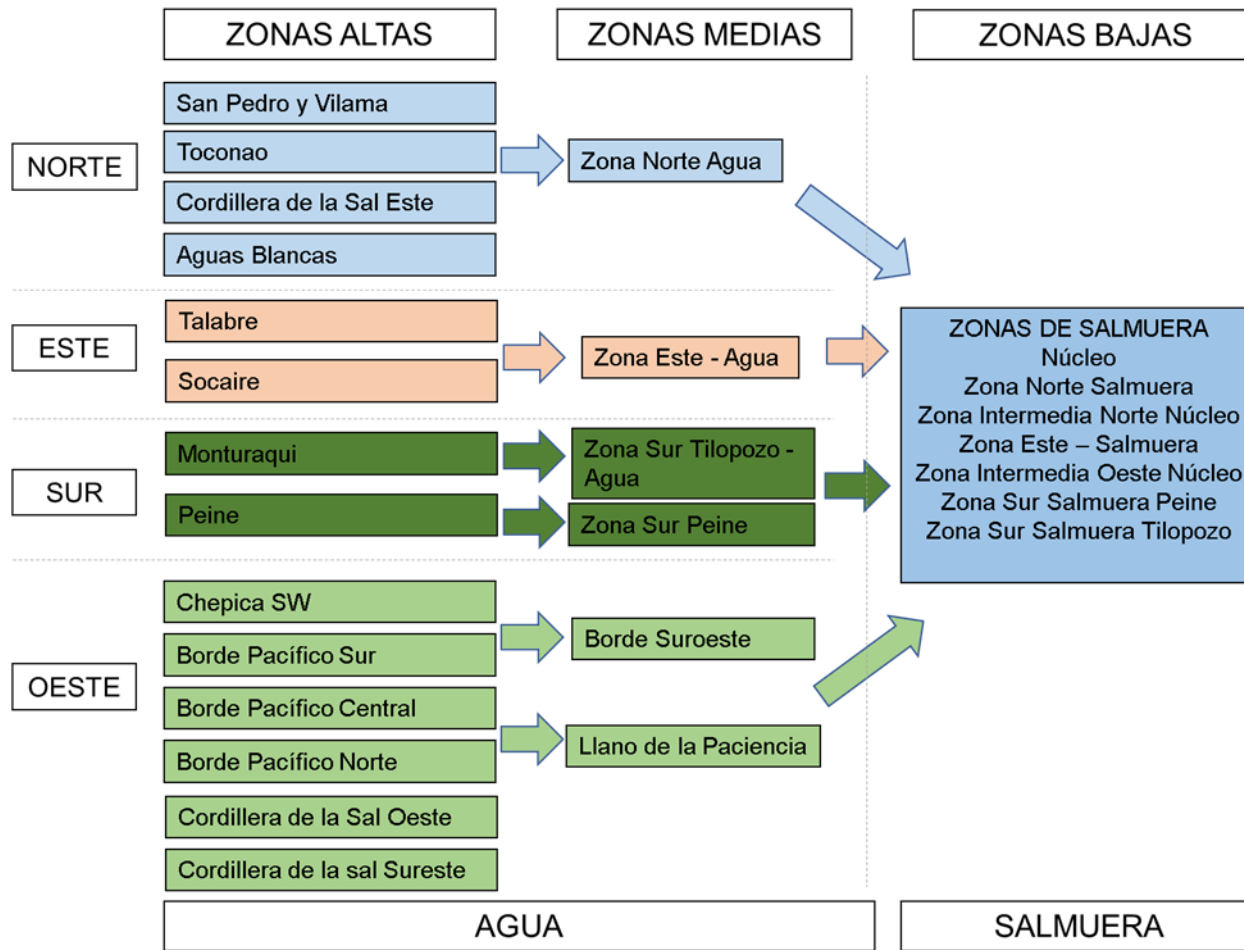
Para la estimación del balance hídrico, la cuenca del Salar de Atacama se divide en zonas de balance, las cuales son agrupadas en función de los siguientes criterios (Tabla 4-34, Figura 4-82 y Figura 4-83): (1) posición geográfica, entre zonas norte, sur, este y oeste; (2) altitud, entre zonas altas, medias y bajas; y (3) tipo de fluido analizado, el cual puede ser agua o salmuera. Cabe señalar que el balance considera las principales entradas y salidas del sistema, incluyendo el traspaso de caudal desde las zonas más altas a las más bajas de la cuenca.

Tabla 5 10: Zonas de balance de agua y salmuera utilizadas.

Sector	Clasificación según altitud	Nombre zona	Tipo de fluido
Este	Alta	Socaire	Agua
Este	Alta	Talabre	Agua
Este	Media	Zona Este- Agua	Agua
Este	Baja	Zona Este- Salmuera	Salmuera
Norte	Alta	Aguas Blancas	Agua
Norte	Alta	Cordillera de la Sal Este	Agua
Norte	Alta	San Pedro y Vilama	Agua
Norte	Alta	Toconao	Agua
Norte	Media	Zona Norte- Agua	Agua
Norte	Baja	Zona Norte- Salmuera	Salmuera
Núcleo	Baja	Núcleo	Salmuera
Núcleo	Baja	Zona Intermedia Norte Núcleo	Salmuera
Núcleo	Baja	Zona Intermedia Oeste Núcleo	Salmuera
Oeste	Alta	Borde Pacífico Central	Agua
Oeste	Alta	Borde Pacífico Norte	Agua
Oeste	Alta	Borde Pacífico Sur	Agua
Oeste	Media	Borde Suroeste	Agua
Oeste	Alta	Chépica SW	Agua
Oeste	Alta	Cordillera de la Sal Oeste	Agua
Oeste	Media	Cordillera de la Sal Sureste	Agua
Oeste	Media	Llano de la Paciencia	Agua
Sur	Media	Chépica Norte	Agua
Sur	Alta	Monturaqui	Agua
Sur	Alta	Peine	Agua
Sur	Media	Zona Sureste-Peine- Agua	Agua
Sur	Baja	Zona Sureste-Peine- Salmuera	Salmuera
Sur	Media	Zona Sureste-Tilopozo- Agua	Agua
Sur	Baja	Zona Sureste-Tilopozo- Salmuera	Salmuera

Fuente: SRK Consulting, 2020

Figura 4-82: Esquema de flujo entre zonas de balance.

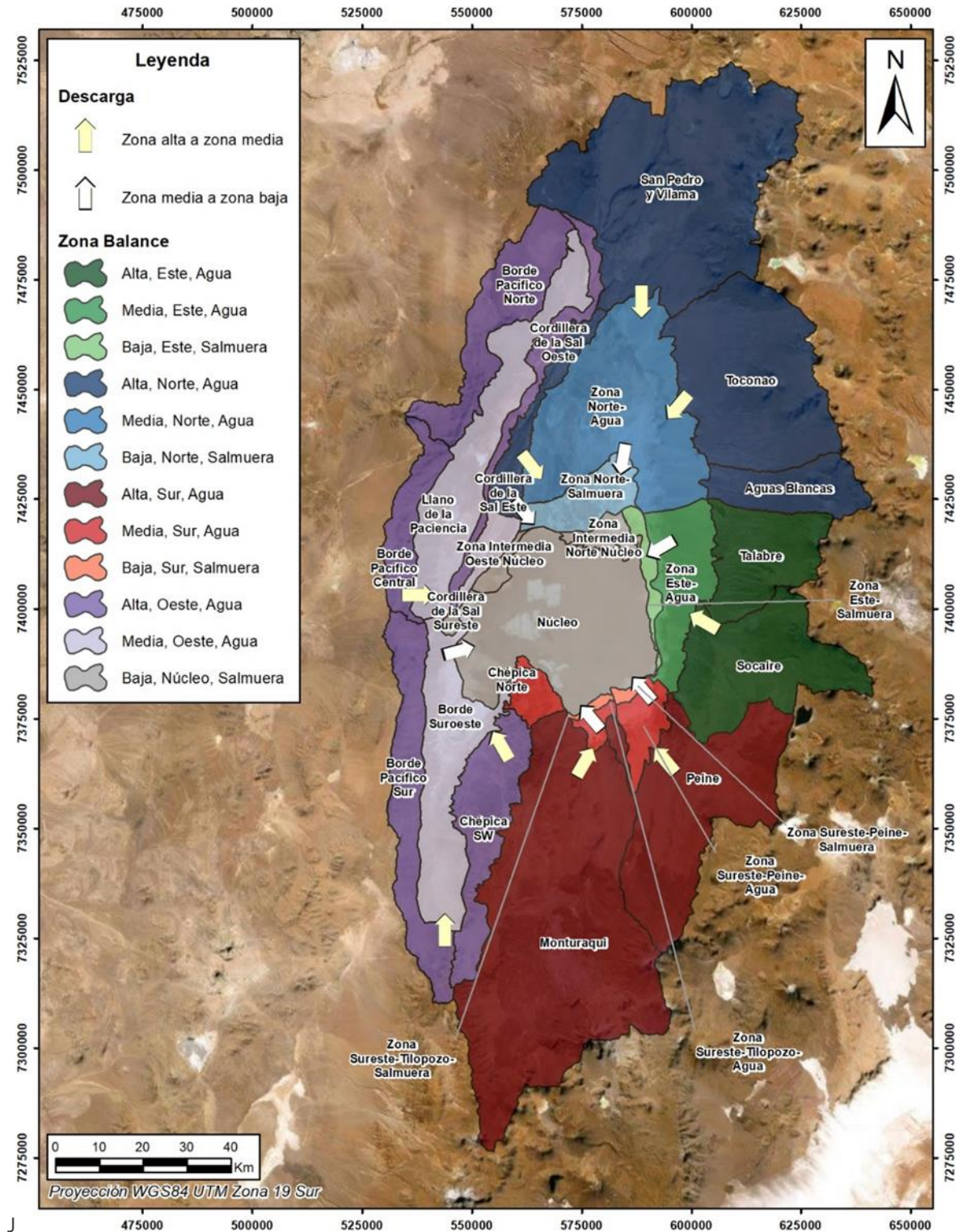


Fuente: SRK Consulting, 2020

Las zonas altas corresponden a cuencas o sectores de cabecera, que incluyen las altas cumbres y las mayores pendientes en la superficie, donde predomina la escorrentía como principal entrada al sistema. Las zonas medias consideran los acuíferos aluviales y las zonas marginales aguas arriba de la interfaz salina, estas últimas con mayor influencia de entradas por infiltraciones directas que escorrentías.

En el caso de las zonas bajas, representan a los sectores en los que se encuentra la salmuera, cuya divisoria en superficie con la zona media se define por la intersección aproximada entre la interfaz salina y la superficie del terreno (Figura 4-83), por lo que el caudal en exceso obtenido en algunas zonas medias representa a la cantidad de agua que es capaz de recargar las zonas de salmuera desde las zonas de agua (SRK Consulting 2020).

Figura 4-83: Zonas de balance de agua y salmuera utilizadas.



Fuente: Basado SRK Consulting, 2020



Con respecto a la temporalidad de los balances, se consideran 2 escenarios principales, uno previo a la operación de SQM y otro considerando las actividades productivas del Titular. Con base en lo anterior, los períodos evaluados se definen de la siguiente forma:

- Período preoperacional, comprendido entre septiembre de 1986 y octubre de 1994. En este período el único operador de salmuera en el núcleo del Salar de Atacama correspondía a la Sociedad Chilena del Litio, cuyas operaciones se iniciaron en 1983. Los registros de esta época son escasos en general y corresponden principalmente a la captura de datos hidrogeológicos realizados por Hydrotechnica (1987) para la empresa MIN-SAL entre 1986 y 1992, además de los datos publicados por Albemarle para su estudio de impacto ambiental (GAC 2009).
- Período operacional, que se define entre noviembre de 1994 y diciembre de 2019. El inicio del período lo marca el comienzo de la extracción de salmuera por parte de SQM en el sector MOP y se cierra con el set de datos actualizado hasta diciembre de 2019.

Los componentes principales de los balances hídricos se definen como:

$$\text{RECD} + \text{ESC} - \text{EVS} - \text{EVL} - \text{EVT} - \text{EXT} = \Delta S \pm \text{error}$$

Dónde:

RECD = Recarga Directa por Precipitación

ESC = Escorrentía.

EVS = Evaporación desde el suelo

EVL = Evaporación en lámina libre (superficies lagunares)

EVT = Evapotranspiración

EXT = Extracciones.

$\Delta S$  = Cambios en el almacenamiento del sistema

Las precipitaciones generan entradas al sistema hidrogeológico mediante infiltraciones al subsuelo y como escorrentías superficiales. En el caso de la cuenca del Salar de Atacama, los escurrimientos superficiales se infiltran en su mayoría en los depósitos aluviales que rodean al núcleo, aumentando el caudal subterráneo que fluye hacia éste.

En esta conceptualización del sistema hidrogeológico del Salar de Atacama, se han considerado como posibles recargas naturales al núcleo del Salar sólo a la recarga por precipitaciones y al flujo subterráneo que se genera a partir de ésta, ya que ambos son en cierta medida cuantificables y medibles. Adicionalmente, bajo eventos de precipitación extremos se podría generar escorrentía en el núcleo, pero solo en casos puntuales.

Con respecto a las entradas de origen antrópico, para el período operacional, en la zona del núcleo se produce recarga artificial debido a la reinyección directa de salmuera, a la reinyección indirecta, asociada a pérdidas de salmuera en las pozas de evaporación y a la reinyección sobre acopios de sales.

Es importante señalar que, para fines del desarrollo de la estimación del balance, las distintas entradas y salidas son representadas espacialmente mediante archivos ráster, donde el modelo de datos espaciales es definido como una grilla con celdas 30 m x 30 m.

El detalle del planteamiento conceptual y obtención de los valores de cada uno de los componentes del balance hídrico se presentan en el Anexo 5.1 Modelo hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama, mientras que a continuación se presenta el resumen de los balances tanto de agua como de salmuera.

#### 4.3.7.5.1.3.6.1 Balance de agua

Para realizar el balance de agua dulce se consideran las zonas altas y medias de la cuenca del Salar de Atacama, donde, según la zonificación presentada en la Figura 4-83, las zonas altas se clasifican en: Norte, formada por San Pedro y Vilama, Toconao, Cordillera de la Sal Este; Este, constituida por Talabre y Socaire; Sur, compuesta por Monturaqui y Peine; y Oeste, correspondiente a Chépica SW, Borde Pacífico, Cordillera de la Sal Oeste y Sureste. Por su parte, las zonas medias se clasifican como Zona Norte - Agua, Zona Este - Agua, Zona Sur Tilopozo- Agua, Zona Sur Peine - Agua; y Borde Suroeste y Llano de la Paciencia en el oeste.

El balance se expresa de esta forma:

$$REC_D + ESC - EVS - EVL - ETR - EXT_{ad} - Q_n = \Delta S \pm \text{error}$$

Dónde:

$REC_D$  = Recarga Directa por Precipitación

$ESC$  = Escorrentía.

$EVS$  = Evaporación desde el suelo

$EVL$  = Evaporación en lámina libre

$ETR$  = Evapotranspiración

$EXT_{ad}$  = Extracciones Agua Dulce

$Q_n$  = Caudal disponible para ingresar al núcleo

$\Delta S$  = Cambios en el almacenamiento

El balance de agua se realiza aguas arriba de la interfaz salina, calculándose de la siguiente forma:

- Balance en las zonas altas: se calcula el caudal disponible a ser traspasado a la zona media a partir de las siguientes entradas y salidas:
  - a. Entrada por recarga por precipitación.
  - b. Entrada por escorrentía.

- c. Salidas por evapotranspiración asociadas a vegas.
- d. Salidas por evaporación desde lámina libre en cuerpos de agua que presentan persistencia en el tiempo.
- Balance en zonas medias:
  - e. Entrada por recarga por precipitación.
  - f. Entrada por escorrentía.
  - g. Recarga lateral proveniente de las zonas altas. Se considera que la recarga lateral puede ser en forma de escorrentía o subterránea.
  - h. Descarga por evapotranspiración, evaporación desde el suelo y lámina libre.
- El resultado del balance de las zonas medias entrega cuánto caudal de agua está disponible para ingresar al núcleo, evaluándose la potencial entrada por los cuatro sectores definidos del núcleo: Norte, Este, Sur y Oeste (Tabla 4-34 y Tabla 4-35).

De acuerdo con lo planteado anteriormente, para la estimación del balance se distribuyen espacialmente todas las entradas y salidas del sistema mediante el uso de archivos rasters, agregándolas según las zonas de balance para el sistema de agua dulce. Es importante señalar que el balance está calculado con el caso promedio o adoptado, tanto para la recarga y la escorrentía, como para las descargas. La Tabla 4-34 presenta el balance calculado para el período preoperacional.

Para el periodo preoperacional se tiene que, si bien las mayores entradas se producen en la parte norte de la cuenca, este sector cuenta con la mayor cobertura de vegetación, presentando mayores descargas asociadas a la evapotranspiración. A pesar de lo anterior, los caudales entrantes son mayores que los salientes, obteniéndose un balance positivo, lo que indica que se produciría una entrada de agua hacia las zonas de salmuera, cercano a los 300 L/s.

En la zona sur se genera una diferenciación entre zonas de balance de agua Sur Peine y Sur Tilopozo, estimándose en ambos casos un balance positivo que deja caudal disponible para recargar las zonas de salmuera, siendo el caudal disponible mucho mayor en la zona de Tilopozo (36 L/s en Peine y 250 L/s en Tilopozo). Las extracciones de agua en el periodo preoperacional corresponden a 5 L/s reportados por SCL en el período preoperacional en la zona media Sur Tilopozo (SRK Consulting 2020).

Con respecto al funcionamiento del sistema en la parte este, en este sector se tienen entradas de consideración, sin embargo, también se produce una alta evaporación en la zona marginal, asociada a la presencia de cuerpos de agua y a que en esta zona la napa se encuentra somera. Estas salidas superan en magnitud a las entradas, lo que produce que no se genere un caudal disponible para ser traspasado a las zonas de salmuera.

Tabla 4-34: Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo preoperacional.

SEC-TOR	ZONAS DE BALANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
		Recarga Directa	Recarga Lateral	Escurrentía	Recarga desde otras zonas	Evaporación desde el Suelo	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Disponible para descarga hacia otras zonas	Variación de almacenamiento
N	Alta-Norte-Agua	297	150	1.750		0	8	294	0	1.895	0
	Media-Norte-Agua	282	0	105	1.895	259	321	1.402	0	299	0
E	Alta-Este-Agua	84	46	644		0	0	191	0	583	0
	Media-Este-Agua	111	0	56	583	674	40	127	0	0	-92
S	Alta-Sur Peine-Agua	39	14	184		0	34	33	0	169	0
	Media-Sur Peine-Agua	38	0	15	169	84	40	62	0	36	0
	Alta-Sur Tilopozo-Agua	227	27	498		3	20	11	0	719	0
	Media-Sur Tilopozo-Agua	11	0	8	719	407	42	35	5	250	0
O	Alta-Oeste-Agua	63	3	55		0	0	0	0	122	0
	Media-Oeste-Agua	125	1	31	122	104	28	1	0	146	0
<b>TOTAL</b>		<b>1.278</b>	<b>242</b>	<b>3.345</b>		<b>1.531</b>	<b>534</b>	<b>2.157</b>	<b>5</b>	<b>4.219</b>	<b>-92</b>

Fuente: SRK Consulting, 2020

En la zona oeste se generan menores entradas, debido a que en este sector de la cuenca las precipitaciones son de menor magnitud. Por otro lado, en este sector no se cuenta con presencia de vegetación ni cuerpos de agua de consideración, como en el caso de la zona este, sumado a que existen pocas zonas con niveles someros, lo que genera que las salidas sean de baja magnitud, generando un balance positivo, lo que representa a una entrada de caudal desde la zona de agua a la zona de salmuera por el poniente.

Los resultados en términos agregados indican que en las zonas altas predomina la escurrentía como entrada al sistema, y que las salidas están dominadas por la evapotranspiración (sin considerar las descargas hacia la zona media); por otro lado, en la zona media se identifica la preeminencia de las entradas por recarga lateral desde zonas altas, mientras que las salidas no sólo están dominadas por la evapotranspiración, sino que además la evaporación desde la napa cumple un rol importante. La evaporación desde lámina libre juega un papel de menor importancia en el balance, puesto que es de un orden de magnitud inferior al de la evapotranspiración y la evaporación desde el núcleo (SRK Consulting 2020).

El balance de agua dulce obtenido para el periodo operacional se muestra en la Tabla 4-35, donde se puede observar que la principal diferencia se produce en las descargas, correspondiente al aumento en las

extracciones de agua producto de la operación de los distintos actores que se ubican en la cuenca. Estas diferencias se producen en la zona este, asociado al bombeo de SQM y en la zona sur, debido al bombeo de Al-bemarle, CMZ y MEL.

Cabe señalar que este aumento de las extracciones genera una disminución en el caudal disponible para ser traspasado a las zonas de salmuera, generando una reducción en las entradas a dicho sistema.

Tabla 4-35: Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo operacional.

SEC-TOR	ZONAS DE BA-LANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
		Recarga Directa	Recarga Lateral	Escorrentía	Recarga desde otras zonas	Evaporación desde el Suelo	Evaporación Lámina Li-brera	Evapotranspiración	Extracciones	Disponible para des-carga hacia otras zonas	Variación de almace-na-miento
N	Alta-Norte-Agua	297	150	1.750		0	8	294	0	1.895	0
	Media-Norte-Agua	282	0	105	1.895	259	321	1.402	0	299	0
E	Alta-Este-Agua	84	46	644		0	0	191	0	583	0
	Media-Este-Agua	111	0	56	583	674	40	127	124	0	-216
S	Alta-Sur Peine-Agua	39	14	184		0	34	33	0	169	0
	Media-Sur Peine-Agua	38	0	15	169	84	40	62	0	36	0
	Alta-Sur Tilopozo-Agua	227	27	498		3	20	11	0	719	0
	Media-Sur Tilopozo-Agua	11	0	8	719	407	42	35	51	204	0
O	Alta-Oeste-Agua	63	3	55		0	0	0	0	122	0
	Media-Oeste-Agua	125	1	31	122	104	28	1	0	146	0
<b>TOTAL</b>		<b>1.278</b>	<b>242</b>	<b>3.345</b>		<b>1.531</b>	<b>534</b>	<b>2.157</b>	<b>175</b>	<b>4.173</b>	<b>-216</b>

Fuente: SRK Consulting, 2020

#### 4.3.7.5.1.3.6.2 Balance de salmuera

El balance de salmuera incluye el núcleo más la parte de la zona marginal que se encuentra hacia el interior de la interfaz (llamada Zona Marginal - salmuera). En este sistema predominan las entradas por recarga directa y los aportes de la zona media, los que están en el orden de las salidas por concepto de evaporación desde el suelo, esta última promovida por las condiciones de la napa en la etapa preoperacional, menos influenciada por la explotación de la salmuera (SRK Consulting, 2020).

En la Tabla 4-36 se presentan los componentes del balance de salmuera para el periodo preoperacional, en el cual se muestra una variación de almacenamiento negativa (-105 L/s), que puede explicarse en parte, por las extracciones de SCL.



Tabla 4-36: Resumen de balance de salmuera en el periodo preoperacional.

RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)
Recarga Directa	Recarga Lateral	Escorrentía	Recarga Lateral desde zonas de agua	Evaporación desde el Suelo	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Variación de almacenamiento
256	0	19	731	983	82	0	46	-105

Fuente: SRK Consulting, 2020

En el balance de salmuera para el periodo operacional (Tabla 4-37) se obtiene un desbalance negativo, de orden de 660 L/s, el cual se produce un gran aumento de las extracciones en el núcleo, que pasan de 46 L/s en el periodo preoperacional a 1249 L/s en el periodo operacional. Este aumento de extracciones se compensa en cierta medida con la disminución de la evaporación desde el suelo en las zonas de salmuera, relacionado al aumento de las extracciones en el núcleo durante el periodo operacional, las cuales han hecho descender los niveles en parte del núcleo provocando una disminución de la evaporación.

En cuanto a la recarga sobre las zonas de salmuera, esta presenta una reducción de su recarga natural como consecuencia de la instalación de las pozas de evaporación, sin embargo, cuenta con recarga por pérdidas en las pozas y por reinyección de salmuera que son de mayor magnitud que la reducción de recarga natural, tanto directa como indirectamente como se menciona en el Anexo 5.1 Modelo hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama

Tabla 4-37: Resumen de balance de salmuera en el periodo operacional.

RECARGA (L/s)					DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)
Recarga Directa	Recarga Lateral	Escorrentía	Recarga Lateral desde zonas de agua	Reinyección	Evaporación desde el Suelo	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Variación de almacenamiento
247	0	19	685	248	557	82	0	1.219	-658

Fuente: SRK Consulting, 2020.

## 4.3.7.5.1.4 Caracterización Hidrogeológica Sistemas Locales

## 4.3.7.5.1.4.1 Sistema Ambiental Soncor

## 4.3.7.5.1.4.1.1 Parámetros hidráulicos

De los 631 puntos con información de parámetros hidráulicos, 30 ensayos se ubican dentro del Sistema de Soncor, donde, 24 corresponden a pruebas de bombeo, 4 a Slug tests y 2 a calicatas. Considerándose las primeras representativas de una escala espacial mayor.

Las mediciones asociadas a cada pozo y unidad geológica se muestran en la Tabla 4-38. La ubicación de los puntos con información se muestra en la Figura 4-84.

Los ensayos hidráulicos se efectuaron en las unidades geológicas Delta (4 pruebas), Depósitos no consolidados (Aluvial; 1 prueba), Sulfatos (10 pruebas), Carbonatos (2 prueba) y Cloruros Superiores (13 pruebas).

Para la unidad Cloruros Superiores, se cuenta con trece pruebas de bombeo que entregan valores de conductividad hidráulica en el rango 10 m/d a 1000 m/d. La unidad Sulfatos, con diez pruebas, presenta valores de conductividad hidráulica entre  $3 \times 10^{-3}$  m/d y 2500 m/d. La unidad de carbonatos presenta sólo dos pruebas, con valores de K de  $5 \times 10^{-3}$  y 20 m/d.

Además, aunque no están dentro del área de análisis, en los alrededores de ésta también se cuenta con pruebas hidráulicas en la unidad geológica Delta San Pedro, que arrojan un valor de K de  $1 \times 10^{-4}$  m/d, y con una prueba en el depósito aluvial, con un resultado de K de 4,6 m/d.

Todas estas pruebas hidráulicas son consistentes con el rango descrito a nivel regional (Tabla 4-28).

Tabla 4-38. Conductividad hidráulica por unidad geológica en el Sistema Soncor.

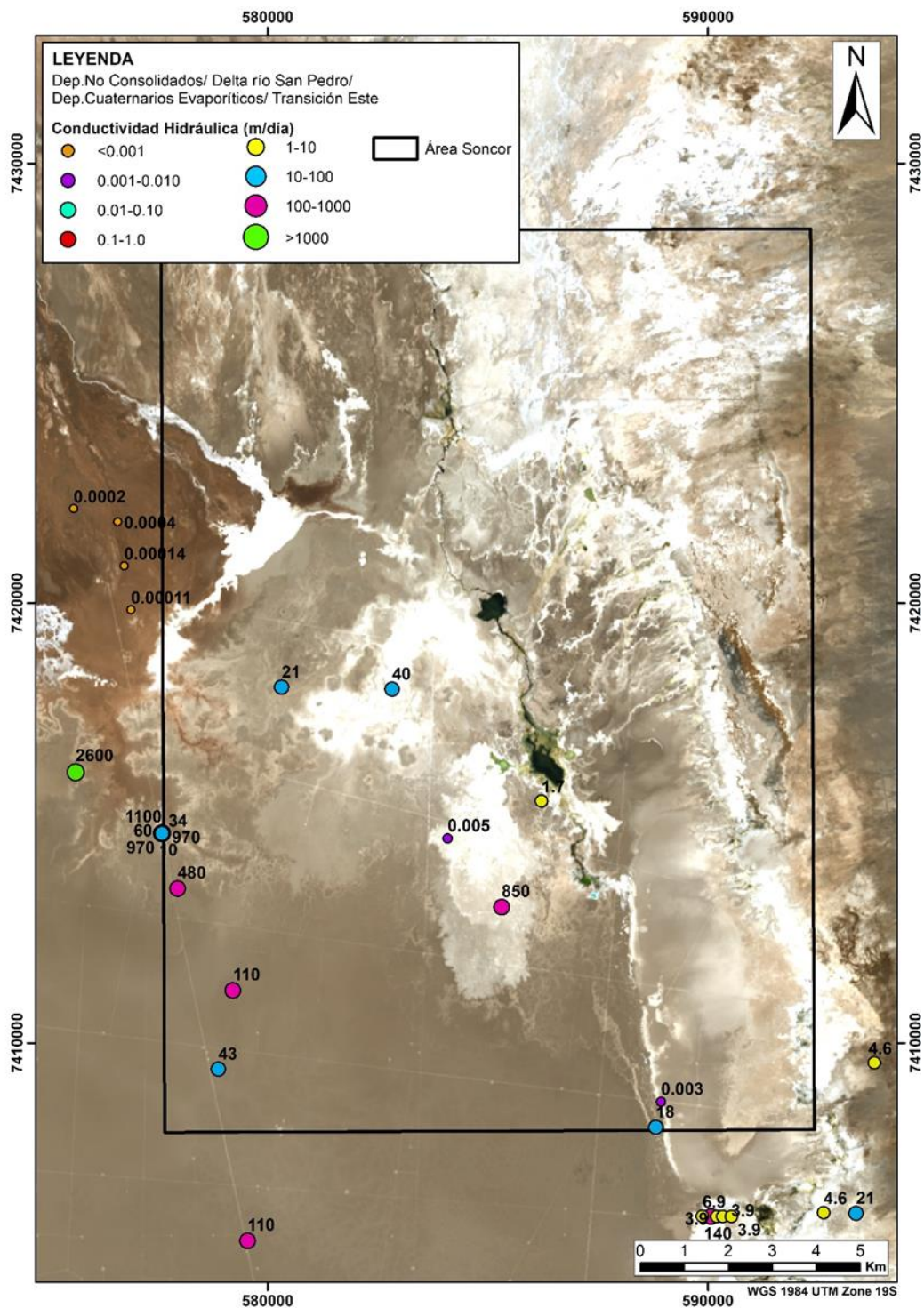
Pozo	Tipo de ensayo	K (m/d)	Unidad Geológica	Pozo	Tipo de ensayo	K (m/d)	Unidad Geológica
GD01	Calicatas	0,005	Carbonatos Con Limos	915	Slug Test	0,0004	Delta del Rio San Pedro
L4-8	Prueba de bombeo	20,8	Carbonatos Con Limos	1153	Slug Test	0,0002	Delta del Rio San Pedro
1015	Prueba de Bombeo	1066	Cloruros Superiores	1975	Slug Test	0,0001	Delta del Rio San Pedro
1016	Prueba de Bombeo	966	Cloruros Superiores	2577	Slug Test	0,0001	Delta del Rio San Pedro
1903	Prueba de Bombeo	966	Cloruros Superiores	L3-5	Prueba de bombeo	4,6	Depósitos No Consolidados
1914	Prueba de Bombeo	10,3	Cloruros Superiores	F2	Calicatas	0,003	Sulfatos
1915	Prueba de Bombeo	59,6	Cloruros Superiores	K-20	Prueba de Bombeo	2.590	Sulfatos
1916	Prueba de Bombeo	33,9	Cloruros Superiores	L4-11	Prueba de bombeo	3,9	Sulfatos

Tabla 4-38. Conductividad hidráulica por unidad geológica en el Sistema Soncor.

K-13,5	Prueba de Bombeo	43,2	Cloruros Superiores	L4-12	Prueba de bombeo	3,9	Sulfatos
K-15	Prueba de Bombeo	112	Cloruros Superiores	L4-13	Prueba de bombeo	3,9	Sulfatos
K-17,5	Prueba de Bombeo	475	Cloruros Superiores	L4-14	Prueba de bombeo	144	Sulfatos
K-9,5	Prueba de Bombeo	112	Cloruros Superiores	L4-15	Prueba de bombeo	6,9	Sulfatos
PBE-47B	Prueba de bombeo	17,8	Cloruros Superiores	L4-9	Prueba de bombeo	4,6	Sulfatos
PBE-57B	Prueba de Bombeo	21,3	Cloruros Superiores	P2-5	Prueba de Bombeo	1,7	Sulfatos
PBE-58B	Prueba de Bombeo	39,6	Cloruros Superiores	PBE-52B	Prueba de bombeo	850	Sulfatos

Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-84. Distribución espacial de valores de conductividad hidráulica estimados en unidades geológicas del sistema Soncor.



Fuente: SQM, 2021.

En cuanto al almacenamiento, la estimación local para el Sistema Soncor se realizó a partir 11 pruebas de bombeos, realizadas tanto en la unidad geológica de Cloruros Superiores como en la unidad geológica de Sulfatos (Tabla 4-39), y se muestran espacialmente en la Figura 4-85. El rango obtenido en la unidad Cloruros Superiores va desde  $1 \times 10^{-3}$  a 0,18, mientras que el rango de coeficiente de almacenamiento en la unidad Sulfatos cae entre 0,04 a 0,1.

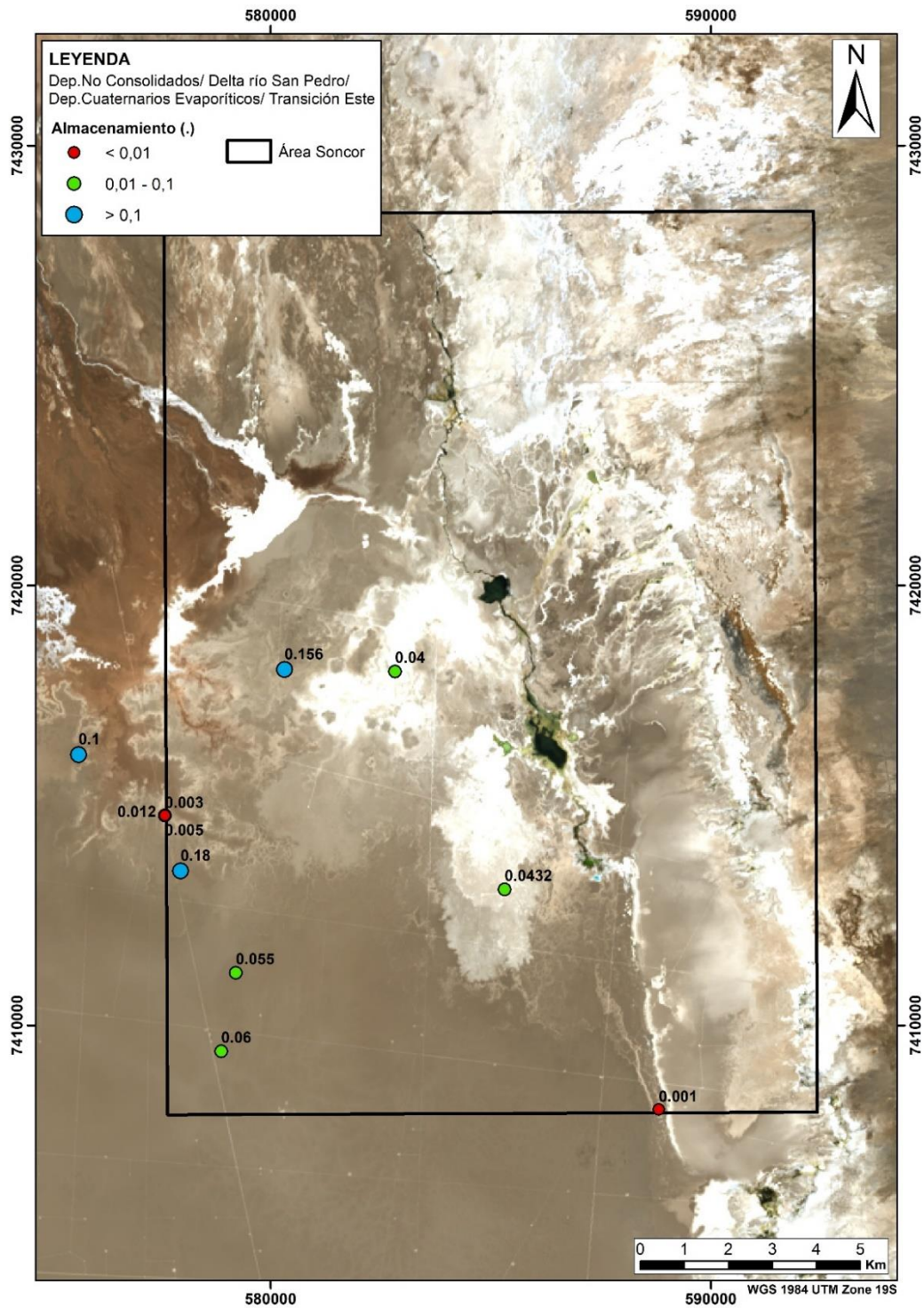
**Tabla 4-39. Coeficiente de almacenamiento por unidad geológica en el Sistema Soncor.**

Pozo	Tipo de ensayo	S	Unidad Geológica
1016	Prueba de Bombeo	0,005	Cloruros Superiores
1914	Prueba de Bombeo	0,012	Cloruros Superiores
1916	Prueba de Bombeo	0,003	Cloruros Superiores
K-13,5	Prueba de Bombeo	0,06	Cloruros Superiores
K-15	Prueba de Bombeo	0,06	Cloruros Superiores
K-17,5	Prueba de Bombeo	0,18	Cloruros Superiores
PBE-47B	Prueba de bombeo	0,001	Cloruros Superiores
PBE-57B	Prueba de Bombeo	0,16	Cloruros Superiores
PBE-58B	Prueba de Bombeo	0,04	Cloruros Superiores
K-20	Prueba de Bombeo	0,1	Sulfatos
PBE-52B	Prueba de bombeo	0,04	Sulfatos

Fuente: SQM, 2021.



Figura 4-85. Distribución espacial de valores de almacenamiento estimados en unidades geológicas del sistema Soncor.



Fuente: SQM, 2021.

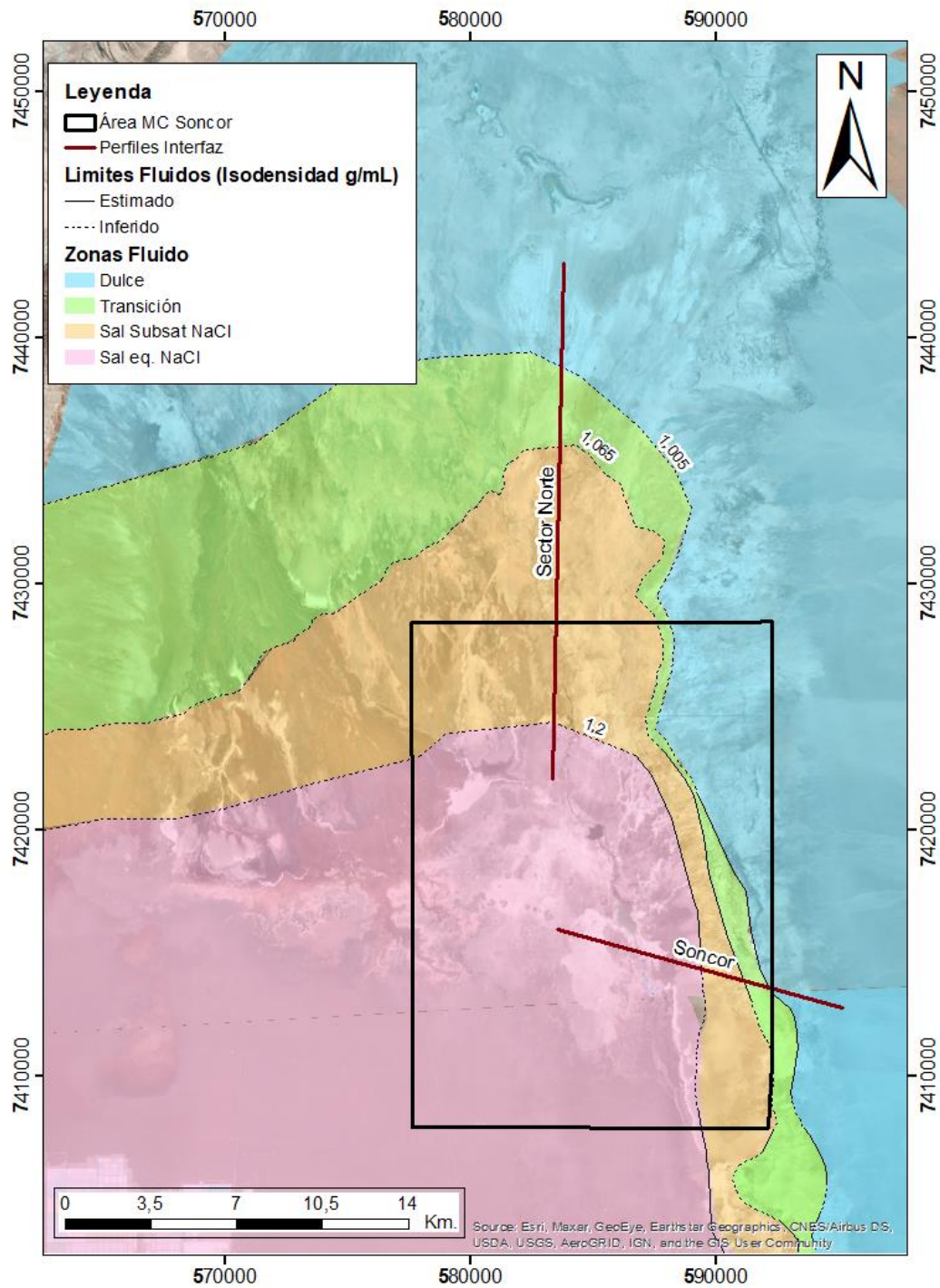
#### 4.3.7.5.1.4.1.2 Interfaz Salina

##### 4.3.7.5.1.4.1.2.1 Reconocimiento de zonas en superficie

De los 148 puntos con información de densidad utilizados para el reconocimiento regional de la interfaz salina en superficie, 51 se encuentran dentro del sector del Sistema Ambiental Soncor.

El detalle de la ubicación de estos puntos y de los límites locales se presenta en la Figura 4-48 , mientras que los criterios de reconocimiento son los mismos presentados en el acápite 4.3.7.5.1.3.1.

Figura 4-86. Ubicación puntos de monitoreo e isólinas de densidad que indican afloramiento interfaz salina en sistema Soncor.



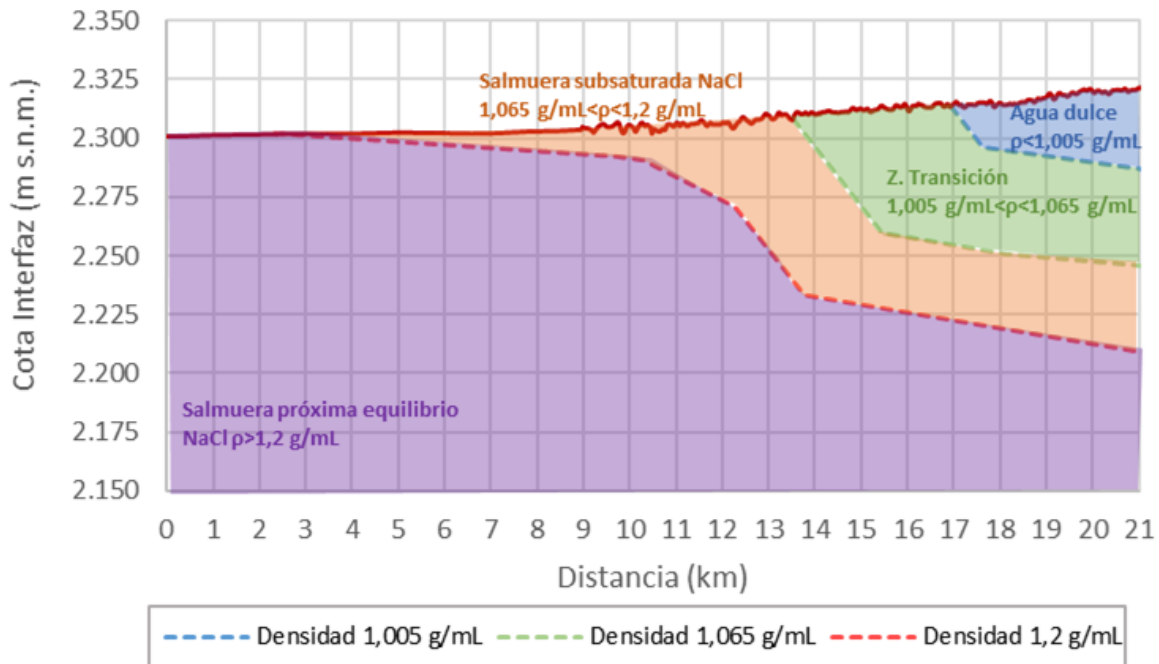
Fuente: SQM, 2021.

- Reconocimiento de interfaz salina en profundidad

En base a la información descrita en el acápite 0, para delimitar la interfaz salina en profundidad, se analizó información de TEM y perfilajes de CE en 3 pozos del sistema Soncor (pozos cuña1, cuña 2 y cuña 3, Figura 4-51), lo que permitió la elaboración de los perfiles que se muestran en la Figura 4-87 y Figura 4-88, que permiten conocer la pendiente, forma y volumen de la interfaz salina en el área de Soncor. La ubicación de estos perfiles puede verse en la Figura 4-86. Además, en la Figura 4-89 se presentan las isolíneas de densidad para los perfiles de Soncor Norte y Soncor Este, donde puede verse que la pendiente en ambos perfiles es similar pero la profundidad alcanzada por la isolínea de 1,065g/mL en el sector Este del sistema Soncor es mayor que en el norte.

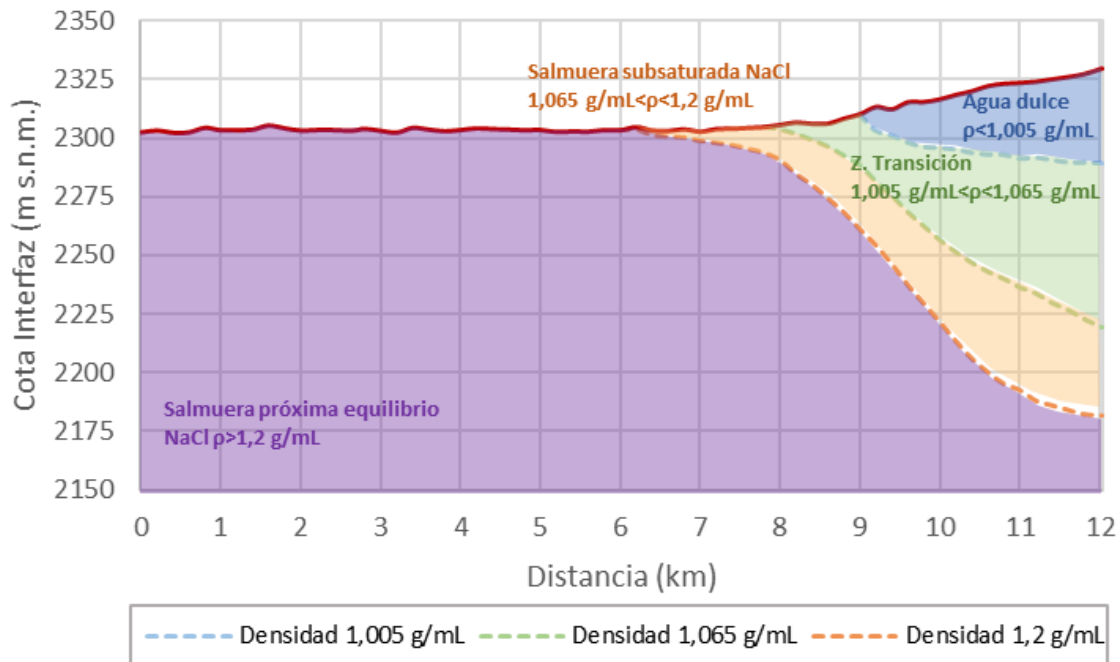
Respecto de la estabilidad de la interfaz salina, como resultado del análisis de los datos de SQM, se ha inferido que la posición de la interfaz durante el periodo monitoreado no ha experimentado variaciones significativas. Estos análisis son consistentes con los resultados obtenidos por los distintos autores que han analizado la variabilidad de la posición de la interfaz salina (Albemarle, 2021) y (Bevacqua, Geological Aspects of the Salar de Atacama's Nucleus. Estudio preparado para Minsal., 1987). De esta forma, es posible considerar que las variaciones de la interfaz salina no tienen efectos relevantes en los cambios históricos de nivel de agua subterránea observados en el entorno del sistema lagunar de Soncor.

Figura 4-87 Perfil 2D den sector Norte del sistema Soncor.



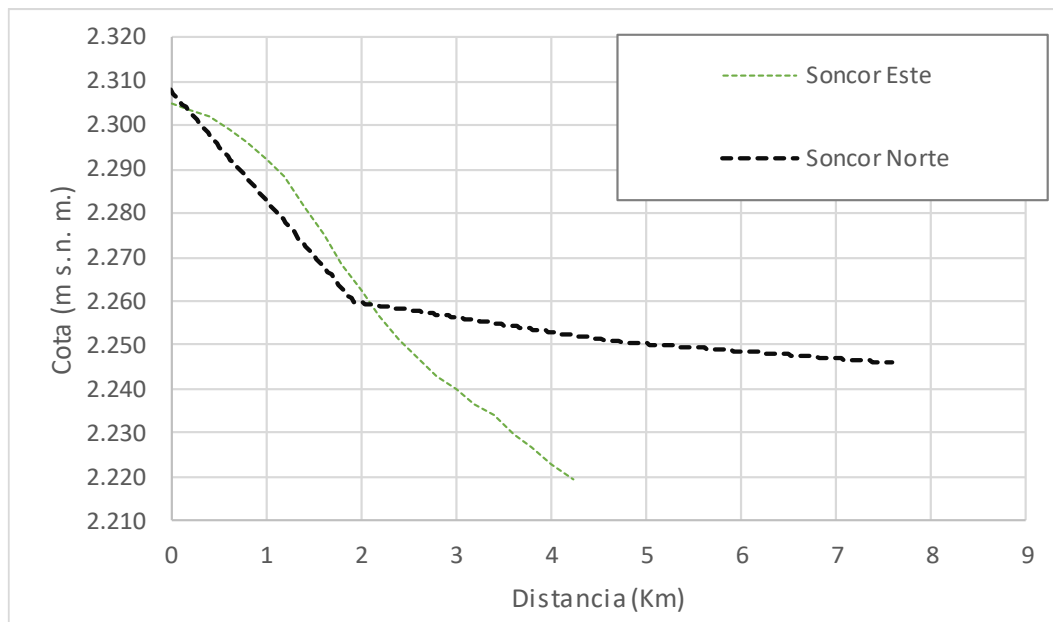
Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-88 Perfil 2D en sector este del sistema Soncor.



Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-89 Pendiente de la isolínea de densidad 1,065g/mL para las secciones de Soncor Norte y Soncor Este.



Fuente: SQM, 2021.



#### 4.3.7.5.1.4.1.3 Cuerpos de agua superficiales

##### 4.3.7.5.1.4.1.3.1 Escurrimientos superficiales Sistema local

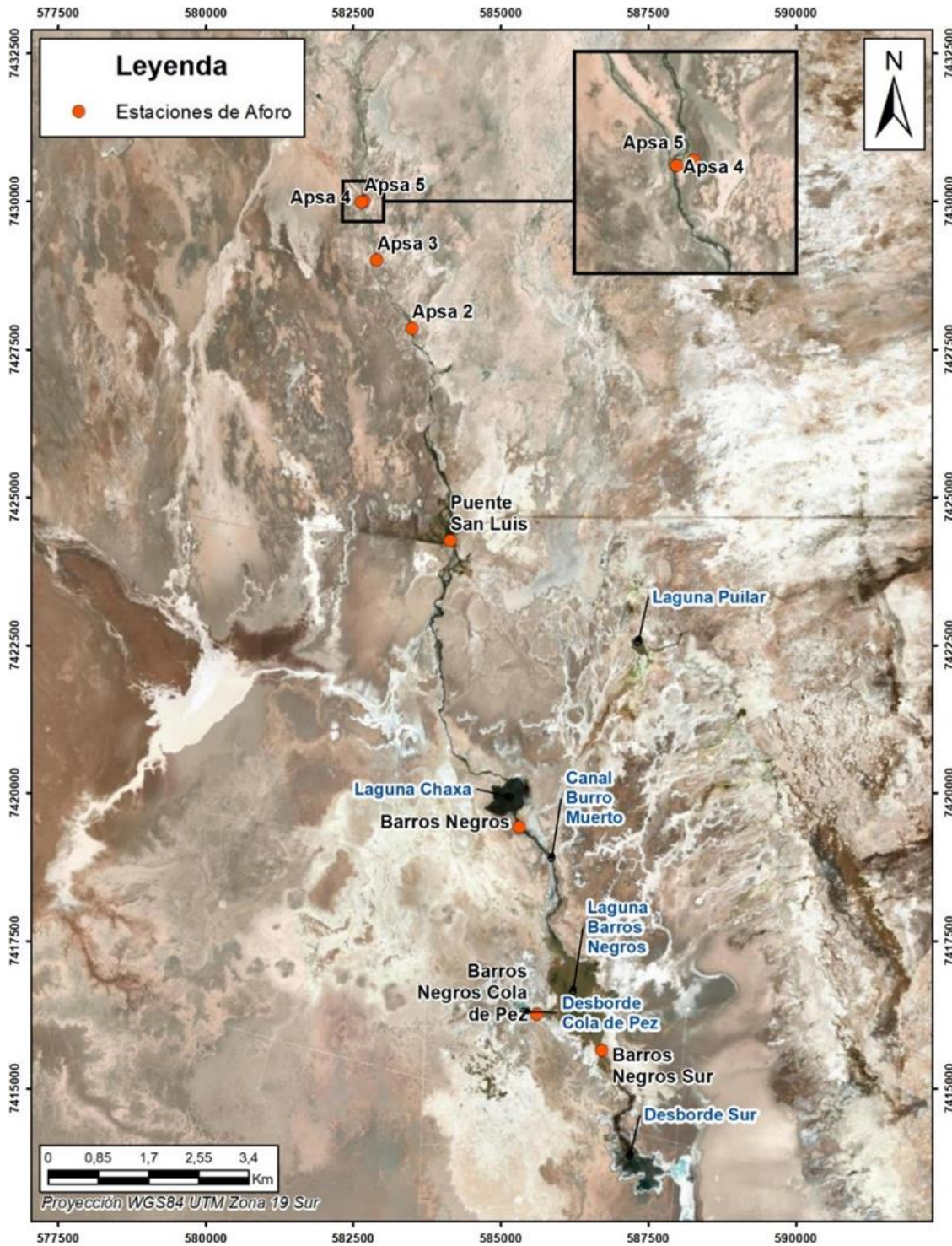
El agua superficial del Sistema Soncor es el resultado de la confluencia de numerosas manifestaciones de agua subterránea que originalmente precipitan en las zonas altas de la cuenca (al norte y noreste de ésta), se infiltran, y afloran nuevamente al norte y noreste del Salar de Atacama.

Las primeras manifestaciones superficiales de agua subterránea se producen en el sector conocido como Llano del Tambillo (unos 20 km al norte de Laguna Chaxa). Las surgencias de esta zona dan origen a dos canales (estaciones de aforo APSA 4 y 5, Figura 4-90) que aguas abajo confluyen (estación de aforo APSA 3 y 2, Figura 4-90) formando el canal de Burro Muerto, que representa la alimentación principal del Sistema Soncor. Esta agua fluye superficialmente hacia Puente San Luis (punto de aforo, Figura 4-90), incrementando su caudal por aportes subsuperficiales desde el borde este. Aguas abajo del Puente San Luis se producen aportes desde el borde este, aumentando el caudal del canal de Burro Muerto entre Puente San Luis y la laguna Chaxa. Desde la laguna Chaxa continúa el canal de Burro Muerto (punto de aforo, Figura 4-90), conduciendo agua por aproximadamente 2,5 km, hasta acumularse en la laguna Barros Negros (Figura 4-90). Además, el sistema posee una recarga menor proveniente de flujos subterráneos desde el este, los cuales dan origen al canal que alimenta la laguna Puilar; y a desbordes subsuperficiales sobre la interfaz por agua desde el este, los cuales dan origen a una serie de pequeños canales de disolución que se observan al este de Barros Negros. Estos últimos sólo son importantes en episodios de altos caudales y en su mayor parte se evaporan.

Las lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros tienen un área relativamente estable. Puilar no muestra conexión directa con el canal de Burro Muerto y su única alimentación proviene de la descarga del acuífero aluvial del este. El canal de Burro Muerto, por su parte, termina en Barros Negros, siendo ésta la laguna terminal del sistema.

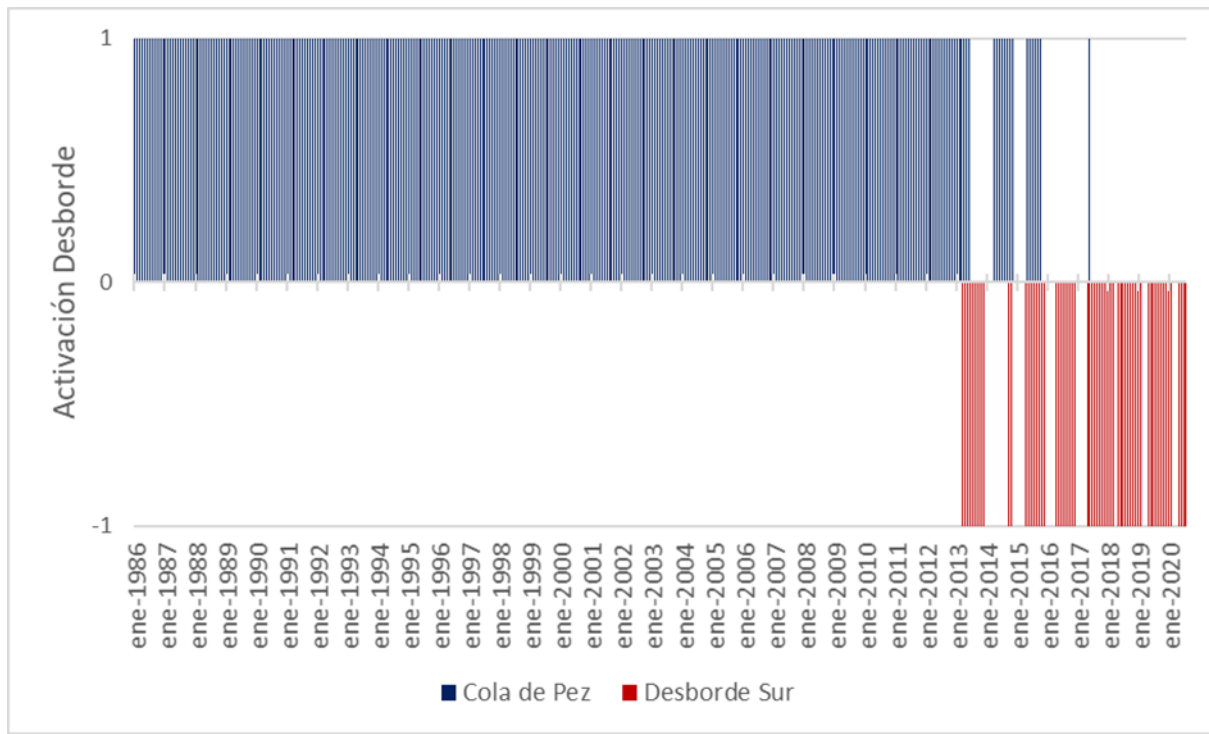
En épocas de abundancia hídrica (invierno austral e invierno altiplánico, asociado a altas precipitaciones) se producen desbordes de agua superficial desde la laguna Barros Negros hacia zonas fuera de ésta, generando cuerpos de agua no permanentes. Al menos desde la década de 1990 hasta el año 2012, la principal área de desborde se encontraba al oeste de la laguna Barros Negros, en la zona denominada como “Cola de Pez” (punto de aforo, Figura 4-90). Luego de esta fecha, se produjo un cambio en la dinámica de Barros Negros y el desborde principal comenzó a darse hacia el sur, en detrimento del desborde hacia Cola de Pez, en el sector conocido actualmente como “Desborde Sur” (punto de aforo, Figura 4-90). Lo anterior, con base en un análisis de imágenes satelitales mediante la aplicación de índices espectrales para el análisis de humedad (NDMI) y la identificación de cuerpos de agua (NDWI), considerando el umbral para la diferenciación de cuerpos de agua (0,1), se obtiene que, a partir del invierno de 2013, el cuerpo de agua definido en el Desborde Sur se reactiva durante todas las temporadas invernales, incluso en el verano-otoño durante los eventos de precipitaciones (ver Figura 4-91).

Figura 4-90. Puntos donde se realiza aforo en el sistema Soncor.



Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-91. Activación Desborde Cola de Pez y Sur (el valor 1 corresponde a la activación de Desborde Cola de Pez y -1 a la activación de Desborde Sur).



Fuente: SQM, 2021.

La Tabla 4-40 muestra un resumen con los datos estadísticos de las estaciones utilizadas en esta línea de base.

Tabla 4-40. Estaciones de aforo.

ESTACIÓN DE AFORO	N° DE DATOS	FECHA		CAUDAL (L/s)		
		DESDE	HASTA	MÍN	MÁX	MEDIANA
AFORO APSA 2	47	25-04-2012	25-02-2019	55	289	153
AFORO APSA 3	46	25-04-2012	25-02-2019	64	333	184
AFORO APSA 4	46	25-04-2012	25-02-2019	9	126	69,5
AFORO APSA 5	46	25-04-2012	25-02-2019	49	177	89,5
AFORO BARROS NEGROS	126	08-09-2007	15-10-2019	57,2	392,7	191,1
AFORO BARROS NEGROS COLA DE PEZ	65	18-05-2011	27-10-2018	0	395	95
AFORO BARROS NEGROS SUR	70	19-05-2011	27-10-2018	0	230	97,5
PUENTE SAN LUIS AFORO	222.247	20-09-2007	27-05-2020	35	299,5	140,8

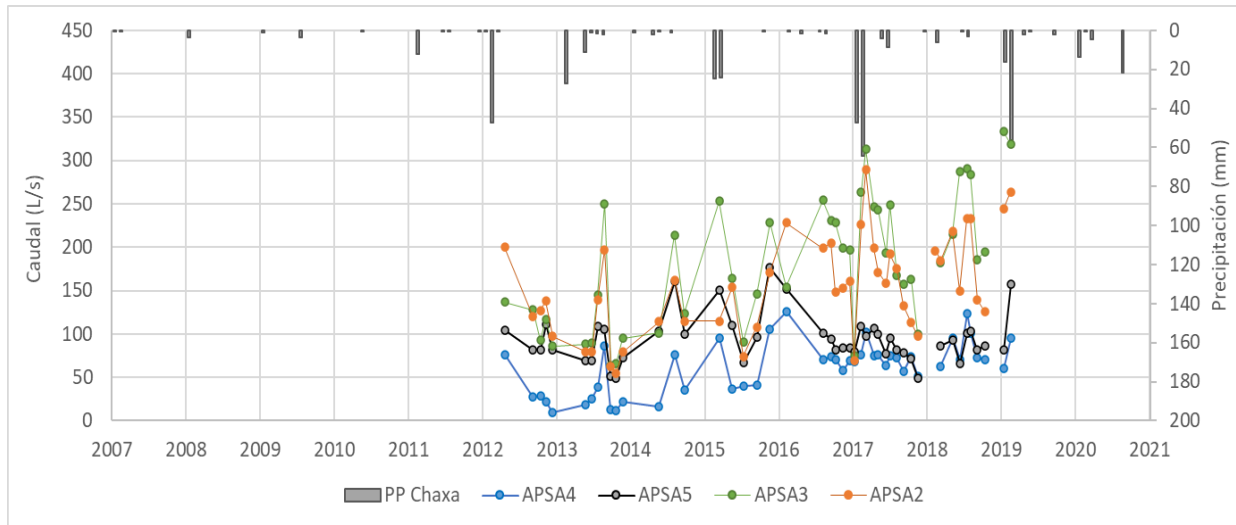
Fuente: SQM, 2021.

En cuanto a los afluentes que dan origen al canal Burro Muerto, el afluente oeste (estación de aforo APSA 4) presenta un menor caudal que el afluente este (estación de aforo APSA 5); sin embargo, a partir del año 2016 sus caudales comienzan a homologarse: APSA 4 comienza a aumentar y APSA 5 comienza a disminuir, tal como se observa en la Figura 4-92.

En la Tabla 4-40 se observa que la mediana de la estación APSA 4 es de 70 L/s, mientras que la mediana de APSA 5 es de 90 L/s. Aguas abajo, la estación de aforo APSA 3 presenta una mediana de 184 L/s y su evolución muestra que presenta caudales levemente mayores que la estación APSA 2, ubicada 1,3 Km aguas abajo y de mediana 153 L/s (Figura 4-92).

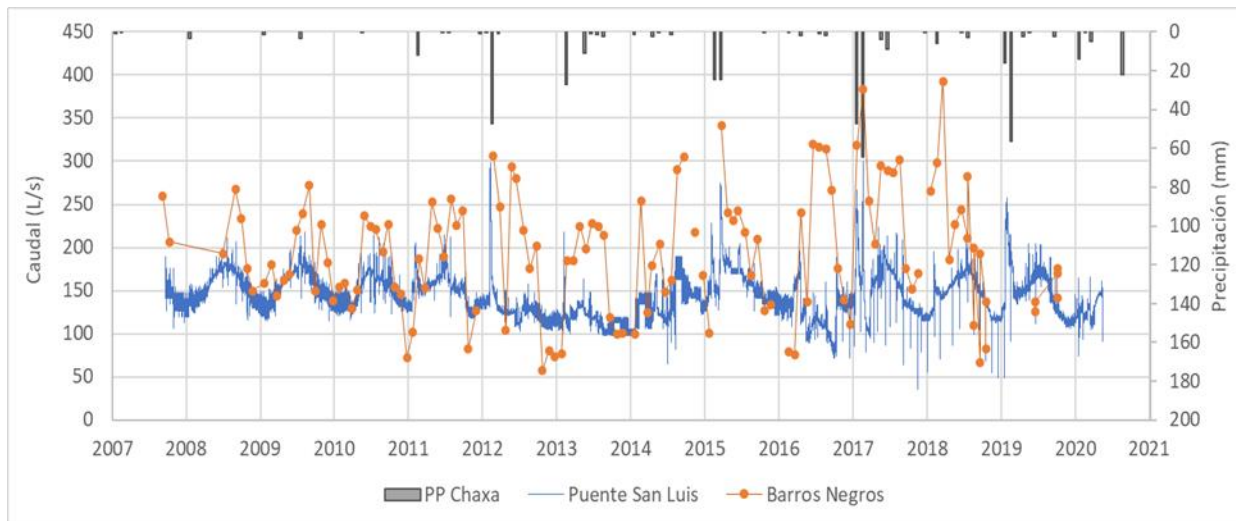
El puente San Luis, corresponde al punto de aforo con mayor tiempo de registro, el cual abarca desde el año 2007 en adelante (Tabla 4-40). En la Figura 4-93 se muestra el gráfico de los datos de aforo en Puente San Luis y Barros Negros para la serie existente, donde la estación Puente San Luis presenta mediciones diarias, mientras que en Barros Negros son mensuales. Los aforos en Barros Negros son por lo general de mayor magnitud a los registrados en Puente San Luis, donde la mediana del primero es de 191 L/s, mientras que la del segundo es de 141 L/s (Figura 4-93). Por otra parte, en los meses donde se registran mayor precipitación, se producen máximos en ambas estaciones.

Figura 4-92. Medidas de aforos en estaciones APSA 2, 3, 4 y 5.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-93. Medidas de aforos en estaciones Puente San Luis y Barros Negros.



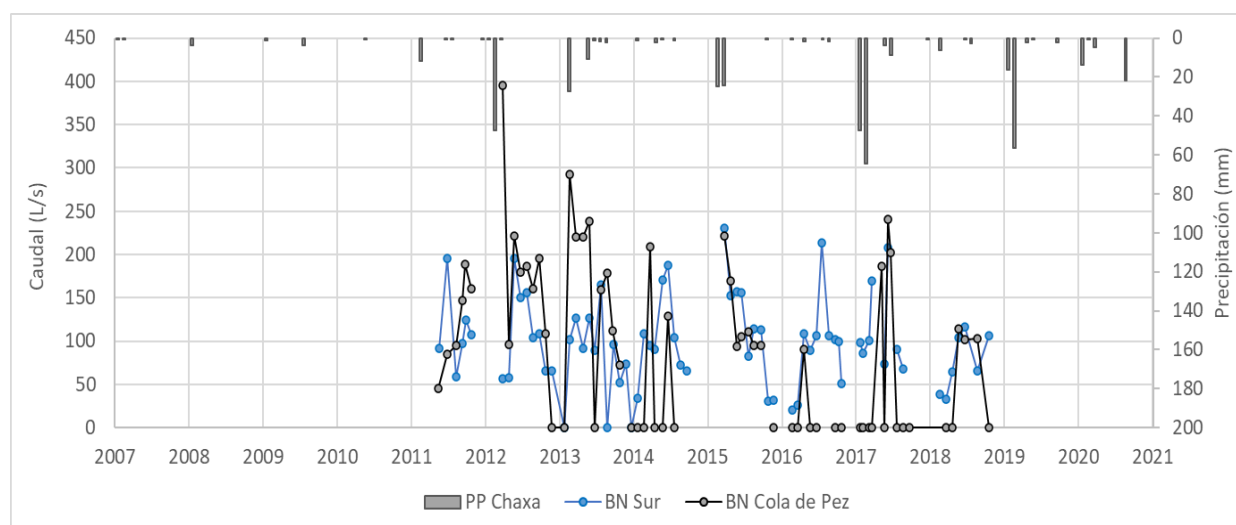
Fuente: Hidroestudios, 2021.



Finalmente, la Figura 4-94 muestra los valores para los aforos en los desbordes Cola de Pez y Desborde Sur. Si bien en estos puntos se realiza monitoreo con frecuencia mensual, se dificulta poder realizar las mediciones en todos los meses del año, debido a problemas de acceso en las zonas de la Reserva Nacional Los Flamencos (RNF), los cuales se producen principalmente durante meses de verano (diciembre – enero). Durante este período se registran los menores caudales, frecuentemente siendo igual a cero. Por otro lado, cabe destacar que las secciones de aforo en estos puntos son naturales, relativamente anchas y con velocidades bajas en su sección, por lo que no tienen la misma precisión que los otros puntos.

Cabe notar que desde el 2012 la estación Cola de Pez, en varios periodos de tiempo, presenta caudal igual a cero. Desde aquel entonces, el desborde principal de la Laguna Barros Negros pasó a ser aquel generado hacia el sur. Las medianas de ambas estaciones son de 95 y de 98 L/s para Cola de Pez y Desborde Sur, respectivamente. De esta forma, si bien ambos desbordes constituyen cuerpos de agua no permanentes, se estima que sus infiltraciones tienen un efecto promedio de largo plazo relevante en la interacción con la salmuera subyacente. Si bien los cambios en la dinámica son apreciables a partir de fines de 2012, es posible que estos hayan tenido un comienzo gradual en años previos.

Figura 4-94. Medidas de aforos en los desbordes Barros Negros Cola de Pez y Barros Negros Sur.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.1.3.2 Cuerpos Lagunares

El sistema lacustre de Soncor se compone por las lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros, las cuales tienen un área relativamente estable. Puilar no muestra conexión directa con el canal de Burro Muerto y su única alimentación proviene de la descarga del acuífero aluvial del este. El canal de Burro Muerto, por su parte, termina en Barros Negros, siendo ésta la laguna terminal del sistema (Figura 4-90).

Durante el mes de mayo de 2018 se realizó un trabajo batimétrico con el fin de caracterizar la morfología de los cuerpos lagunares y de desborde (Anexo 5.1: Modelo Hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama). A partir de estos resultados, se pudo comprobar que las geometrías de las lagunas Chaxa (Figura 4-95), Puilar (Figura 4-96) y Barros Negros (Figura 4-97) corresponden a extensas cubetas con profundidades máximas de alrededor de 50 cm, con fondos uniformes sin cambios morfológicos significativos. La elevación del fondo en la parte central de la laguna Barros Negros está en torno a, aproximadamente, 2.299,55 m s.n.m. La elevación del fondo de la laguna Chaxa está en torno a, aproximadamente, 2.299,77 m s.n.m. Por su parte, la elevación del fondo de la laguna Puilar es aproximadamente 2.300,8 m s.n.m.

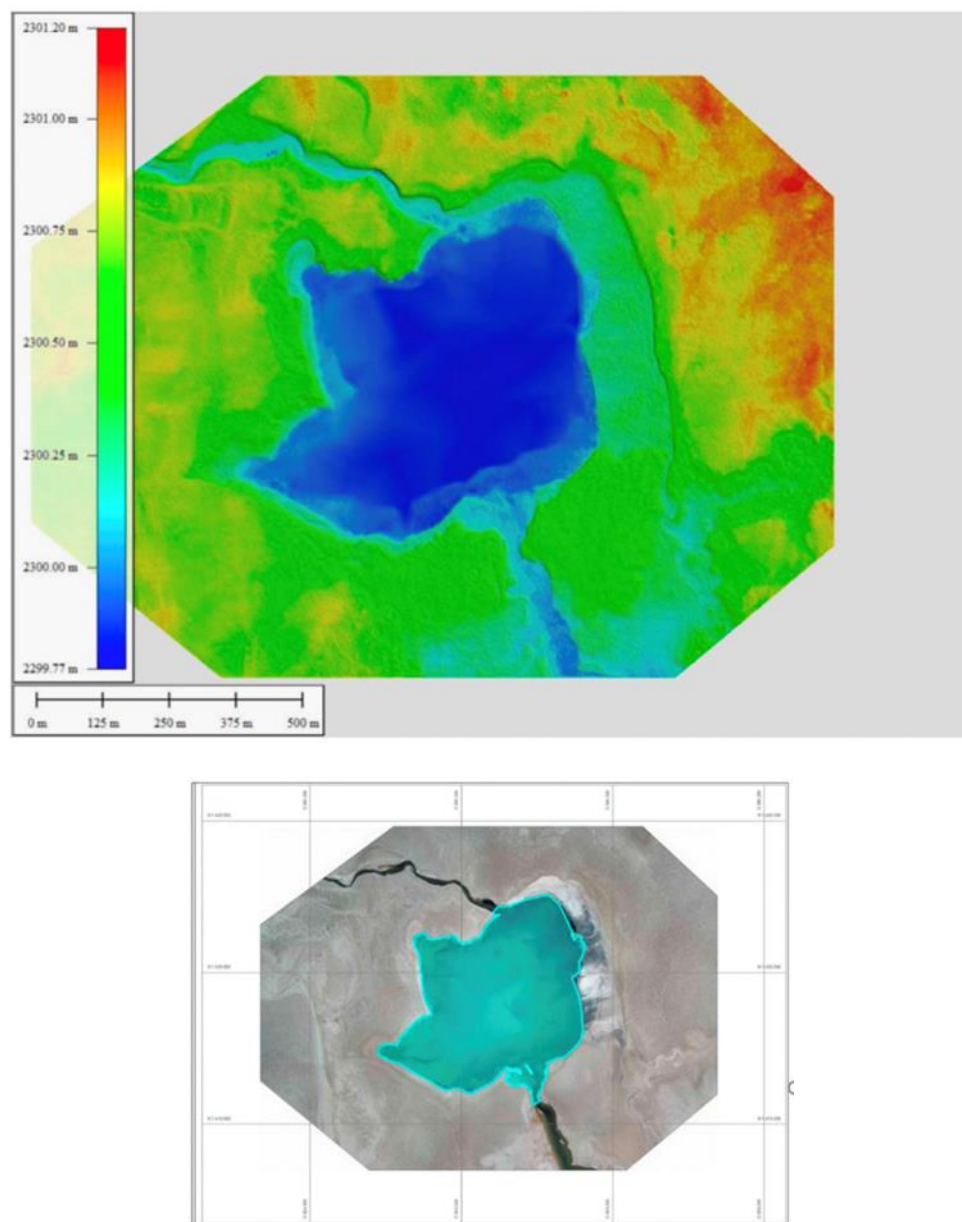
Además, SQM realiza mediciones periódicas de la superficie lacustre de las lagunas Barros Negros, Chaxa y Puilar. Esto se lleva a cabo mediante imágenes satelitales anuales (correspondientes al mes de abril) de alta resolución con verificación de puntos de amarre en terreno. En la Tabla 4-41 se indican los valores obtenidos desde el año 2007 al 2020. En ella se aprecia como la laguna Barros Negros es la de mayor superficie, seguida por las lagunas Chaxa y Puilar. Estas lagunas tienen la característica de un comportamiento estable de sus niveles.

Tabla 4-41. Superficies lacustres generadas en el PSA de SQM desde el 2007 a 2020.

AÑO	SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )		
	Barros Negros	Chaxa	Puillar
2007	1.228.274	311.623	69.728
2008	1.272.249	315.363	69.823
2009	1.324.016	316.764	70.360
2010	1.203.661	308.357	69.267
2011	1.325.448	305.433	70.003
2012	1.327.333	300.248	68.280
2013	1.255.968	295.786	68.264
2014	1.258.615	296.162	68.419
2015	1.380.250	297.955	68.940
2016	1.182.706	291.397	67.151
2017	1.289.158	293.310	69.434
2018	1.162.773	291.001	66.828
2019	1.329.293	330.083	62.101
2020	1.179.783	346.599	63.142
<b>PROMEDIO</b>	<b>1.265.681</b>	<b>307.149</b>	<b>67.981</b>

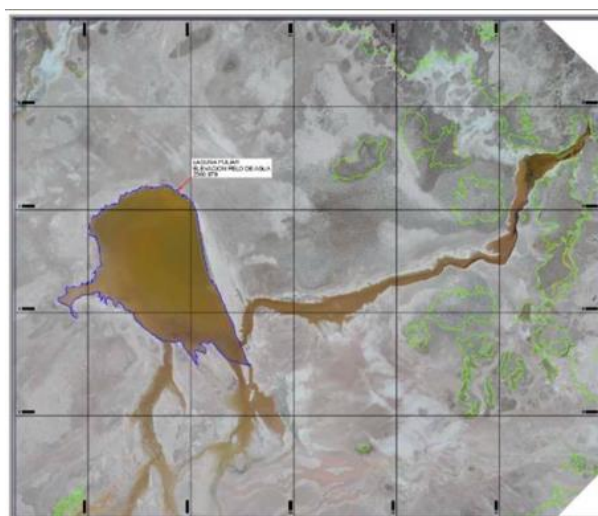
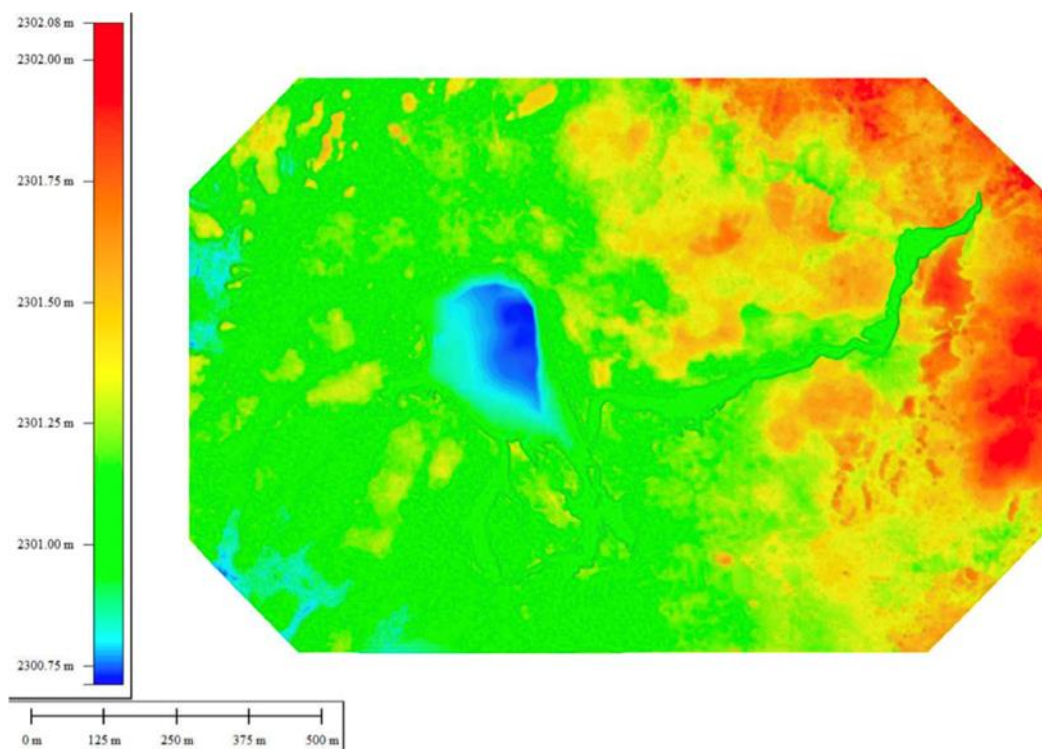
Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-95. Arriba: Batimetría de la Laguna Chaxa. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para la Laguna Chaxa e información del levantamiento realizado.



Fuente: Topoland, 2018.

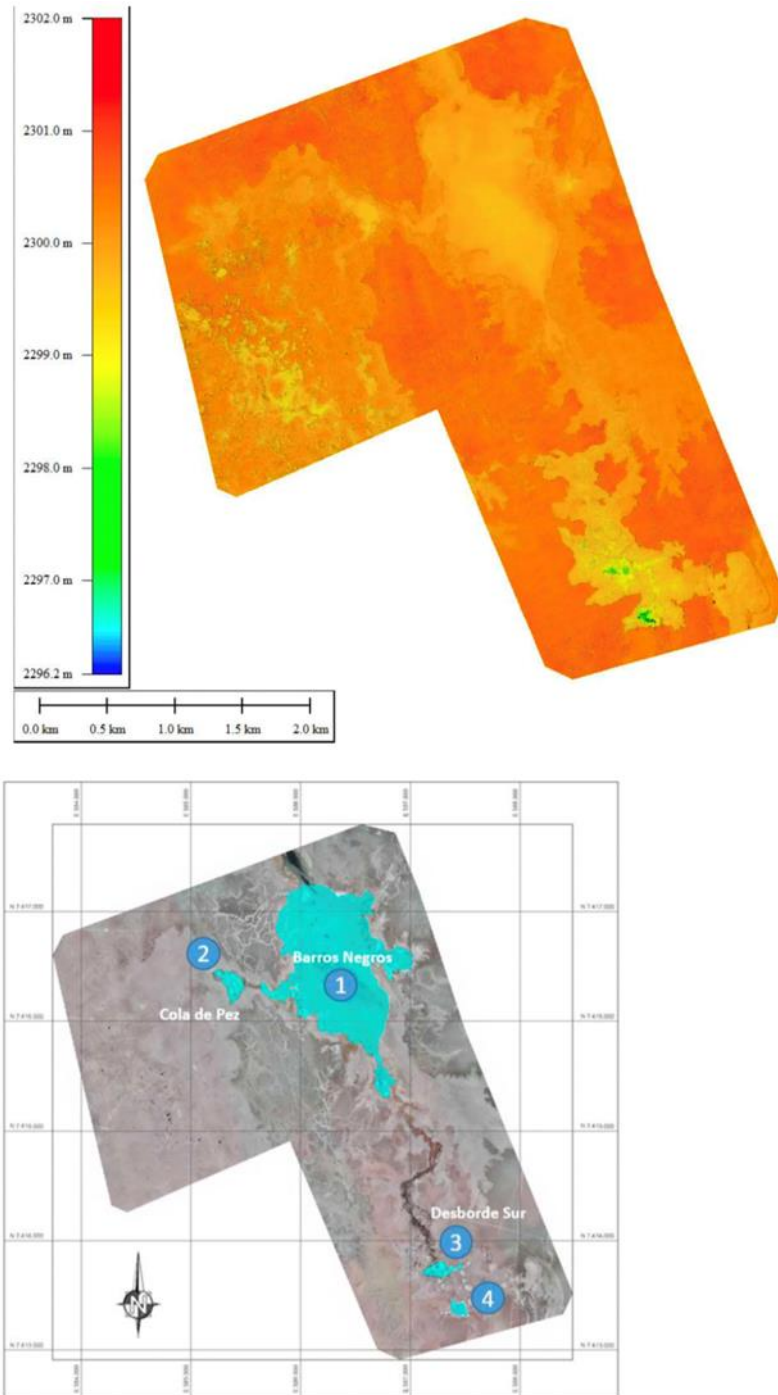
Figura 4-96. Arriba: Batimetría de la Laguna Puilar. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para la Laguna Puilar e información del levantamiento realizado.



Fuente: Topoland, 2018.



Figura 4-97. Arriba: Batimetría de la Laguna Barros Negros y zonas de desborde. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para la Laguna Barros Negros y zonas de desborde e información del levantamiento realizado.



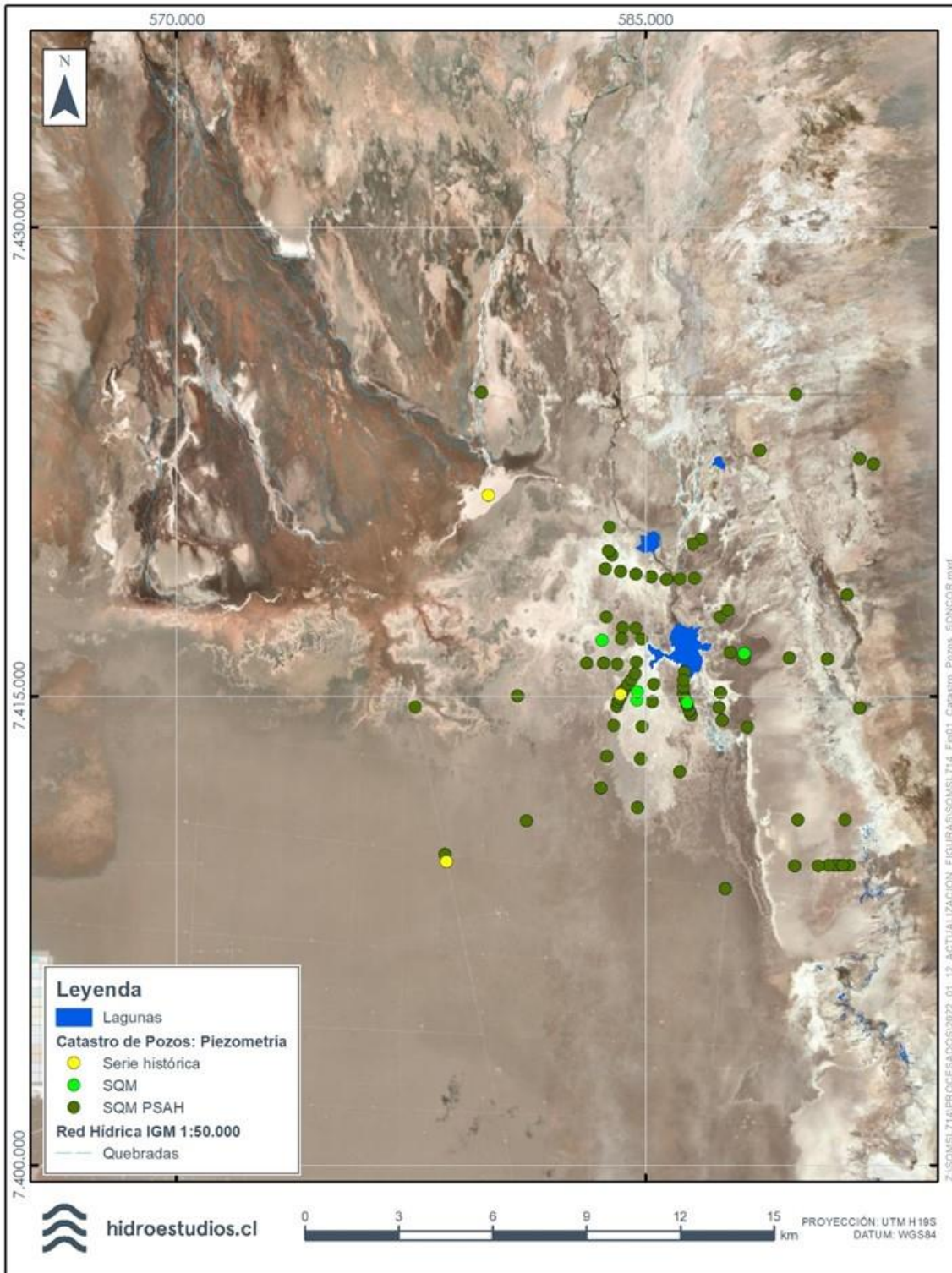
Fuente: Topoland, 2018.

#### 4.3.7.5.1.4.1.4 Niveles de agua subterránea y piezometría,

De los 509 puntos con nivel piezométrico a escala regional, 131 se encuentran en el sector del Sistema local Soncor. Su ubicación y origen, se presenta en la Figura 4-98.

Al igual que en el caso regional, con el fin analizar el comportamiento de los niveles piezométricos a lo largo del tiempo en el Sistema Soncor, a continuación, se presenta la evolución de una serie de pozos representativos para los distintos tipos de fluidos (Figura 4-99).

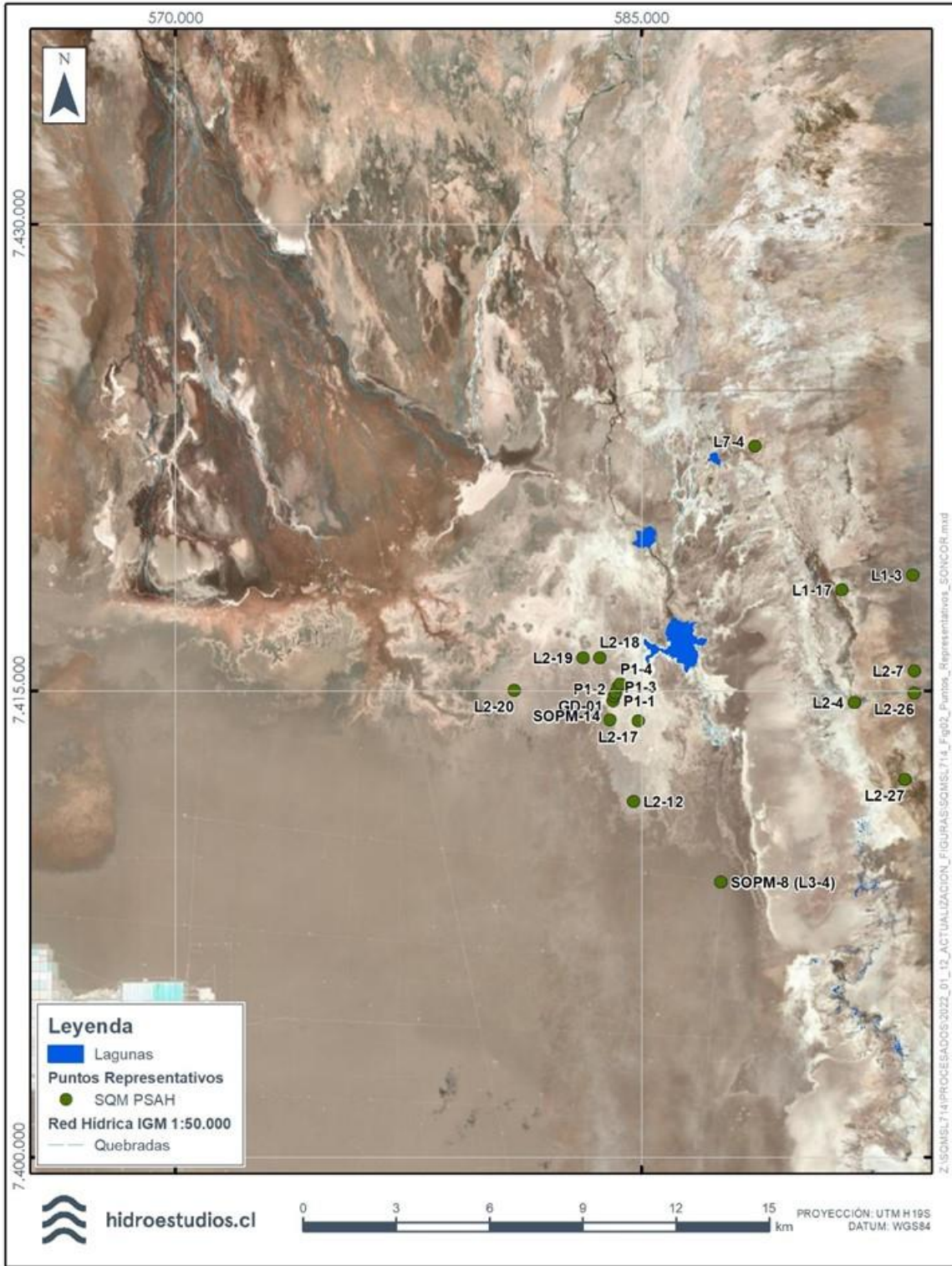
Figura 4-98. Pozos con información de nivel piezométrico Soncor.



Fuente: Hidroestudios, 2021.



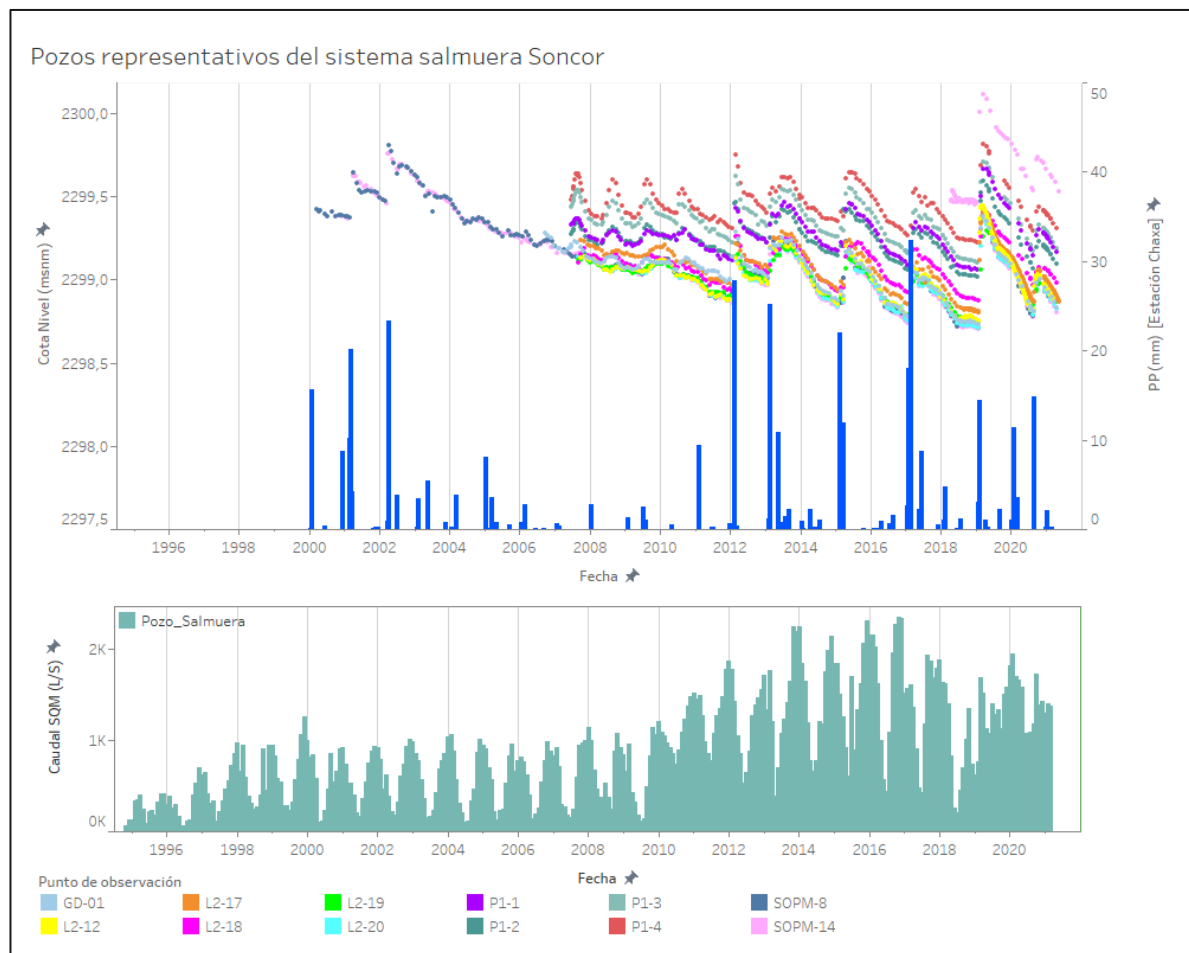
Figura 4-99. Puntos representativos de nivel piezométrico Soncor.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

En la Figura 4-100 se muestran los registros de nivel de algunos puntos representativos del comportamiento de la salmuera en el sector de Soncor (GD-01, L2-12, L2-17, L2-18, L2-19, L2-20, P1-1, P1-2, P1-3, P1-4, SOPM-14). En términos generales, se observa que al comienzo de su registro (hasta aproximadamente el año 2010), los pozos muestran un comportamiento de tipo estacional, es decir con fluctuaciones debido a la evaporación, seguido por una tendencia descendente de los niveles (-6.93 cm/año) marcada por bruscas recuperaciones que se corresponden con los eventos de precipitación.

Figura 4-100. Series de nivel en los puntos representativos del sistema salmuera Soncor y eventos de precipitación registrados en la estación meteorológica de Chaxa.



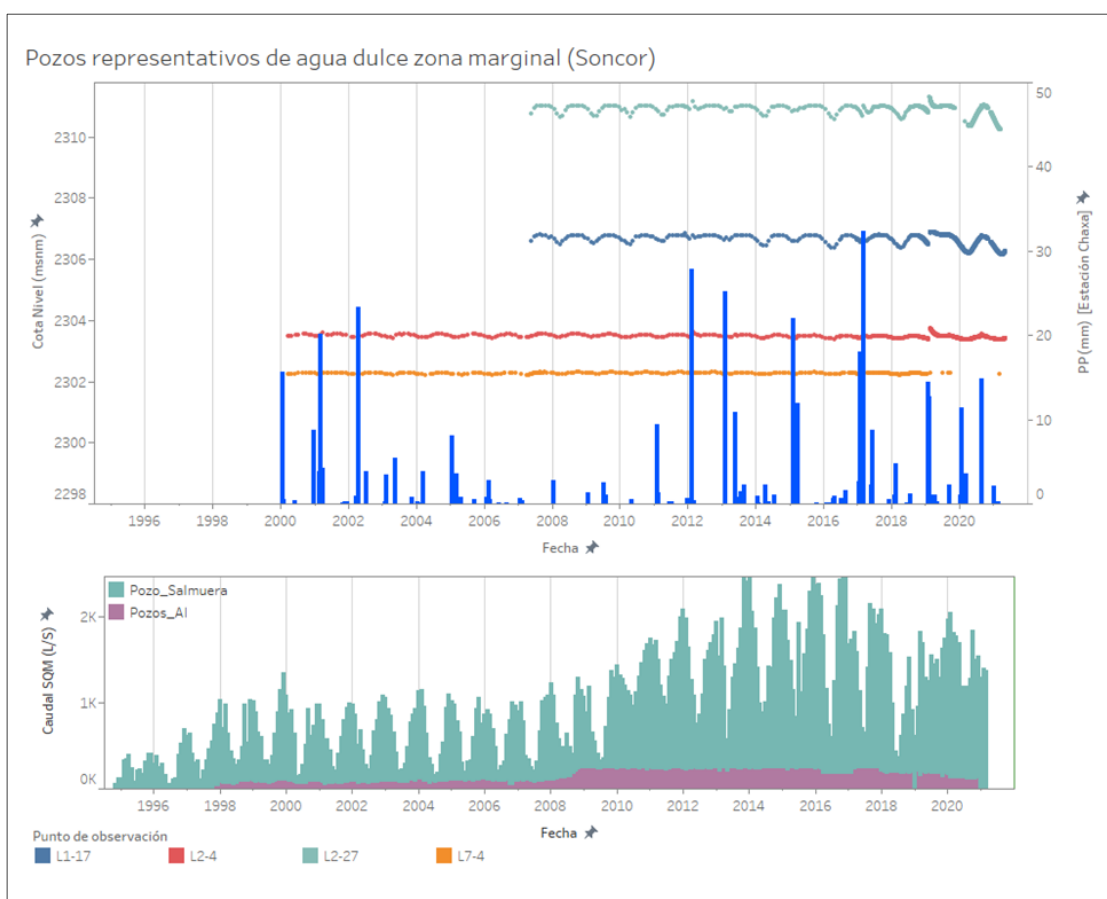
Fuente: Hidroestudios, 2021.

Respecto del comportamiento de los niveles de agua dulce ubicados en la zona marginal del sistema Soncor, se aprecia un comportamiento oscilatorio estacional en torno a un nivel relativamente estable, sin tendencia al ascenso o descenso. Esto implica que su régimen sólo depende la cantidad de agua de recarga (precipitaciones en zonas altas) y de la evaporación. En la Figura 4-101, se muestran los registros medidos en los puntos representativos de este sector (L7-4, L1-17, L2-4 y L2-27).



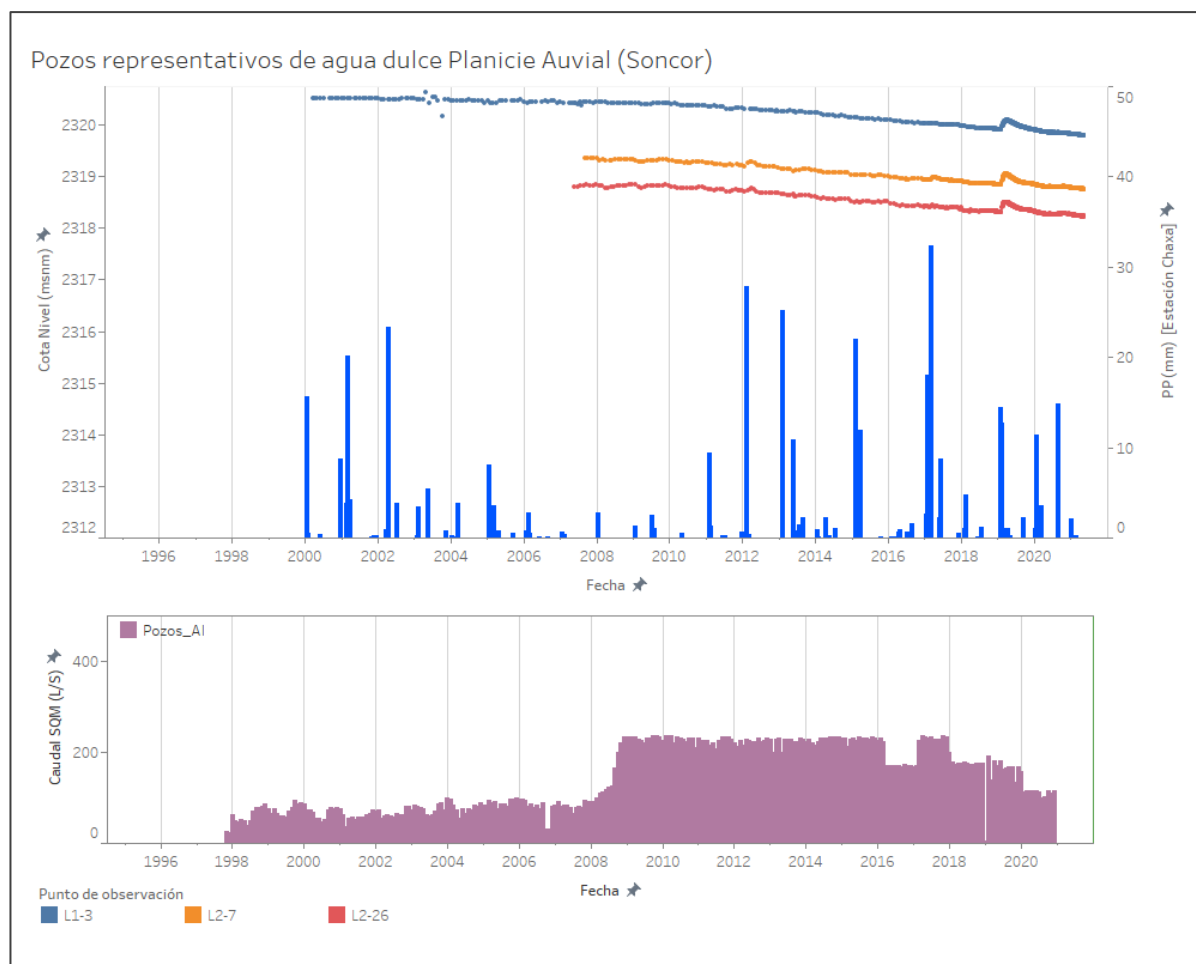
Finalmente, es importante considerar el comportamiento de los niveles de agua dulce, ubicados en la planicie aluvial. En los puntos de observación que se encuentran situados en el margen este del sector aluvial se observa que el nivel está condicionado por las extracciones de agua. En la Figura 4-102 se muestra, a modo de ejemplo, el registro de nivel en los pozos L1-3, L1-7 y L2-26. La mayor particularidad que se observa en las series de nivel de estos pozos es el cambio de pendiente a partir del año 2010 (tasa cambia a -5,47 cm/año). Por su parte, los eventos de precipitación no siempre generan cambios evidentes en los niveles de este sector, siendo notorios sólo aquellos eventos de mayor envergadura, como en los años 2012, 2017 y, particularmente, tras el evento del 2019. Este último destaca por el abrupto aumento en los niveles, sin precedentes en el registro con el que se cuenta (Figura 4-102).

Figura 4-101. Niveles representativos de agua dulce en la zona marginal en el sector de Soncor.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-102. Registro de niveles de los puntos de observación de agua dulce en planicie aluvial de Sistema Soncor.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Adicionalmente a lo antes presentado, es importante mencionar que el comportamiento de los niveles de agua subterránea en el sector de Soncor está determinado en gran parte por la evaporación y la dinámica natural de las lagunas del sistema: Puilar, Chaxa y Barros Negros, y los desbordes de esta última (Cola de Pez y Sur).

En particular, los desbordes corresponden a escorrentía superficial generada cuando el nivel de la laguna es sobrepasado. Esto ocurre tanto por recargas anómalas que suelen suceder durante la época de mayor precipitación en la cuenca, como por una menor tasa de evaporación durante el invierno. El que ocurran desbordes podría incidir en los niveles del acuífero ya que son flujos transportados en superficie con potencial de infiltrarse fuera del área de la laguna. El detalle de este análisis se presenta en el Anexo 5.3: Modelo Hidrogeológico Conceptual del Sistema Soncor.

#### 4.3.7.5.1.4.1.4.1 Piezometría local

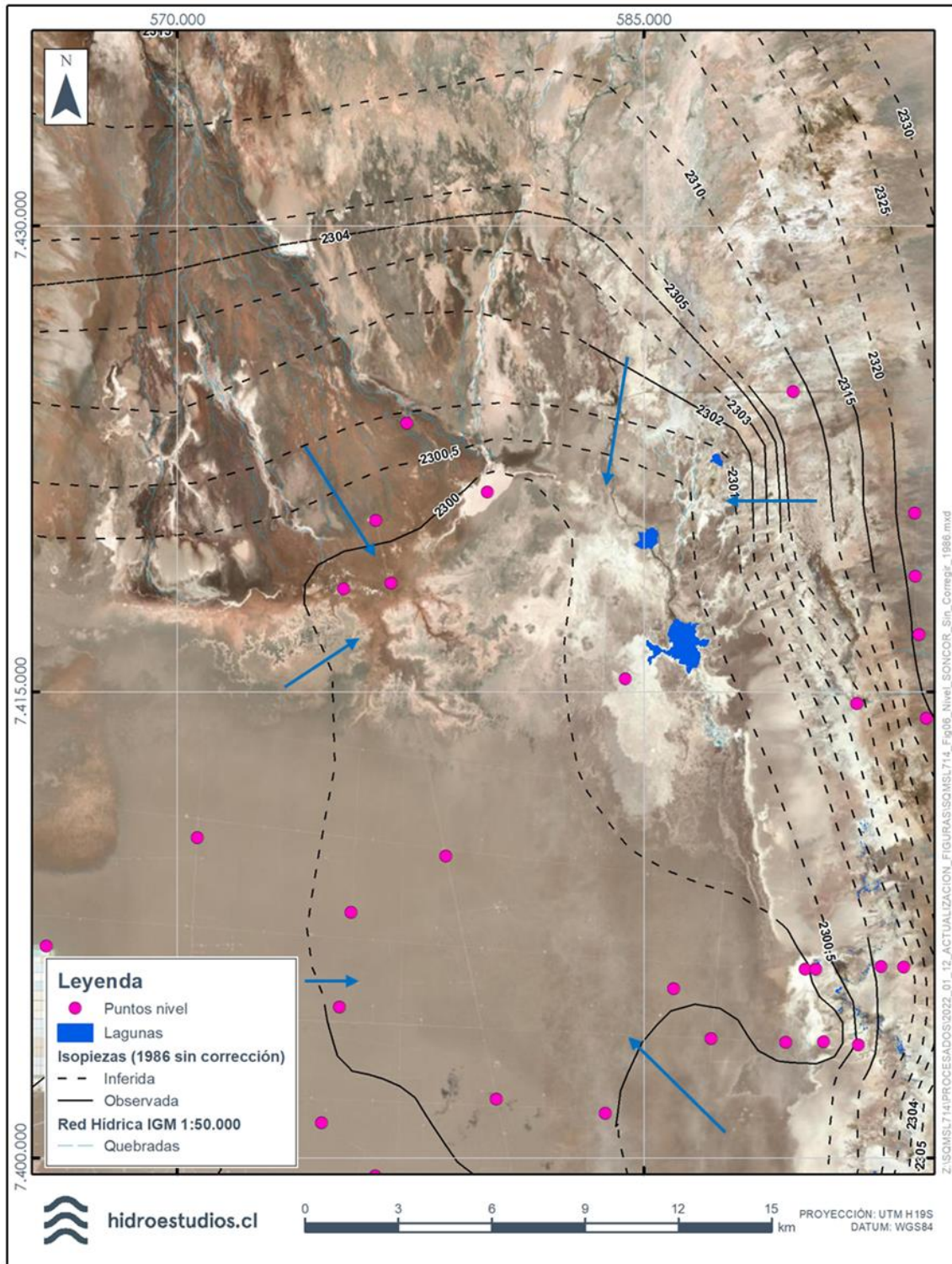
A continuación, se presenta la piezometría para el Sistema local Soncor, tanto para el periodo preoperacional (1986), como para el periodo actual (2020). El detalle de todos los puntos utilizados para la confección de la piezometría se presenta en el Anexo 5.3: Modelo Hidrogeológico Conceptual del Sistema Soncor.

- Piezometría Año 1986

Debido a la escasez de datos preoperacionales, la piezometría de este periodo se desarrolla utilizando extrapolaciones de los niveles registrados recientemente en los pozos que presentan comportamientos estables o aproximadamente estables. Por esta razón, esta piezometría, que se asocia al año 1986, se considera de carácter referencial.

La Figura 4-103 muestra la piezometría sin corrección por densidad para el sector de Soncor para la etapa preoperacional. En ella se aprecia un mínimo piezométrico en el sector sur del delta San Pedro, y aportes tanto del sector aluvial y norte del salar. La traza de las curvas de piezometría indica que la zona de Soncor, como toda la zona marginal, es una zona de convergencia de flujos regionales y de evaporación regional.

Figura 4-103. Piezometría sector Soncor, año 1986.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

- Piezometría Año 2020

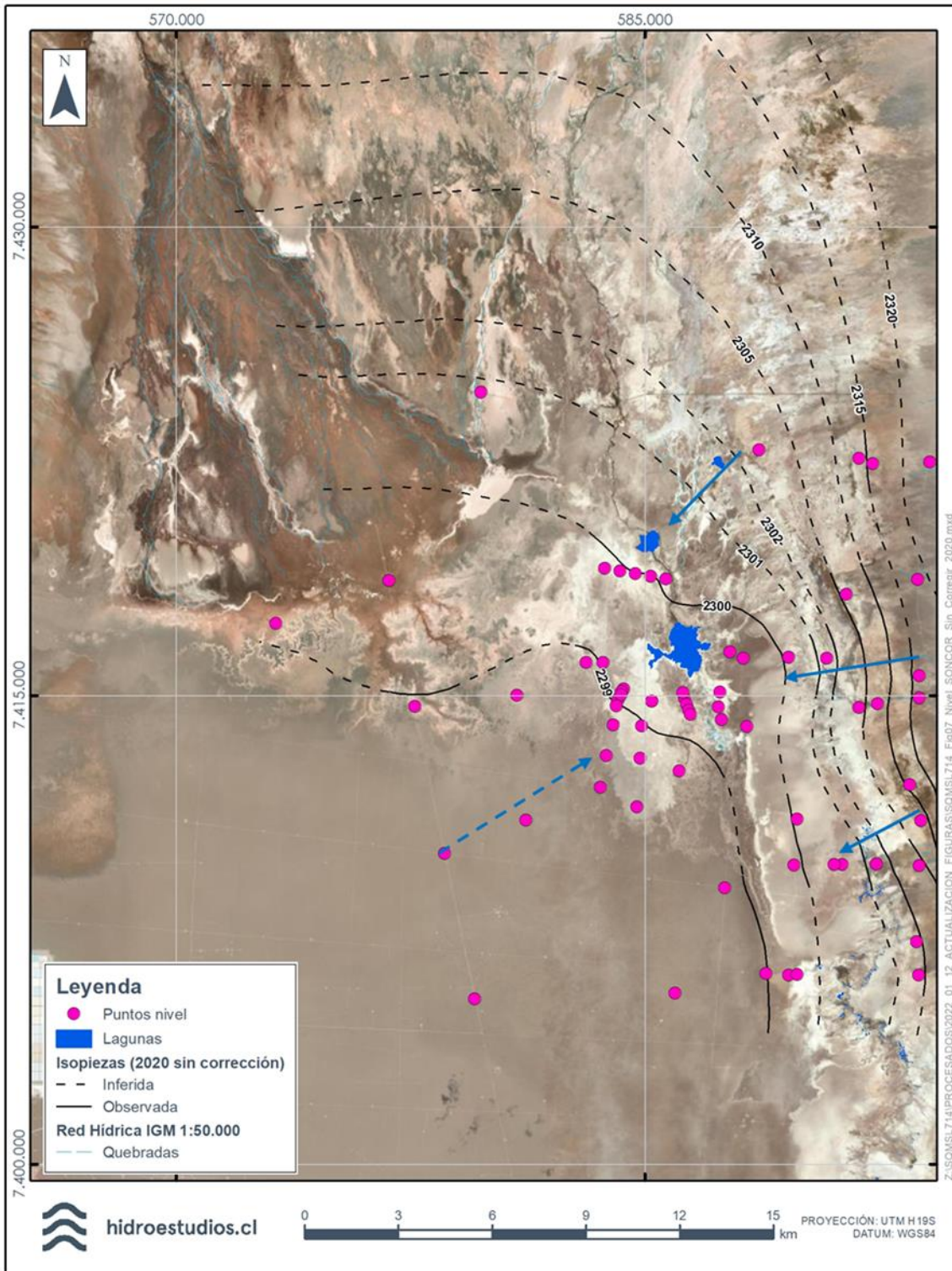
Se construyó la piezometría para el mes de junio 2020, con el fin de tener las condiciones más actualizadas posibles. La razón de realizar la piezometría a junio 2020 y no diciembre 2020, se debe a que, tanto por problemas de accesos como por la contingencia sanitaria, no se cuenta con información de niveles a diciembre 2020; además, los mapas piezométricos se han completado con algunos puntos que tienen información hasta junio de 2019.

No se registraron eventos de precipitación previos a junio 2020, por lo que los niveles piezométricos no se ven alterados por este efecto. Para esta fecha se cuenta con una buena cantidad de puntos de control en el sistema Soncor, especialmente hacia su zona sur.

La piezometría al año 2020 (Figura 4-104) muestra que el mínimo piezométrico se da al sur del área de las lagunas de Soncor, recibiendo flujos desde el norte, este, y sur. Los máximos piezométricos se observan hacia el extremo NE del área de Soncor.



Figura 4-104. Piezometría sector Soncor, año 2020.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

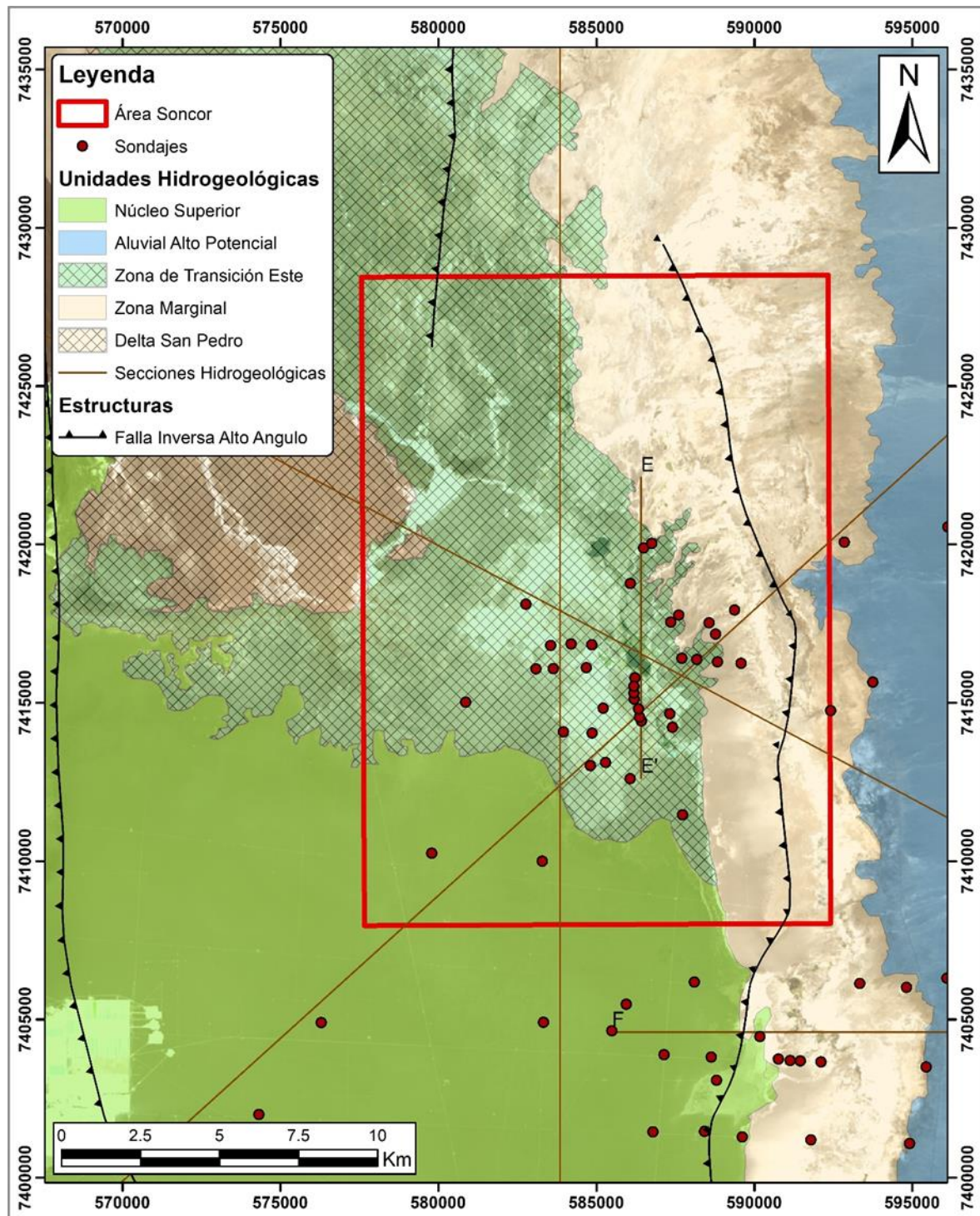
#### 4.3.7.5.1.4.1.5 Unidades Hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas presentes en el Sistema Soncor corresponden principalmente a la Zona de Transición Este, Zona Marginal y Aluvial Alto Potencial, mientras que en sus bordes es posible encontrar las Unidades hidrogeológicas del Núcleo y Delta San Pedro.

La descripción detallada de estas unidades se presenta en el acápite 4.3.7.5.1.3.5.4, mientras que la distribución en planta y en profundidad para este sector, se presentan en la Figura 4-105 y Figura 4-106.

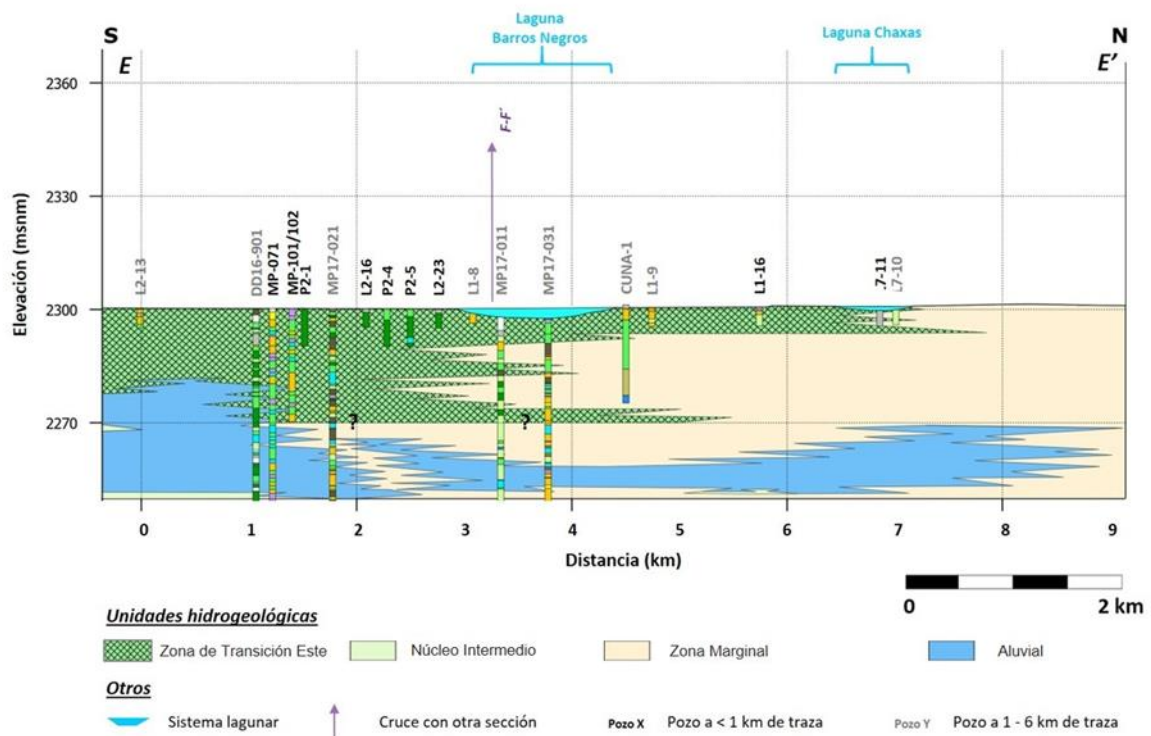


Figura 4-105. Mapa de unidades hidrogeológicas del sistema local Soncor.



Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-106. Sección hidrogeológica E-E'. Traza de la sección en Figura 4-105.



Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.1.6 Balance Hídrico

Tal como se indicó en el acápite 4.3.7.5.1.3.6, para estimar el balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama, esta se divide en zonas de balance, las cuales fueron agrupadas en función de su posición geográfica, en función de su altitud, y según el tipo de fluido analizado, el cual puede ser agua o salmuera. Para el caso particular del sistema local Soncor, una parte del área se ubica en la zona de salmuera y otra en la zona de agua. En el sistema de salmuera, las zonas de balance se clasifican en Núcleo, Zona Intermedia Norte Núcleo, Zona Norte – Salmuera y Zona Este – Salmuera, las cuales corresponden a zonas bajas. En el caso del sistema de agua, este incluye las zonas de balance San Pedro y Vilama, Toconao, Aguas Blancas y parte de Talabre, ubicadas en la zona alta; además de la Zona Norte – Agua y fracción de la Zona Este – Agua, localizada en la zona media. La ubicación de cada una de las zonas antes mencionadas se muestra en la Figura 4-107.

En el sistema local Soncor, se define como zona de balance a la sección de las zonas medias y bajas por las cuales se produce una entrada lateral al núcleo por el contorno contenido en el Área Soncor presentada en la Figura 4-107.

Con respecto a la temporalidad de los balances, se consideran los mismos 2 escenarios presentados en el balance regional: uno previo a la operación de SQM y otro considerando las actividades productivas del Titular.

Es importante señalar que, el balance a escala de cuenca se desarrolla con zonas de mayor o igual tamaño al considerado en el cálculo del sistema local Soncor, por lo cual, los flujos estimados para la zona completa deben ser distribuidos en el caso que se cuente con solo una parte de la zona inicial.

Por otro lado, en la Figura 4-108 se muestran 12 zonas de balance, de las cuales 6 corresponden a agua: San Pedro y Vilama, Toconao, Aguas Blancas, Talabre, Zona Norte - Agua y Zona Este- Agua. Estas zonas de agua podrían generar un flujo pasante hacia el sistema de salmuera, condición que se produce en la parte norte, puesto que por la zona de balance este, las descargas por evapotranspiración son mayores que las entradas.

Las zonas altas involucradas en el balance del sistema agua como aporte de flujo lateral son una parte de San Pedro y Vilama y Talabre, mientras que las zonas Toconao y Aguas Blancas presentan un aporte completo (Figura 4-108). En el caso de San Pedro y Vilama, el flujo pasa en su totalidad hacia la Zona Norte – Agua, sin embargo, antecedentes piezométricos indican que parte de éste se dirige hacia el oeste del Delta San Pedro. Por lo tanto, parte de este flujo no llega al sistema Soncor. Por su parte, el flujo pasante desde Talabre hacia la Zona Este - Agua se distribuye linealmente, donde el caudal se reparte proporcionalmente entre el tramo que aporta a la Zona Este - Agua del área de balance y el tramo total que aporta a la zona media ubicada aguas abajo (ver Figura 4-108). Para Toconao y Aguas Blancas, como todo el caudal disponible es traspasado a la Zona Norte - Agua, no se realiza una redistribución de flujos.

Las zonas medias que aportan por el norte al polígono definido para representar al sistema local Soncor son una parte de la Zona Norte - Agua, como se muestra en la Figura 4-108. Por esta razón, el flujo pasante se distribuye linealmente, donde el caudal se reparte proporcionalmente entre el tramo que aporta a la Zona Norte - Agua del área de balance y el tramo total que aporta a la zona media ubicada aguas abajo (Figura 4-108).



Tabla 4-42. Estimación de caudal disponible a Zona Este- Agua.

Zona	Sector	Longitud recarga (km)	Longitud recarga Dominio (km)	Factor de ajuste
Alta	San Pedro y Vilama	26,2	20,1	0,77
Alta	Talabre	36,1	20,5	0,57
Media	Zona Norte- Agua	38,1	30,5	0,80

Fuente: SRK Consulting (2020).

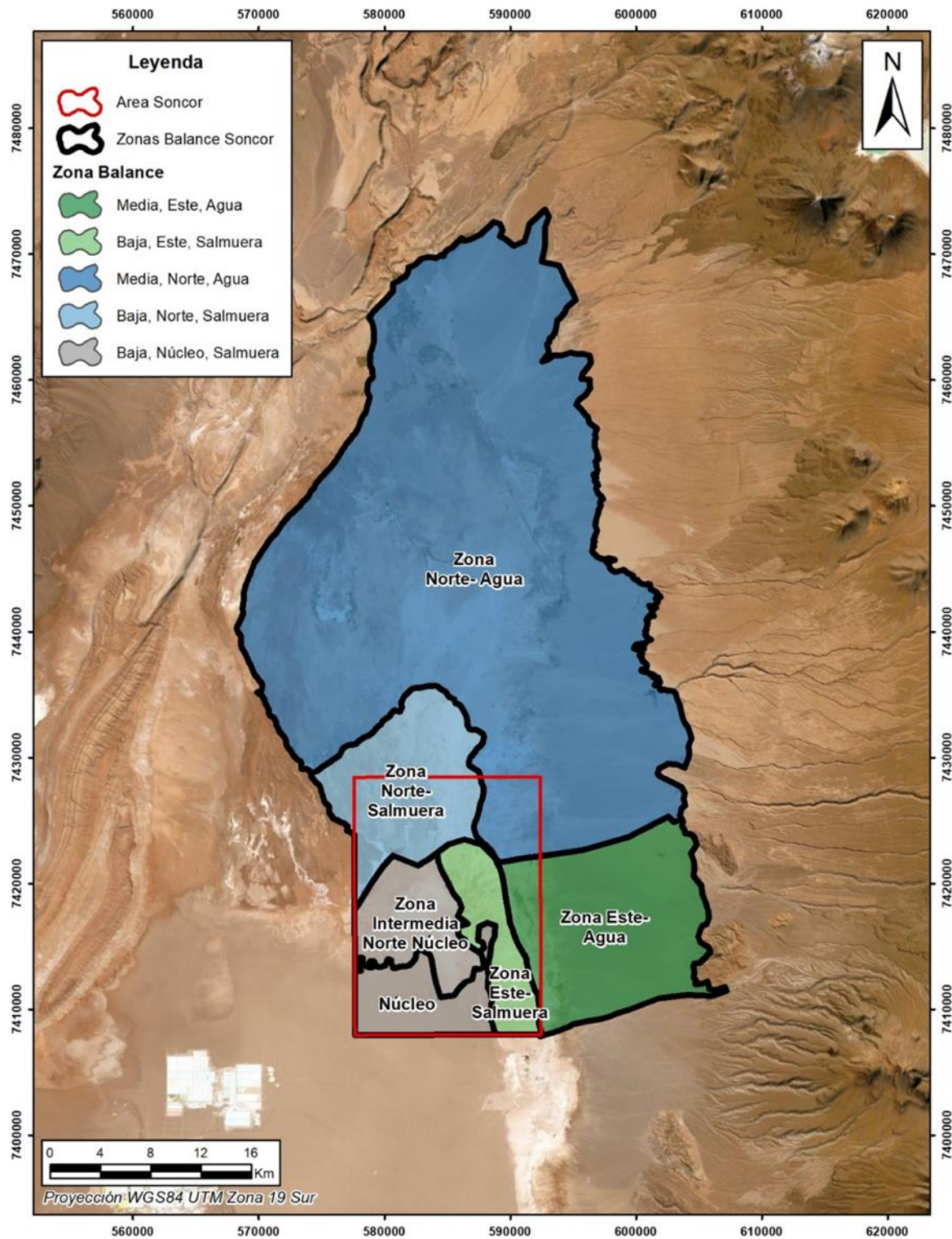
Para estimar las entradas y salidas en las zonas medias y bajas, también se deben distribuir las entradas y salidas al sistema, considerando la proporción superficial respectiva (Figura 4-108), cuyo factor utilizado para distribuir los flujos de cada zona se muestra en la Tabla 4-43.

Tabla 4-43. Factor de ajuste para estimar caudales de entrada y evaporación desde el acuífero para dominio sistema local Soncor.

Sector	Área Zona Balance Total (km <sup>2</sup> )	Área Zona Balance Soncor (km <sup>2</sup> )	Factor de ajuste
Núcleo	1.336	59	0,04
Zona Este- Agua	438	198	0,45
Zona Este- Salmuera	93	56	0,61
Zona Intermedia Norte Núcleo	91	69	0,76
Zona Norte- Salmuera	256	127	0,49

Fuente: SRK Consulting (2020).

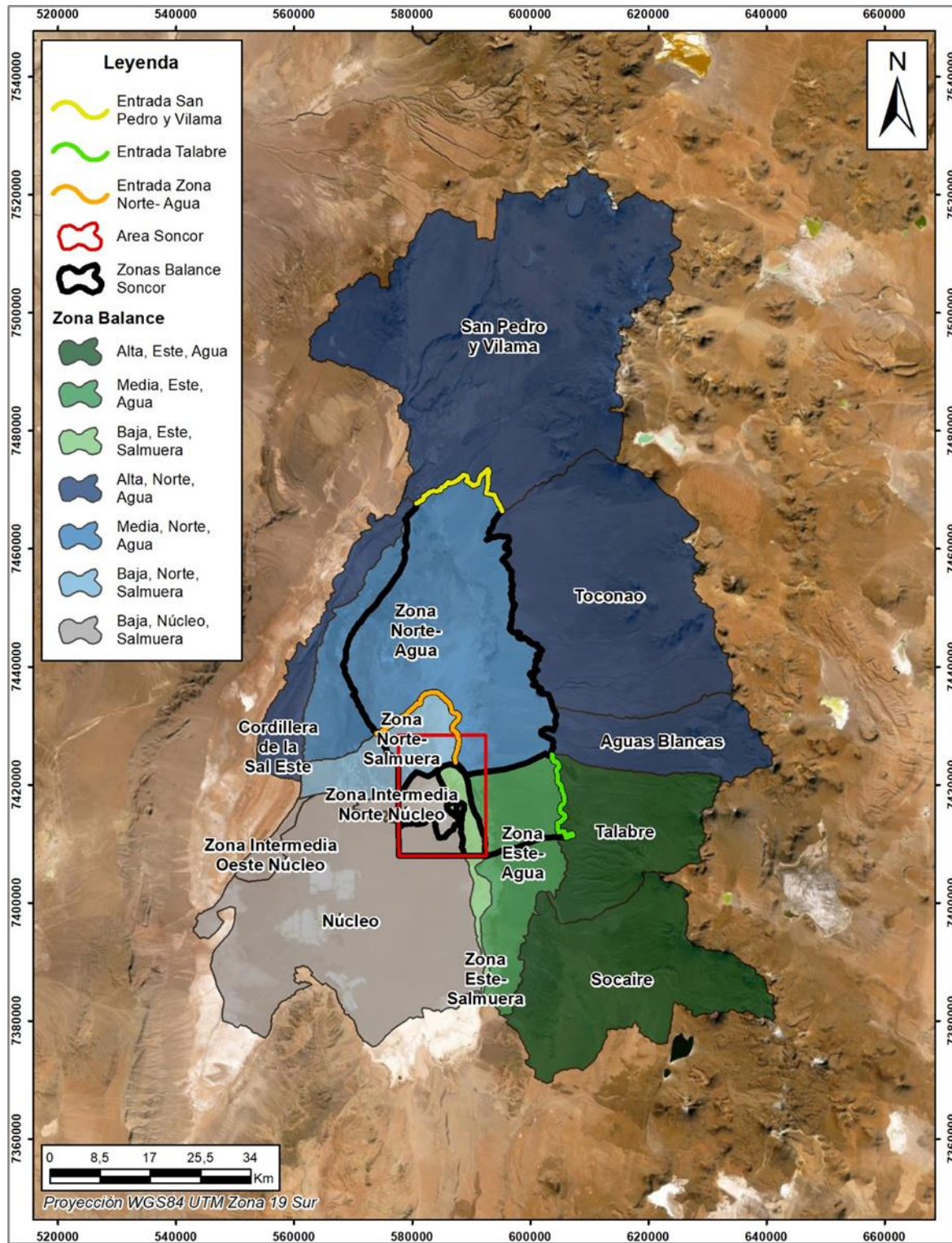
Figura 4-107. Zonas de balance de agua y salmuera utilizadas Sistema Soncor



Fuente: Basado en SRK Consulting (2020).



Figura 4-108. Zonas aportantes a zonas más bajas Sistema Soncor.



Fuente: Basado en SRK Consulting (2020).

## 4.3.7.5.1.4.1.6.1 Balance de agua

El planteamiento del balance de agua en el sistema Soncor, es igual al presentado para el caso regional en el acápite 4.3.7.5.1.3.6.1, mientras que el detalle de la obtención de cada uno de los valores se presenta en el Anexo 5.3: Modelo Hidrogeológico Conceptual del Sistema Soncor.

Considerando lo anterior, en este capítulo se entregan los resultados de balance obtenidos para el sector Soncor, los cuales indican que en la zona alta norte (San Pedro y Vilama, Toconao y Aguas Blancas) es donde ocurre la mayor recarga al acuífero (1.915 L/s). Desde esta zona el agua fluye por el acuífero aluvial y, lo que no es evaporado, se traspasa hacia la zona media (1.662 L/s). Esto mismo ocurre hacia la zona baja, donde finalmente se estima un flujo de traspaso de 194 L/s. Respecto a la zona alta este, el valor que recarga al sistema es igual a 190 L/s, pasando 174 L/s hacia la zona media, lo cual se evapora completamente en la zona marginal.

Cabe señalar que, para la estimación de las entradas y las salidas de la Zona Norte- Salmuera, si bien la superficie considerada en la zona de balance de Soncor es cercana a la mitad de la zona de balance total, la parte oeste se ubica en el Delta de San Pedro, un sector caracterizado por presentar baja permeabilidad y bajas descargas por evaporación, por lo cual, se considera que el flujo pasante a la zona más baja ingresa completamente por la zona de balance de Soncor.

Tabla 4-44. Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo preoperacional Sistema Soncor.

SECTOR	ZONAS DE BALANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
		Recarga Directa	Recarga Lateral	Escorrentía	Recarga desde otras zonas	Evaporación desde el acuífero	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Disponible para descarga hacia otras zonas	Variación de almacenamiento
N	Alta-Norte-Agua	268	129	1.518		0	7	246	0	1.662	0
	Media-Norte-Agua	225	0	84	1.662	207	274	1.251	0	239	0
	Baja-Norte-Salmuera	31	0	3	239	79	0	0	0	194	0
E	Alta-Este-Agua	23	12	155		0	0	16	0	174	0
	Media-Este-Agua	50	0	25	174	305	12	49	0	0	-116
<b>TOTAL</b>		<b>597</b>	<b>141</b>	<b>1.785</b>		<b>591</b>	<b>292</b>	<b>1.562</b>	<b>0</b>	<b>2.269</b>	<b>-116</b>

Fuente: SRK Consulting (2020).

Con respecto al período operacional, las principales diferencias en el sistema de agua están dadas por las extracciones de agua realizadas por SQM. En el caso de las entradas, como se estiman con base en la distribución espacial de las precipitaciones, la cual representa una condición en el largo plazo, no se producen modificaciones en los períodos evaluados, excepto en la zona baja donde la disminución de los niveles en el periodo operacional ha implicado una disminución en la evaporación desde el acuífero.

Tabla 4-45. Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo operacional Sistema Soncor.

SECTOR	ZONAS DE BALANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
		Recarga Directa	Recarga Lateral	Escorrentía	Recarga desde otras zonas	Evaporación desde el acuífero	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Disponible para descarga hacia otras zonas	Variación de almacenamiento
N	Alta-Norte-Agua	268	129	1.518		0	7	246	0	1.662	0
	Media-Norte-Agua	225	0	84	1.662	207	274	1.251	0	239	0
	Baja-Norte-Salmuera	31	0	3	239	58	-	0	0	216	0
E	Alta-Este-Agua	23	12	155		0	-	16	0	174	0
	Media-Este-Agua	50	0	25	174	305	12	49	56	0	-172
<b>TOTAL</b>		<b>597</b>	<b>141</b>	<b>1.785</b>		<b>570</b>	<b>292</b>	<b>1.562</b>	<b>56</b>	<b>2.291</b>	<b>-172</b>

Fuente: SRK Consulting (2020).

#### 4.3.7.5.1.4.1.6.2 Laguna Barros Negros

Para el balance del sistema lagunar de Soncor (Figura 4-90), se considera como referencia a la laguna Barros Negros, debido a que se ubica más cerca de las actividades mineras que se desarrollan en el núcleo, por lo que los efectos potenciales de las extracciones se identificarían antes y en mayor magnitud, y, por lo tanto, más vulnerable que la laguna Chaxa.

En la Figura 4-109 se muestra un esquema conceptual de los flujos de entrada y salida a las lagunas Barros Negros, a partir del cual se obtiene que el balance hídrico está dado por la expresión:

$$\Delta S = Q_{ENTRADA} + Pp - Q_{EVAP} - Q_{INFILTRACION} - Q_{DESBORDES}$$

Donde:

$\Delta S$  = Variación en el almacenamiento en la laguna Barros Negros (L/s).

$Q_{ENTRADA}$  = Caudal de entrada en la laguna Barros Negros dada por datos de aforo Puente San Luis (L/s).



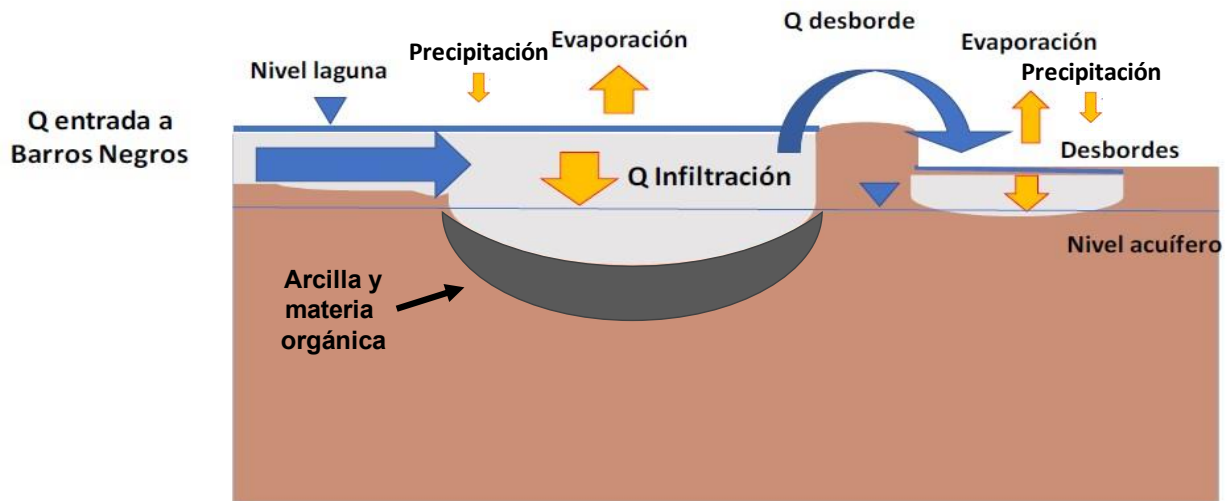
$Pp$  = Recarga por precipitaciones en la laguna Barros Negros (L/s).

$Q_{EVAP}$  = Caudal de salida por evaporación desde lámina libre en la laguna Barros Negros (L/s).

$Q_{INFILTRACION}$  = Caudal de salida por infiltración desde la laguna Barros Negros (L/s).

$Q_{DESBORDES}$  = Caudal de salida por eventos de desborde hacia el sector Cola de Pez y Desborde Sur (L/s).

Figura 4-109. Esquema conceptual de la dinámica de flujos de entrada y salida del sistema lagunar Barros Negros.



Fuente: SQM, 2021.

Cabe destacar que la elección de utilizar los registros aforados en Puente San Luis se sustenta en que este tiene una mayor discretización (diaria) y, por lo tanto, implica una disminución en la incertidumbre de las mediciones.

Los términos  $Q_{DESBORDES}$  son los que tienen menor discretización temporal (mediciones mensuales desde mayo 2011, con algunos gaps de información de hasta 6 meses). Con el fin de tener una discretización temporal diaria y una mayor precisión en los cálculos, las componentes  $Q_{INFILTRACION}$  y  $Q_{DESBORDES}$  se agrupan como caudal excedente ( $Q_{EXCEDENTE}$ ) obteniéndose la siguiente expresión:

$$Q_{EXCEDENTE} = Q_{ENTRADA} + Pp - Q_{EVAP} - \Delta S$$

El detalle de la metodología utilizada para cuantificar cada uno de los componentes del balance de la Laguna Barros Negros se presenta en el Anexo 5.3: Modelo Hidrogeológico Conceptual del Sistema Soncor, mientras que los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4-46.

Tabla 4-46. Valores promedio mensuales para componentes del balance en laguna Barros Negros.

Mes		Entradas (L/s)			Salidas (L/s)			$\Delta S$ (L/s)
	Precipitación promedio mensual	Aforo promedio mensual	Total, entradas	Evaporación promedio mensual laguna Barros Negros	Q Infiltración promedio mensual desde Barros Negros	Q Excedente promedio mensual (desbordes)	Total, salidas	
Ene	1,8	134,2	136,0	79,0	4,2	64,0	147,1	-11,1
Feb	6,4	153,5	159,9	76,3	4,2	71,3	151,8	8,1
Mar	1,0	144,2	145,2	74,2	4,2	68,6	147,0	-1,8
Abr	0,2	151,7	151,8	64,1	4,2	83,3	151,6	0,2
May	0,2	156,5	156,7	49,7	4,2	106,7	160,6	-3,9
Jun	0,5	167,3	167,8	40,9	4,2	128,0	173,1	-5,3
Jul	0,4	165,9	166,3	41,3	4,2	129,2	174,7	-8,4
Ago	0,0	165,0	165,0	51,8	4,2	117,0	173,0	-8,0
Sept	0,0	155,8	155,8	66,3	4,2	100,3	170,8	-15,1
Oct	0,0	141,5	141,5	77,7	4,2	77,6	159,6	-18,0
Nov	0,0	133,6	133,6	84,9	4,2	60,9	149,9	-16,3
Dic	0,0	129,7	129,8	84,5	4,2	53,1	141,8	-12,1
<b>Promedio</b>	<b>0,9</b>	<b>149,9</b>	<b>150,8</b>	<b>65,9</b>	<b>4,2</b>	<b>88,3</b>	<b>158,4</b>	<b>-7,6</b>

Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.2 Sistema Ambiental Aguas de Quelana

##### 4.3.7.5.1.4.2.1 Parámetros hidráulicos

De los 631 puntos con información de parámetros hidráulicos, 35 ensayos se ubican dentro del Sistema de Aguas de Quelana.

En particular, los tipos de ensayo realizados para estimar la conductividad hidráulica en este sector corresponde a 32 pruebas de bombeo, 1 prueba de packer y 2 ensayos de permeabilidad realizados a partir de muestras obtenidas de calicatas. Las mediciones asociadas a cada pozo y unidad geológica se muestran en la **Tabla 4-47**. La ubicación de los puntos con información se muestra en la Figura 4-110.

Para la unidad de Cloruros Superiores, se cuenta con 6 pruebas de bombeo y 1 prueba packer que entregan valores de conductividad hidráulica entre 18 m/d y 1340 m/d.

Para la unidad de Sulfatos, se cuenta con 12 pruebas de bombeo packer y 2 ensayos de permeabilidad realizados a partir de muestras obtenidas de calicatas, que entregan valores de conductividad hidráulica entre 3x10<sup>-3</sup> m/d y 850 m/d.

En la unidad Carbonatos con Limos, se tiene sólo 1 prueba de bombeo que entrega un valor de conductividad hidráulica de 21 m/d.

Finalmente, para la unidad de Depósitos No Consolidados, se cuenta con 13 pruebas de bombeo que entregan valores de conductividad hidráulica entre 1,2 m/d y 35,7 m/d.

Estas estimaciones son consistentes con el rango descrito a nivel regional (Tabla 4-28). Es importante mencionar que casi todas las pruebas locales fueron realizadas en pozos cortos, y, por lo tanto, podrían responder a procesos de karstificación superficial debido a la infiltración de aguas menos salobres.

menos salobres.

**Tabla 4-47. Valores de conductividad hidráulica por unidad geológica en el Sistema Aguas de Quelana.**

Pozo	Tipo de ensayo	K (m/d)	Unidad Geológica
L4-8	Prueba de bombeo	20.8	Carbonatos Con Limos
1910	Prueba de bombeo	31	Cloruros Superiores
PBE-19B	Prueba de bombeo	1340.9	Cloruros Superiores
PBE-27B	Prueba de bombeo	192.2	Cloruros Superiores
PBE-34B	Prueba de bombeo	360.7	Cloruros Superiores
PBE-41B	Prueba de bombeo	82.6	Cloruros Superiores
PBE-47B	Prueba de bombeo	17.8	Cloruros Superiores
XP-0125	Packer	82.4	Cloruros Superiores
CA-2015	Prueba de bombeo	8	Depósitos No Consolidados
Camar-2	Prueba de bombeo	21	Depósitos No Consolidados
L3-5	Prueba de bombeo	4.6	Depósitos No Consolidados
L4-17	Prueba de bombeo	35.7	Depósitos No Consolidados
L5-6	Prueba de bombeo	6.9	Depósitos No Consolidados
S-5	Prueba de bombeo	6.4	Depósitos No Consolidados
S-6	Prueba de bombeo	25	Depósitos No Consolidados
S-6b	Prueba de bombeo	24.5	Depósitos No Consolidados
Socaire 5	Prueba de bombeo	16.7	Depósitos No Consolidados
Socaire-5-2009	Prueba de bombeo	13.8	Depósitos No Consolidados
SP-1	Prueba de bombeo	9	Depósitos No Consolidados
SP-3	Prueba de bombeo	1.19	Depósitos No Consolidados

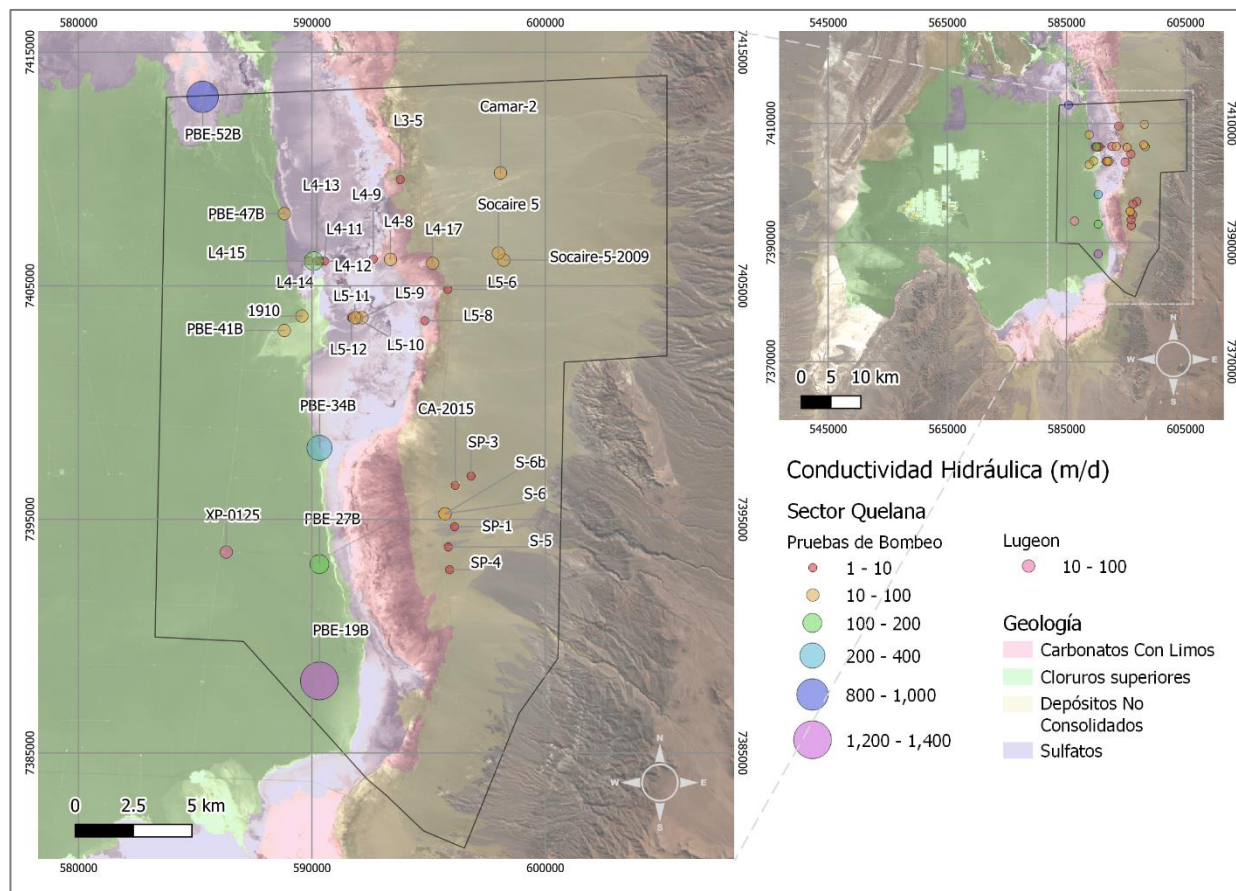
Tabla 4-47. Valores de conductividad hidráulica por unidad geológica en el Sistema Aguas de Quelana.

Pozo	Tipo de ensayo	K (m/d)	Unidad Geológica
SP-4	Prueba de bombeo	7.5	Depósitos No Consolidados
F2	Calicatas	0.003	Sulfatos
GD02	Calicatas	0.005	Sulfatos
L4-11	Prueba de bombeo	3.9	Sulfatos
L4-12	Prueba de bombeo	3.9	Sulfatos
L4-13	Prueba de bombeo	3.9	Sulfatos
L4-14	Prueba de bombeo	143.9	Sulfatos
L4-15	Prueba de bombeo	6.9	Sulfatos
L4-9	Prueba de bombeo	4.6	Sulfatos
L5-10	Prueba de bombeo	18.5	Sulfatos
L5-11	Prueba de bombeo	43.2	Sulfatos
L5-12	Prueba de bombeo	1.7	Sulfatos
L5-8	Prueba de bombeo	4.2	Sulfatos
L5-9	Prueba de bombeo	23.4	Sulfatos
PBE-52B	Prueba de bombeo	850	Sulfatos

Fuente: SQM, 2021.



Figura 4-110. Distribución espacial de valores de conductividad hidráulica estimados en unidades geológicas del sistema Aguas de Quelana.



Fuente: SQM, 2021.

En cuanto al almacenamiento, la estimación para el Sistema de Aguas de Quelana se realizó a partir de 11 pruebas de bombeo. Las mediciones asociadas a cada pozo y unidad geológica se muestran en la Tabla 4-48. La ubicación de los puntos con información se muestra en la Figura 4-111. Para la unidad de Cloruros Superiores, se cuenta con 4 pruebas que entregan valores de almacenamiento en el rango  $1 \times 10^{-3}$  a  $2 \times 10^{-1}$ . Para la unidad de Sulfatos, se cuenta con 1 prueba que entrega un valor de 0,04. Por último, para la unidad de Depósitos No Consolidados, se cuenta con 6 pruebas de bombeo, que entregan valores entre  $1,8 \times 10^{-3}$  y  $1 \times 10^{-1}$ . Estas estimaciones son del rango descrito a nivel regional (Tabla 4-28).

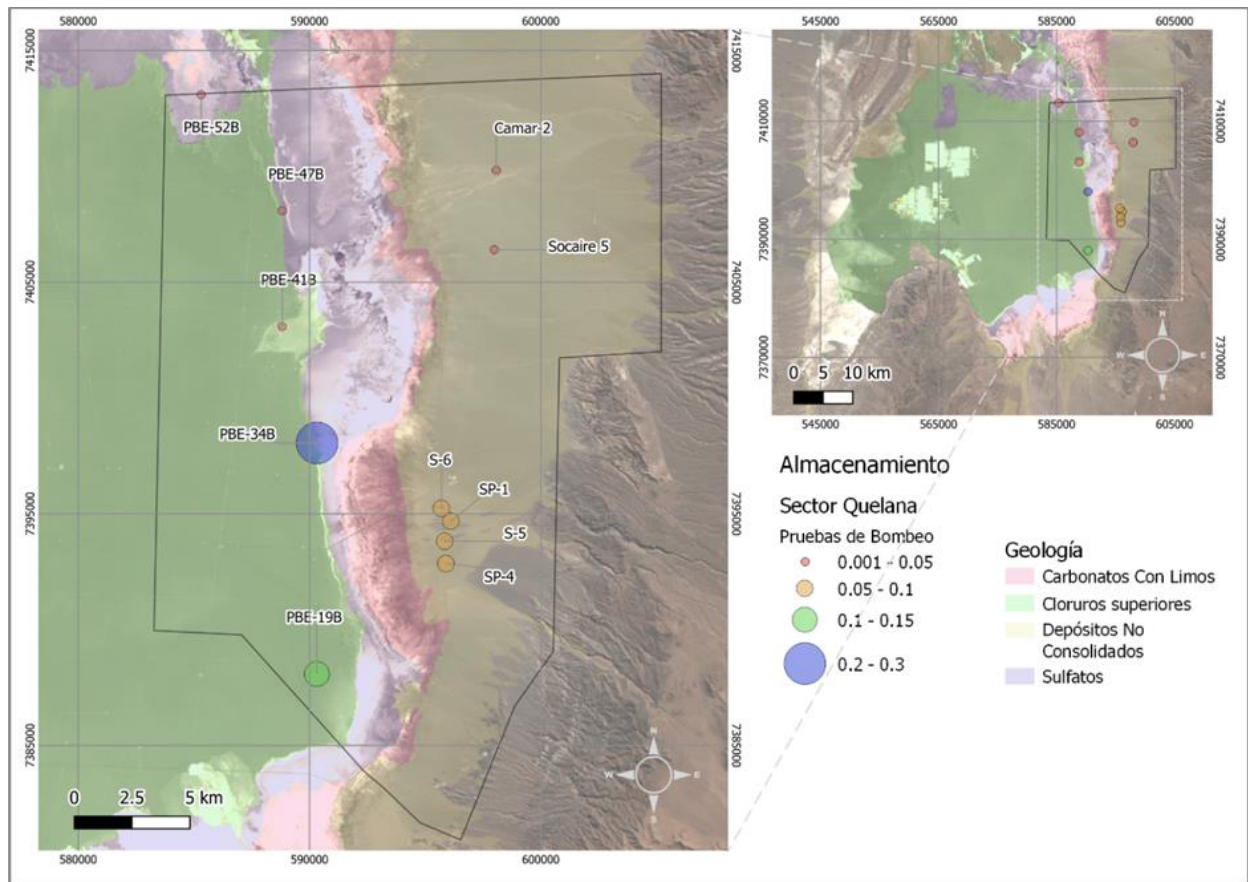
Tabla 4-48. Valores de almacenamiento por unidad geológica en el Sistema Aguas de Quelana.

Pozo	Tipo de ensayo	S	Unidad Geológica
PBE-19B	Prueba de bombeo	0,15	Cloruros Superiores
PBE-34B	Prueba de bombeo	0,21	Cloruros Superiores
PBE-41B	Prueba de bombeo	0,03	Cloruros Superiores
PBE-47B	Prueba de bombeo	0,001	Cloruros Superiores

Tabla 4-48. Valores de almacenamiento por unidad geológica en el Sistema Aguas de Quelana.

Camar-2	Prueba de bombeo	0,002	Depósitos No Consolidados
S-5	Prueba de bombeo	0,1	Depósitos No Consolidados
S-6	Prueba de bombeo	0,1	Depósitos No Consolidados
Socaire 5	Prueba de bombeo	0,0018	Depósitos No Consolidados
SP-1	Prueba de bombeo	0,1	Depósitos No Consolidados
SP-4	Prueba de bombeo	0,1	Depósitos No Consolidados
PBE-52B	Prueba de bombeo	0,04	Sulfatos

Figura 4-111. Distribución espacial de valores de almacenamiento estimados en unidades geológicas del sistema Aguas de Quelana.



Fuente: SQM, 2021.

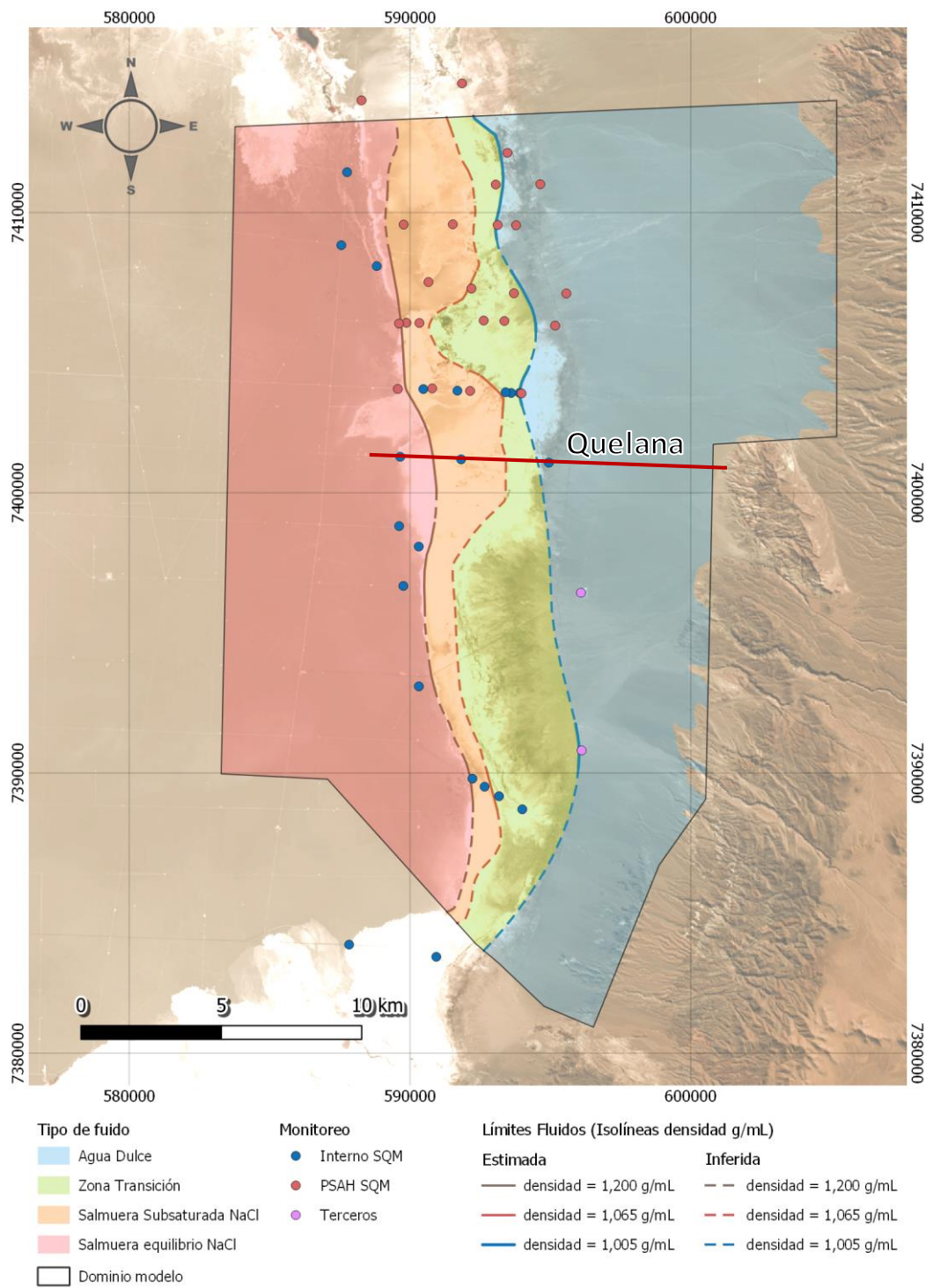
#### 4.3.7.5.1.4.2.2 Interfaz Salina

##### 4.3.7.5.1.4.2.2.1 Reconocimiento de zonas en superficie

De los 148 puntos con información de densidad utilizados para el reconocimiento regional de la interfaz salina en superficie, 46 se encuentran dentro del sector del Sistema Ambiental Agua de Quelana.

El detalle de la ubicación de estos puntos y de los límites locales se presenta en la Figura 4-112, mientras que los criterios de reconocimiento son los mismos presentados en el acápite 4.3.7.5.1.3.1.

Figura 4-112. Ubicación puntos de monitoreo e isolíneas de densidad que indican afloramiento interfaz salina en sistema Aguas de Quelana.



Fuente: SQM, 2021.

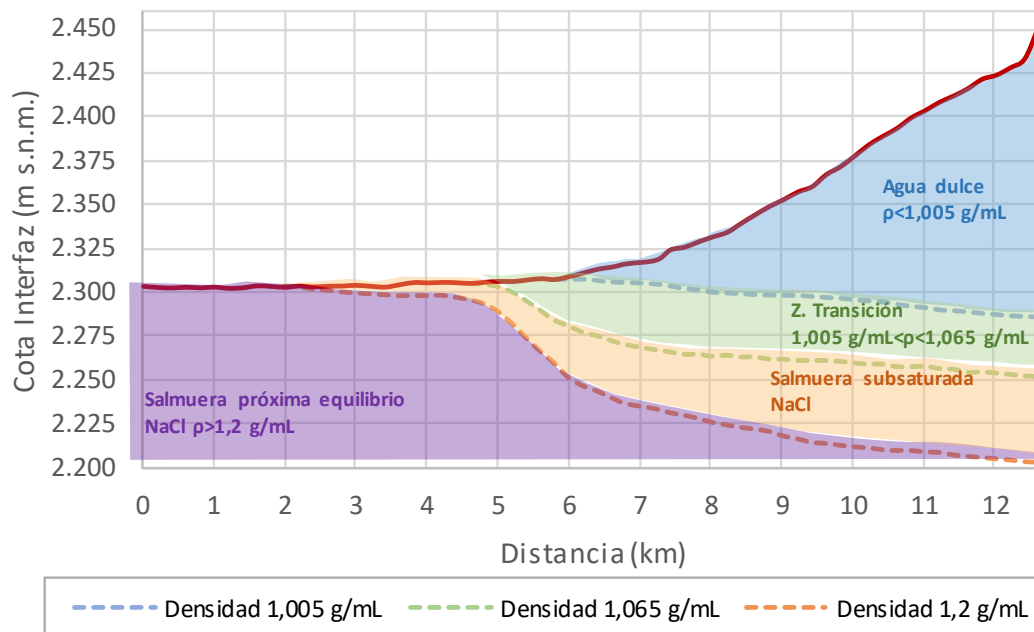


4.3.7.5.1.4.2.2.2 Reconocimiento de interfaz salina en profundidad

En base a la información descrita en el acápite 0, para delimitar la interfaz salina en profundidad, se analizó información de TEM y perfilajes de CE en 3 pozos del sistema Aguas de Quelana (pozos L4-3, cuña 4 y cuña 5, Figura 4-52), lo que permitió la elaboración un perfil que se muestran en la Figura 4-113 que permite conocer la pendiente, forma y volumen de la interfaz salina en el área de Aguas de Quelana. La ubicación de este perfil puede verse en la Figura 4-112.

Se observa que la interfaz presenta un volumen de zona transición similar al de Salmuera subsaturada en NaCl. En torno a los 10 Km desde el comienzo del perfil, la base de la interfaz se encuentra a unos 2200 m s.n.m. y el techo a unos 2280 m s.n.m.

Figura 4-113 Perfil 2D para la caracterización de pendiente, forma, profundidad y volumen de la interfaz salina en el sistema Aguas de Quelana.



Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.2.3 Cuerpos de agua superficiales

##### 4.3.7.5.1.4.2.3.1 Cuerpos Lagunares

Este sistema lo componen un conjunto de lagunas de poca profundidad, ubicadas sobre una zona de topografía plana, al pie de los depósitos aluviales que conectan con las Quebradas Camar y El Toro, su morfología es alargada y se alinea en paralelo a la interfaz salina. El desarrollo de estos cuerpos de agua tiene directa relación con el afloramiento del agua salobre subterránea proveniente desde el este, al encontrarse con la salmuera ubicada al oeste, en el núcleo.

Para este sector, al no reconocerse un cuerpo lagunar único y de gran extensión, se ha optado por utilizar la delimitación presentada en el capítulo 5.6 Hidrología, Hidrogeología y Comportamiento Hidráulico de las Lagunas Marginales del Salar del EIA Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama (SQM, 2005), la cual se muestra en la Figura 4-114.

Adicionalmente, en el estudio realizado por SGA (2015) se analiza la superficie lagunar con imágenes satelitales LANDSAT para el periodo 1984 – 2014, indicando que los cuerpos de aguas permanentes son muy pequeños en comparación a los cuerpos de agua inestables (no permanentes). Además, las áreas de inundación son mayores en invierno y se concentran mayormente al oeste del sistema.

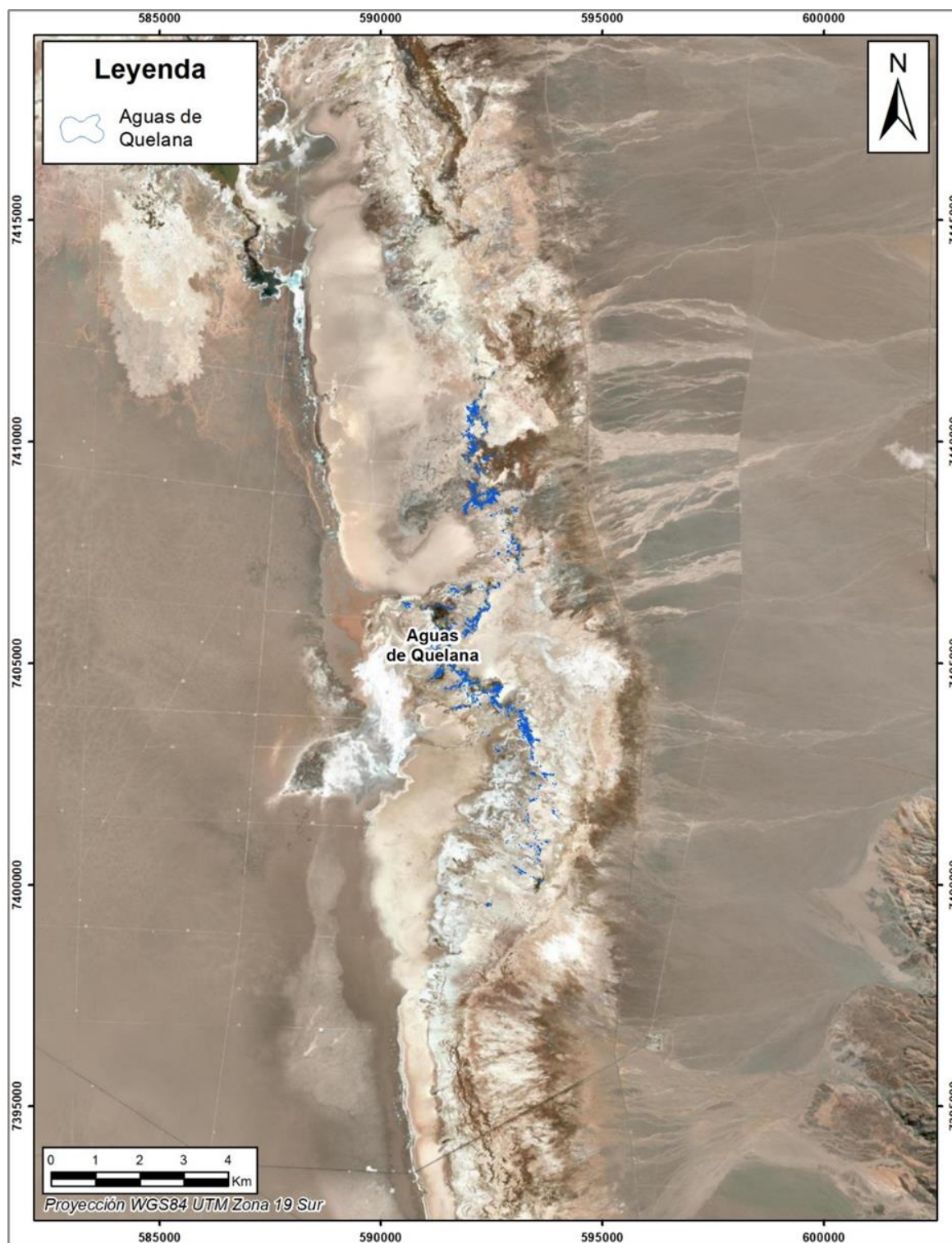
Es importante señalar que, como se indica en el Informe N.º 27 del PSAH Proyecto Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama (SQM, 2020), en el marco del procedimiento F-041-2016 de la Superintendencia del Medio Ambiente, el Titular presentó el informe “Análisis de la evolución de las áreas lagunares en el Salar de Atacama”<sup>4</sup>. En este estudio se realizó un análisis estadístico a partir de las imágenes satelitales de alta resolución tomadas los meses de abril de cada año y se estimó la superficie de este sistema de manera preliminar (Figura 4-115), obteniendo como resultado que presenta “una alta variabilidad en los resultados con respecto a la tasa de crecimiento del área de la laguna, lo que se produciría por el reducido número de observaciones”. Además, señala que “se observa una alta desviación estándar en los resultados que se condice con la inestabilidad de este sistema”. Finalmente, establece que “con los datos disponibles se concluye que no es posible rechazar la hipótesis nula de que el área no presente tendencia”. Cabe destacar también que, para el cálculo de estas superficies, no se cuenta con puntos de control en terreno.

Como un ejemplo del comportamiento variable a través de los años de las superficies lagunares, sin un patrón claro, se tiene la comparación de las superficies estimadas para el año 2015 y 2019, que representa el máximo y mínimo de la serie reportada, correspondiendo el área del 2015 a un 13% del área del 2019, es decir, en 4 años varió más de 7 veces la superficie lacustre, todo debido a causas naturales.

---

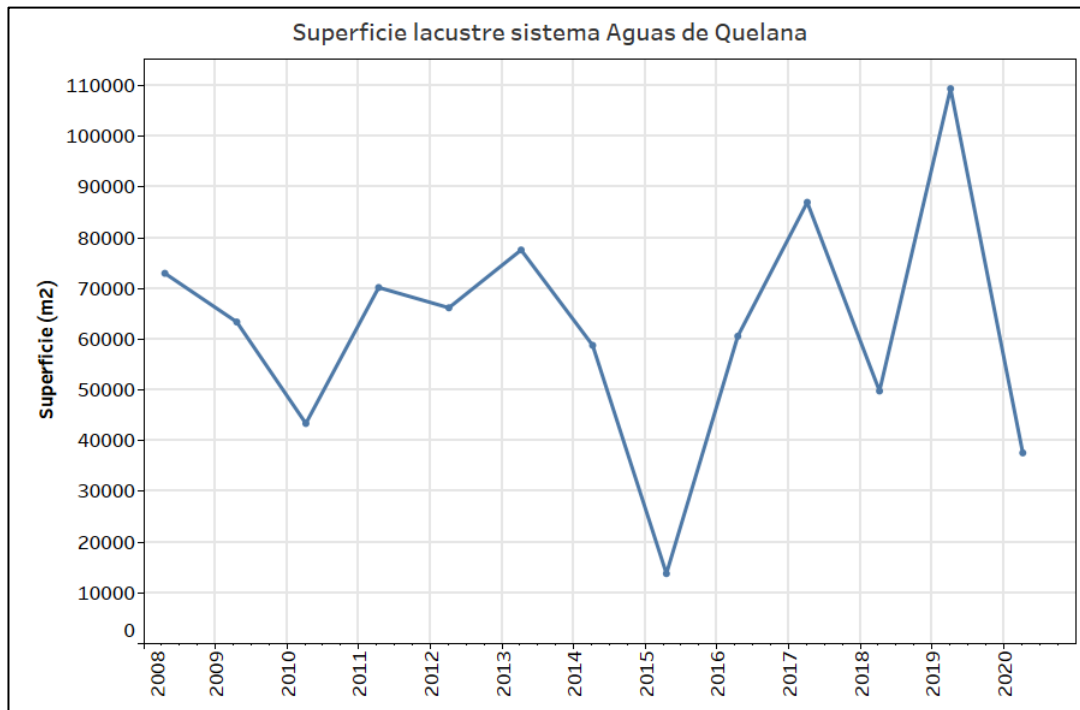
<sup>4</sup> Apéndice 1.9 del Programa de Cumplimiento Refundido entregado con fecha 30 de noviembre de 2020.

Figura 4-114. Definición de cuerpos lagunares Aguas de Quelana.



Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-115: Evolución de cobertura de cuerpos de agua.



Fuente: Informe N°27 del PSAH proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el salar de atacama (SQM, 2021).

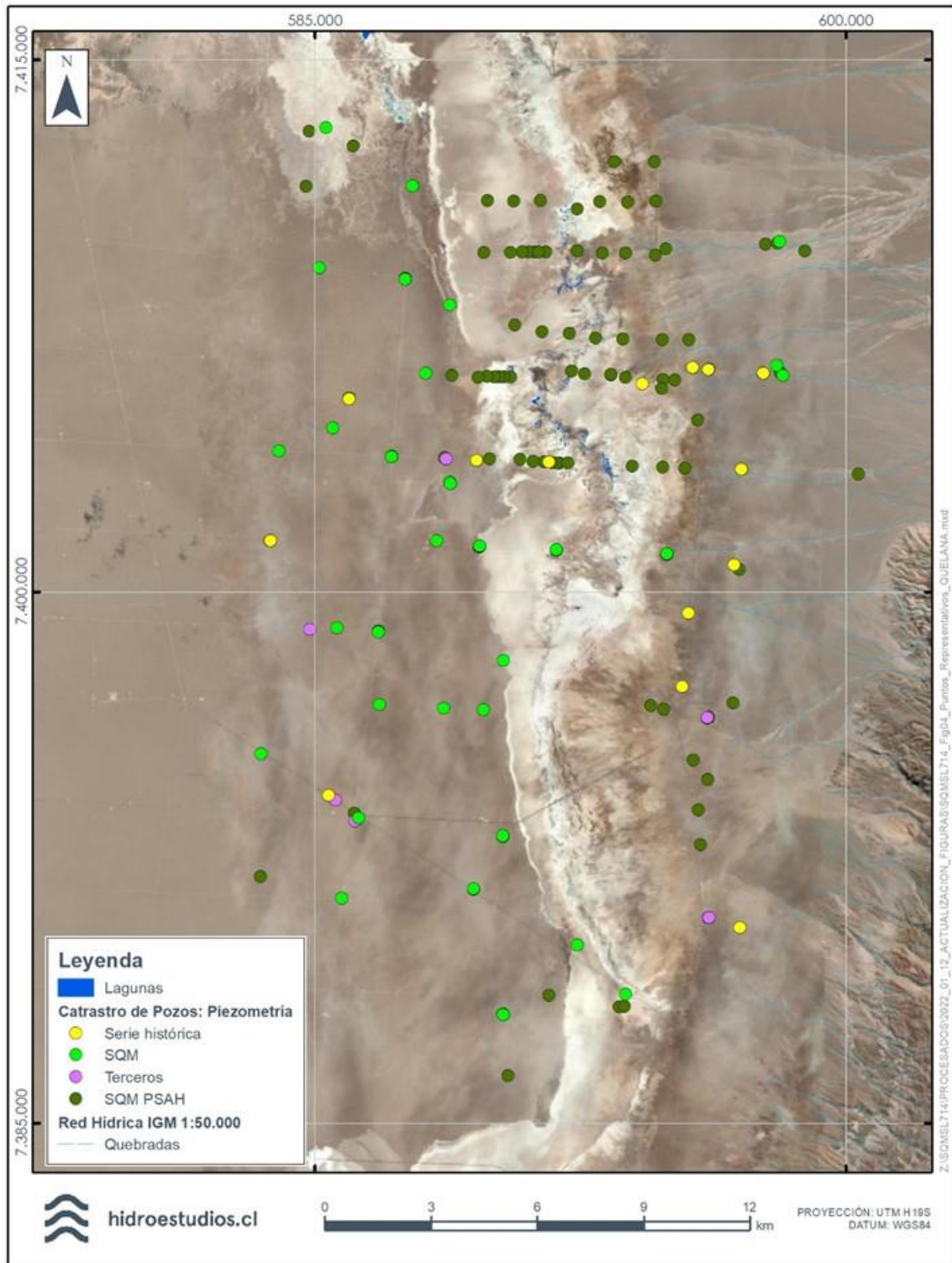
#### 4.3.7.5.1.4.2.4 Niveles de agua subterránea y piezometría

De los 509 puntos con nivel piezométrico a escala regional, 163 se encuentran en el sector del Sistema local de Aguas de Quelana. Su ubicación y origen, se presenta en la Figura 4-116.

Al igual que en el caso regional, con el fin analizar el comportamiento de los niveles piezométricos a lo largo del tiempo en el Sistema Aguas de Quelana, a continuación, se presenta la evolución de una serie de pozos alineados de Oeste a Este representativos para los distintos tipos de fluidos (Figura 4-117).

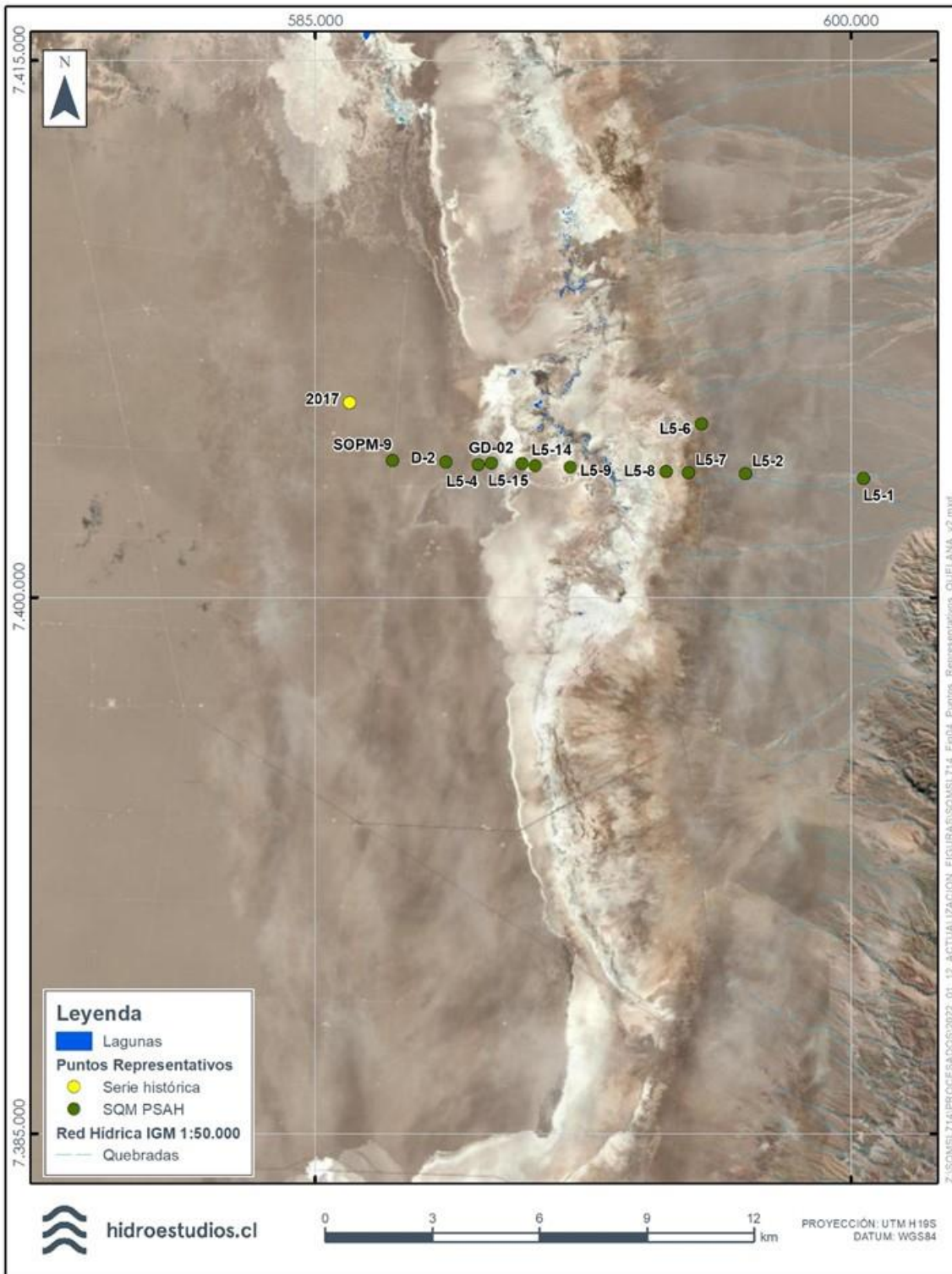


Figura 4-116 Pozos con información de nivel piezométrico Aguas de Quelana



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-117 Puntos representativos de nivel piezométrico Aguas de Quelana



Fuente: Hidroestudios, 2021.

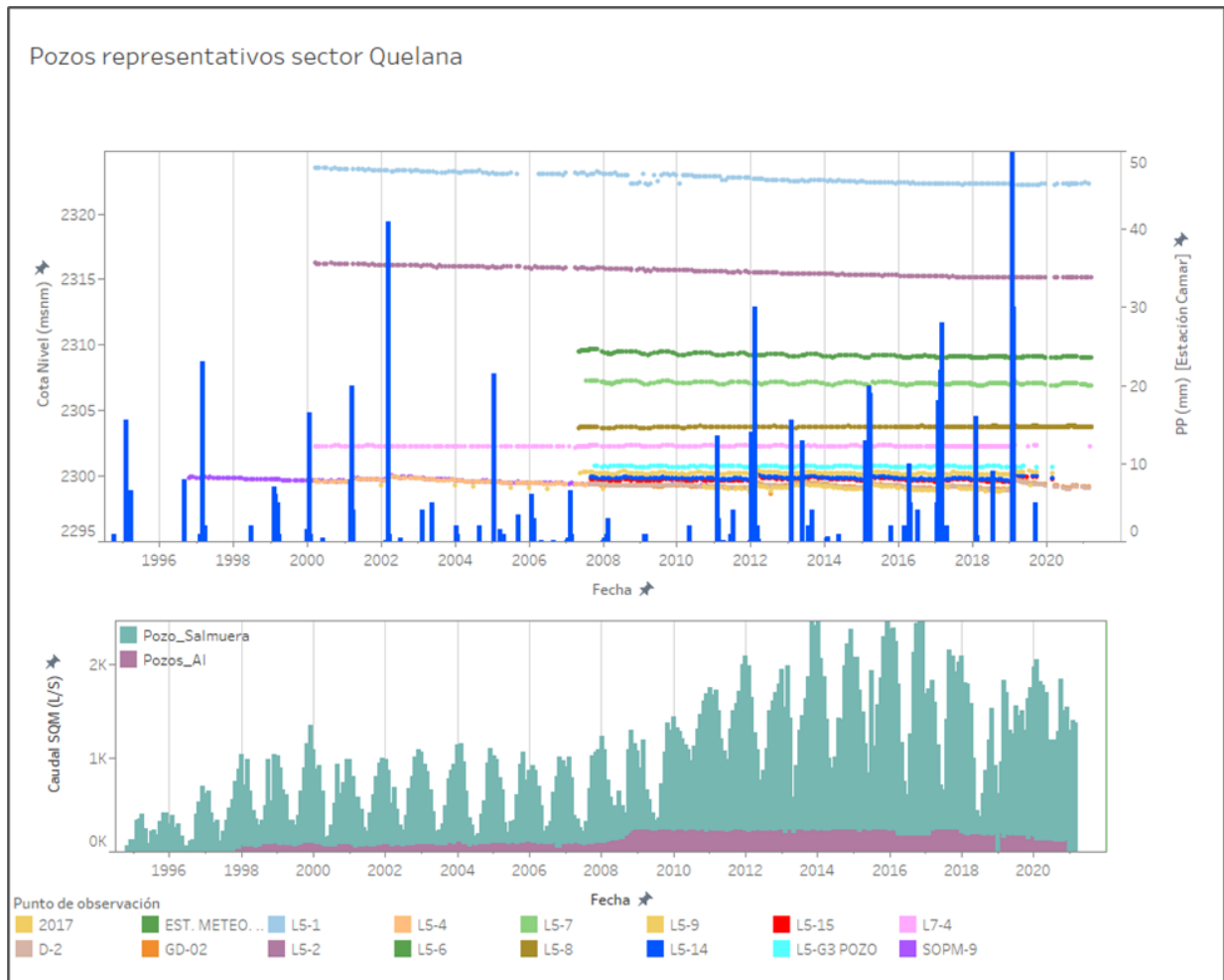
A partir de la Figura 4-118, se observan claramente los distintos comportamientos de los niveles según su distribución espacial. Los pozos L5-1 y L5-2 habilitados en el sistema agua se encuentran en plena planicie Aluvial; por lo tanto, su comportamiento esté influenciado por el efecto de la extracción del pozo de agua cercano (Socaire-5B). El nivel de estos pozos se encuentra a 23 y 15 metros respectivamente por encima del nivel de los pozos que se ubican más hacia el oeste en este Sector (SOPM-9).

Los pozos L5-6, L5-7, L5-8 y L5-G3, habilitados en el sistema agua situados en la zona marginal y en el límite con la planicie aluvial, dan cuenta que los dos primeros, muestran una oscilación estacional más marcada que los dos últimos. El comportamiento de los puntos de observación L5-8 y L5-G3 sugiere que el medio geológico en el que se encuentran atenúa los efectos atmosféricos, aun cuando a una menor escala es posible ver la oscilación estacional de sus niveles (Figura 4-119).

Los pozos de observación del sector de Quelana más representativos para mostrar el comportamiento del sistema salmuera son: L5-9, L5-14, L5-15, GD-02, SOPM-9, L5-4, D-2, 2017 (Figura 4-118 y Figura 4-119). En ellos se observa una tendencia general al descenso debido a la extracción de salmuera en el núcleo, con variaciones propias del esquema de operación de dichas extracciones. Además, en estos niveles se observa una respuesta inmediata de las precipitaciones ocurridas en el sector.

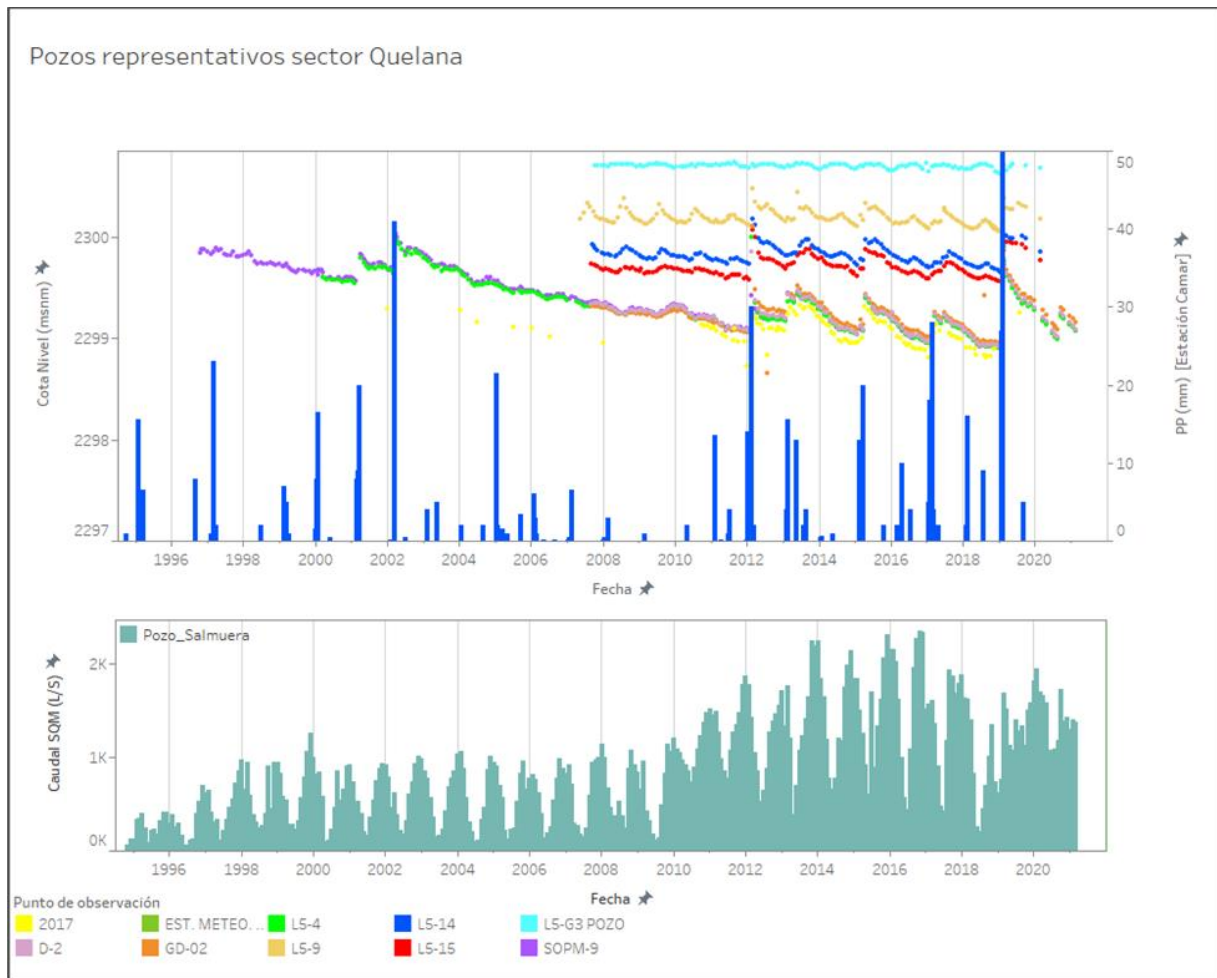
En resumen, el comportamiento de los niveles está estrechamente ligado con la ubicación del punto de observación. Los pozos situados más próximos a la planicie Aluvial presentan los niveles piezométricos más elevados con una leve tendencia al descenso debido a la extracción de agua y al efecto de los periodos en que no existen eventos de precipitación relevantes. Por su parte, en la zona Marginal, los niveles presentan una oscilación característica que refleja la fuerte influencia de la evaporación. Finalmente, el comportamiento de los niveles en el sistema salmuera muestra una leve tendencia al descenso, producto de las extracciones de salmuera, y con alzas de nivel como respuesta inmediata a las precipitaciones.

Figura 4-118. Registro de los niveles representativos en el sector de Quelana.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-119. Registro de los niveles representativos del sistema salmuera y sistema agua en zona marginal en el sector de Quelana y eventos de precipitación registrados en la estación meteorológica de Camar.



Fuente: Hidroestudios, 2021.



#### 4.3.7.5.1.4.2.4.1 Piezometría local

A continuación, se presenta la piezometría para el Sistema local Agua de Quelana, tanto para el periodo preoperacional (1986), como para el periodo actual (2020). El detalle de todos los puntos utilizados para la confección de la piezometría se presenta en el Anexo5.4: Modelo Hidrogeológico Conceptual del Sistema Aguas de Quelana

- Piezometría 1986

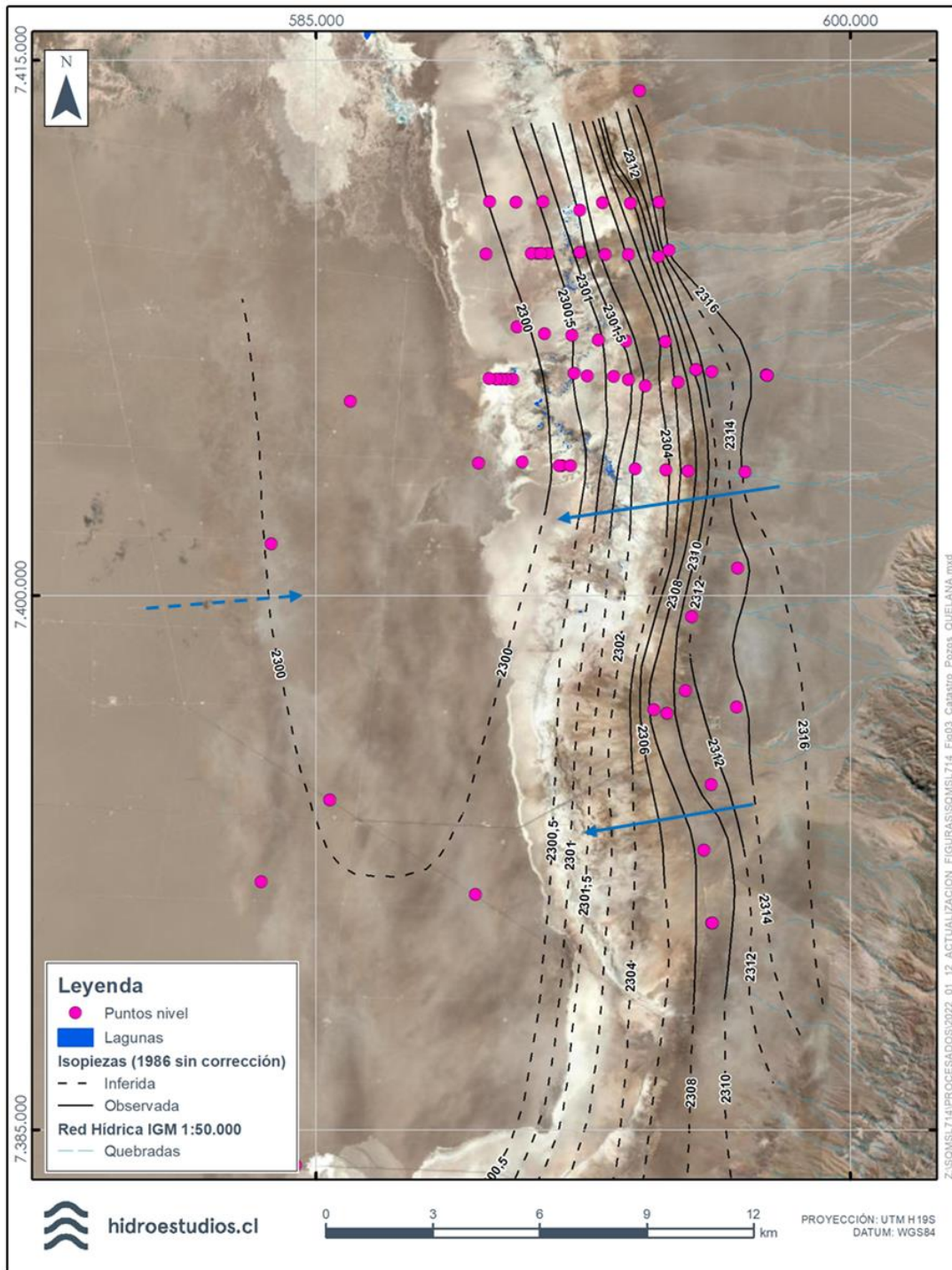
La Figura 4-120 muestra la piezometría asociada al año 1986, construida considerando directamente los niveles medidos para el periodo preoperacional, sin correcciones por densidad. La mayoría de los niveles considerados corresponden a extrapolaciones de registros recientes, excepto aquellos de los pozos 2017, 2016, 1025, 2037 y 1024, que cuentan con antecedentes en 1986 o entre 1988 y 1989.

Los niveles considerados corresponden al promedio de los dos primeros años calendario de registro en cada pozo. En el caso de los pozos L4, se consideró que los niveles en el periodo 2008 a 2010 son suficientemente estables, y que pueden considerarse representativos de condiciones preoperacionales. Los de la serie L5, que presentan tasas de descenso en el mismo periodo, se retroproyectaron considerando que las diferencias entre el nivel real y el estimado no serán relevantes para el análisis de la piezometría a la escala del modelo, y que, a lo más, implicarán leves desplazamientos locales en las curvas aledañas.

Según esta piezometría, el flujo de agua dulce proveniente desde el Este desarrollaría gradientes importantes al final de la planicie aluvial, los que disminuirían considerablemente en la zona marginal, para prácticamente extinguirse en el núcleo. En la zona marginal, los niveles son aproximadamente 1 m a 2 m más someros que los del núcleo, ascenso que ocurre en aproximadamente 4 km, y que configura un gradiente menor a 0,1%. En la planicie aluvial, en una longitud del orden de 1 km a 2 km, los niveles son entre 10 m y 15 m más someros que en la zona marginal, correspondiendo a un gradiente del orden de 1%. Por su parte, en el núcleo las variaciones de nivel en longitudes de aproximadamente 5 km son del orden de un par de decenas de centímetros, correspondiendo a gradientes menores a 0,01%.

En términos de direcciones de flujo, la piezometría preoperacional en el sector de Aguas de Quelana implica que el sector de la salmuera en el núcleo, aledaño a la zona marginal, corresponda a una zona de convergencia y de evaporación regional.

Figura 4-120. Piezometría sin corrección por densidad interpretada para el año 1986.



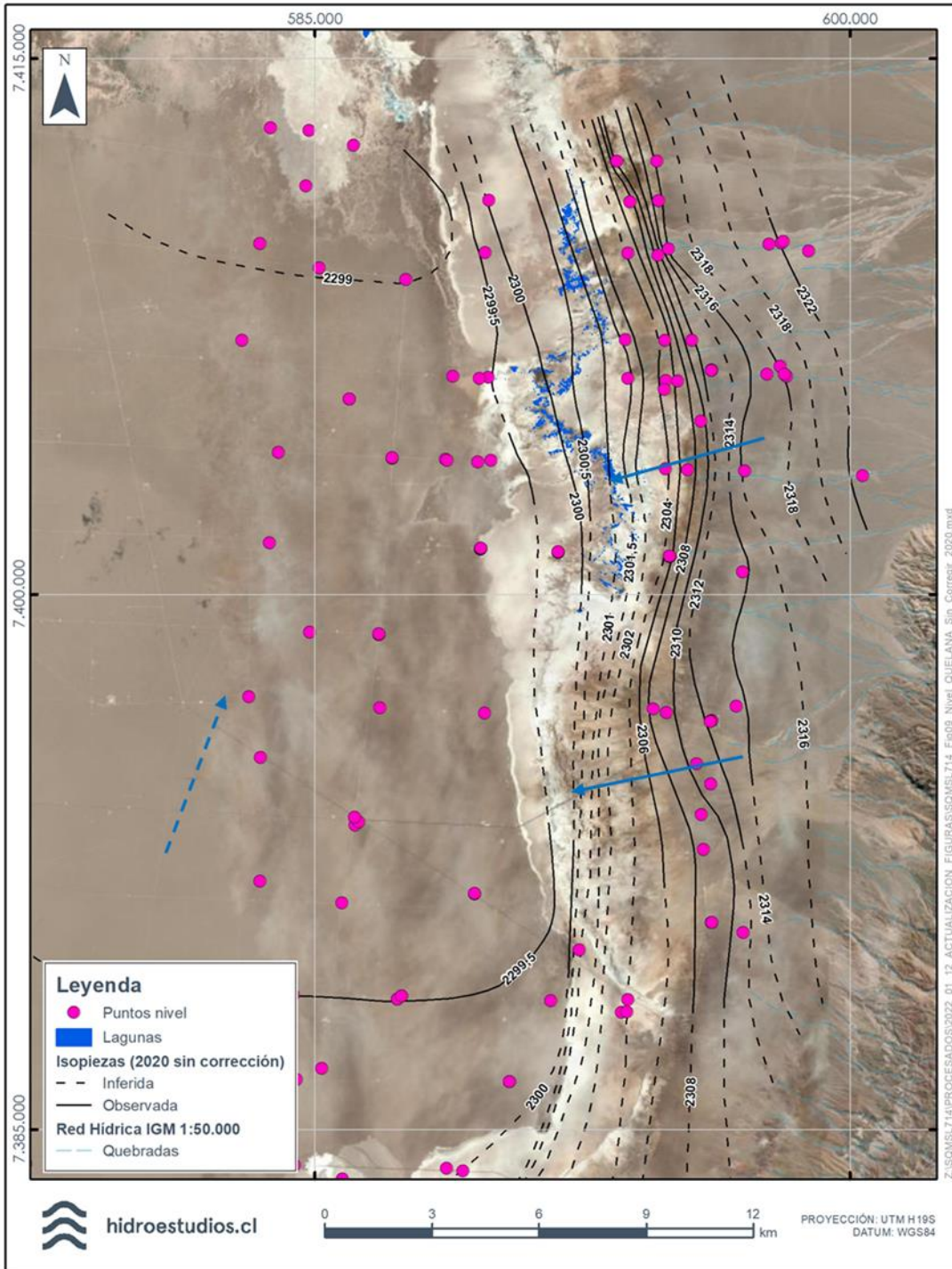
Fuente: Hidroestudios, 2021.

- Piezometría octubre a diciembre 2020

La Figura 4-121 muestra la piezometría interpretada para el último trimestre de 2020. En comparación con aquella interpretada para 1986, se aprecia que el cambio de niveles está acotado al núcleo y el sector de la salmuera, con un descenso de aproximadamente 1 m, desde aproximadamente 2.300,3 m.s.n.m. hasta 2299,3 m.s.n.m. (pozos 2037 y 1024). En la zona marginal el descenso del núcleo se atenúa gradualmente hasta prácticamente desaparecer cerca del contacto con la planicie aluvial. Sin embargo, si bien pozos como L14-3, L4-7, L4-8, L4-9 y L4-10 permanecen estables, otros muestran descensos recientes que podrían corresponder a una mezcla de efectos entre las extracciones del núcleo y de agua (por ejemplo, L13-3, L5-3, L14-4, L13-5, L3-8 y L4-11).

En términos de direcciones de flujo, la piezometría de 2020 muestra una dirección preferente hacia el norte en la salmuera dentro del núcleo. Esto es consistente con la convergencia de flujos hacia la zona marginal, la que a mayores profundidades se acentuaría en respuesta al aumento de potencial de la salmuera.

Figura 4-121. Piezometría sin corrección por densidad interpretada para diciembre de 2020.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

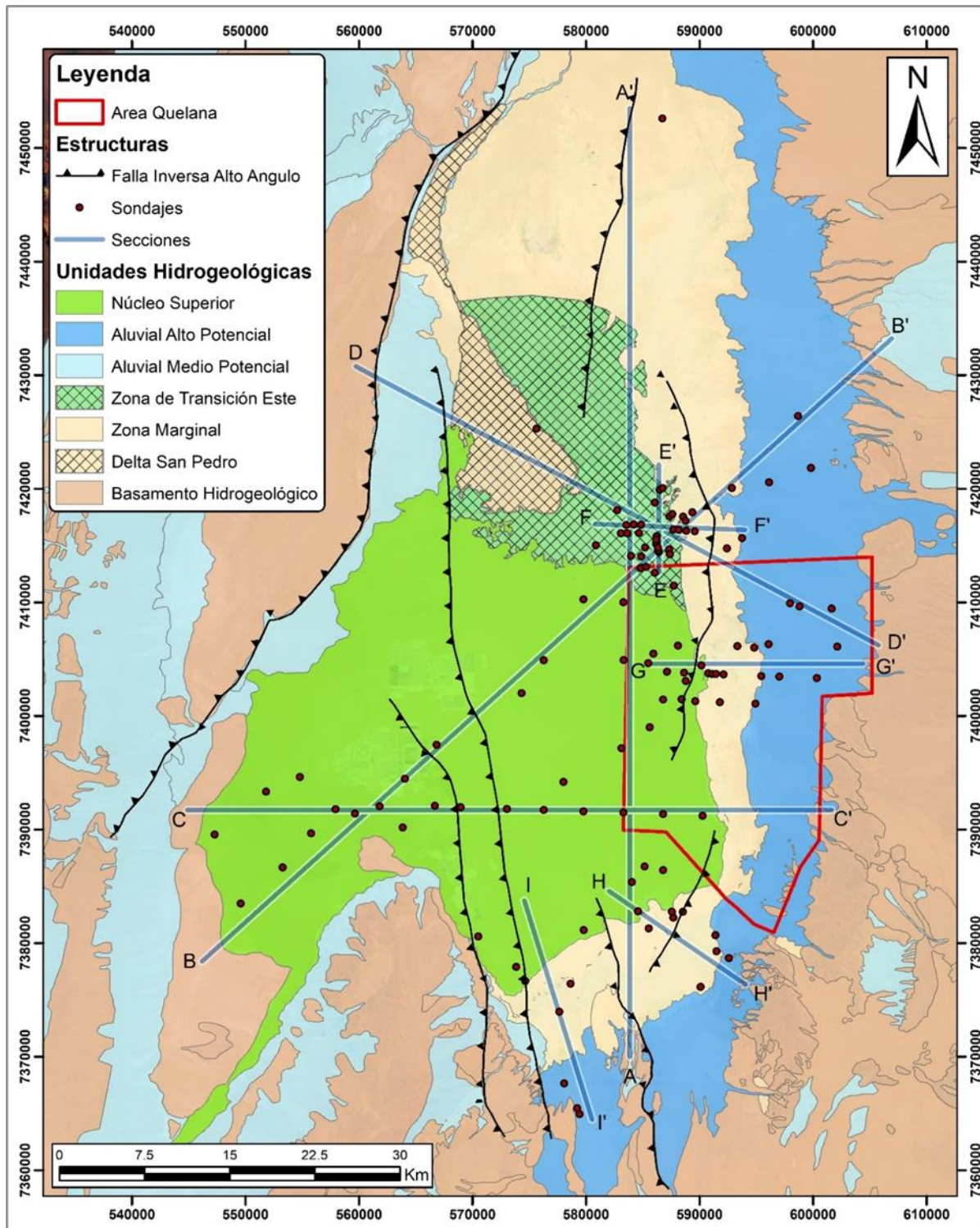
#### 4.3.7.5.1.4.2.5 Unidades Hidrogeológicas

En el área definida para el Sistema Aguas de Quelana se reconocen siete de las ocho UHs descritas a escala regional, estando ausente únicamente la UH Delta San Pedro. Destacan por su extensión areal las UH Aluvial, UH Zona Marginal y UH Núcleo Superior, Núcleo Intermedio y Núcleo Profundo.

La descripción detallada de estas unidades se presenta en el acápite 4.3.7.5.1.3.5.4, mientras que la distribución en planta y en profundidad para este sector, se presentan en la Figura 4-122 y Figura 4-123.

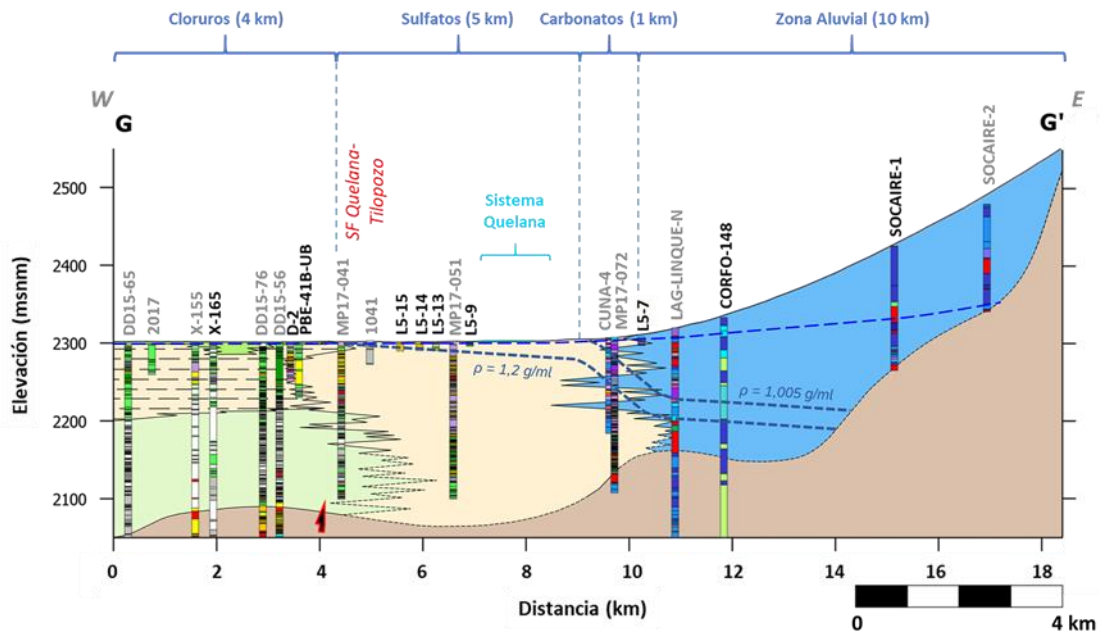


Figura 4-122. Mapa de unidades hidrogeológicas del Sistema local Aguas de Quelana.



Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-123. Sección hidrogeológica G-G'. Traza de la sección en Figura 4-122.



**SIMBOLOGÍA**

- | Unidades hidrogeológicas  | Otros  |                |
|---------------------------|--|----------------|
| Núcleo Superior           | Lentas de limos y/o arcillas   | Nivel freático |
| Núcleo Intermedio         | Falla observada/proyectada   | Cuña Salina    |
| Núcleo Profundo           | Contacto observado/inferido  |                |
| Zona marginal             | Techo observado/inferido de Secuencia heterogénea de sulfatos, tobas y tufitas |                |
| Delta San Pedro           | Sistema lagunar  |                |
| Aluvial (alto potencial)  | Cruce con otra sección   |                |
| Aluvial (medio potencial) | Pozo X<br>Pozo a < 1 km de traza   |                |
| Basamento                 | Pozo Y<br>Pozo a 1 - 6 km de traza   |                |

Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.2.6 Balance Hídrico

Tal como se indicó en el acápite 4.3.7.5.1.3.6 Para estimar el balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama, esta se divide en zonas de balance (SQM, 2021a), las cuales son agrupadas en función de su posición geográfica, en función de su altitud, y según el tipo de fluido analizado, el cual puede ser agua o salmuera. Para el caso particular del sistema local Aguas de Quelana, una parte del área se ubica en la zona de salmuera y otra en la zona de agua. En el sistema de salmuera, las zonas de balance se clasifican en Núcleo, Zona Este – Salmuera y Zona Intermedia Norte Núcleo, las cuales corresponden a zonas bajas. En el caso del sistema de agua, este incluye partes de las zonas de balance Socaire y Talabre, ubicadas en la zona alta; y Zona Este – Agua, localizada en la zona media. La ubicación de cada una de las zonas antes mencionadas se muestra en la Figura 4-124.

En el sistema local Aguas de Quelana, se define como zona de balance a la sección de las zonas altas, medias y bajas incluyendo, además, a la fracción del núcleo presentada en la Figura 4-124.

Con respecto a la temporalidad de los balances, se consideran los mismos 2 escenarios presentados en el balance regional: uno previo a la operación de SQM y otro considerando las actividades productivas del Titular.

Es importante señalar que, el balance a escala de cuenca se desarrolla con zonas de mayor o igual tamaño al considerado en el cálculo del sistema local Aguas de Quelana, por lo cual, los flujos estimados para la zona completa deben ser distribuidos en el caso que se cuente con solo una parte de la zona inicial. En la Tabla 4-49 se muestra el factor utilizado para distribuir los flujos de cada zona.

En el caso de las descargas por evaporación desde el acuífero, se realiza un ejercicio similar, pero en este caso, se considera la proporción entre las áreas sujetas a evaporación, las cuales se muestran en la Tabla 4-49.

Por otro lado, en la Figura 4-124 se muestran 6 zonas de balance, de las cuales 3 corresponden a agua: Socaire, Talabre y Zona Este- Agua. Si bien las zonas correspondientes a Socaire y Talabre tienen solo una pequeña parte dentro de la delimitación considerada para el sistema local Aguas de Quelana, generan un caudal pasante, donde una fracción de este ingresa a la Zona Este- Agua.

**Tabla 4-49. Factor de ajuste para estimar caudales de entrada para dominio sistema local Aguas de Quelana.**

Sector	Área Zona Balance Total (km <sup>2</sup> )	Área Zona Balance AdQ (km <sup>2</sup> )	Factor de ajuste
Núcleo	1.335,7	159,3	0,119
Socaire	837,5	19,5	0,023
Talabre	521,9	2,0	0,004
Zona Este- Agua	438,0	283,3	0,647
Zona Este- Salmuera	93,1	55,7	0,598
Zona Intermedia Norte Núcleo	91,3	4,6	0,051

Fuente: SRK Consulting (2020).

Tabla 4-50. Factor de ajuste para estimar caudales de salida por evaporación desde el acuífero para dominio sistema local Aguas de Quelana.

Sector	Área Evaporante Zona Balance Total (km <sup>2</sup> )	Área Evaporante Zona Balance AdQ (km <sup>2</sup> )	Factor de ajuste
Núcleo	1.335,7	1.335,7	1
Zona Este- Agua	54,3	38,0	0,7
Zona Este- Salmuera	55,7	55,7	1
Zona Intermedia Norte Núcleo	4,6	4,6	1

Fuente: SRK Consulting (2020).

Tabla 4-51. Factor de ajuste para estimación de caudal disponible a Zona Este- Agua para dominio sistema local Aguas de Quelana.

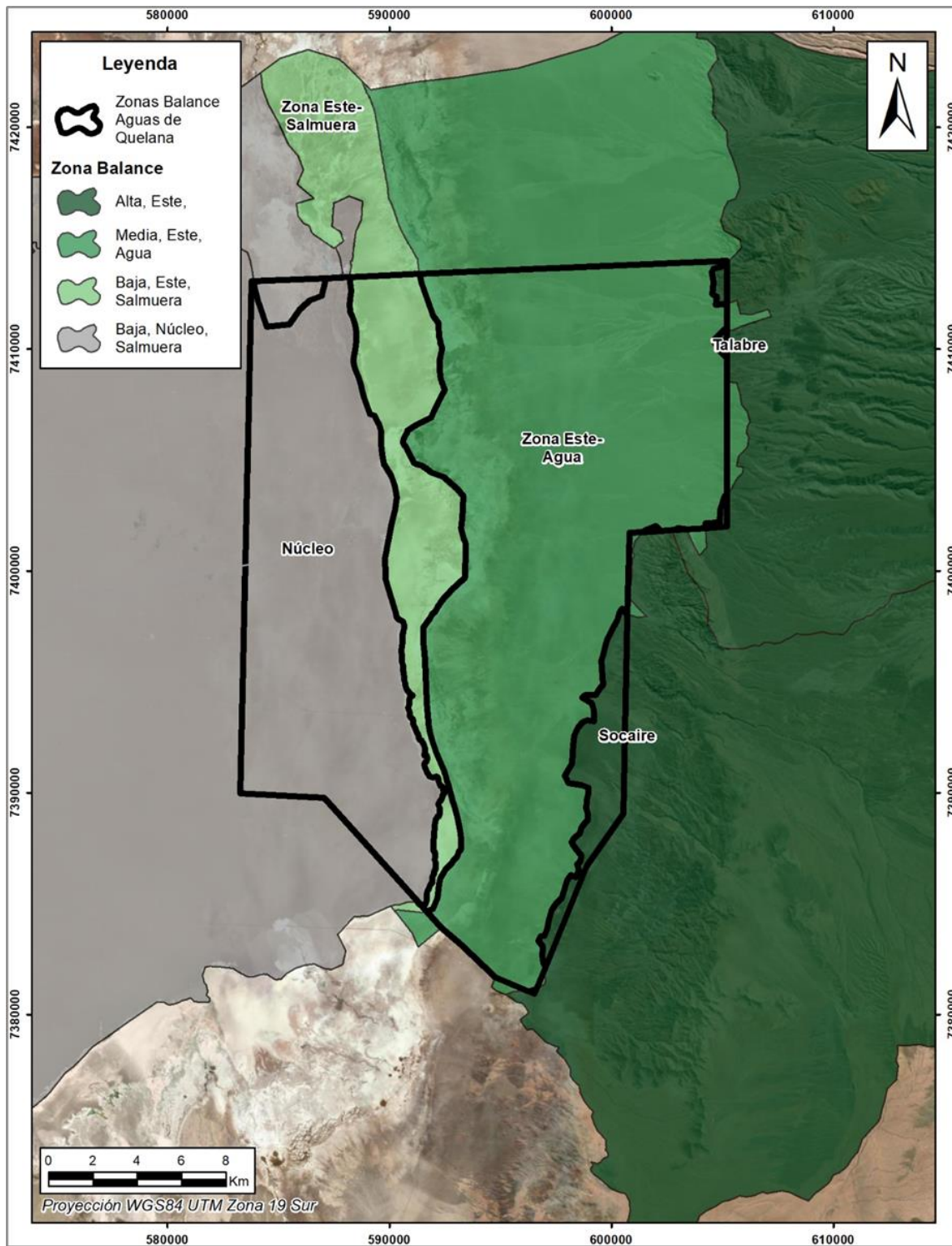
Sector	Longitud recarga (km)	Longitud recarga Dominio (km)	Factor de ajuste
Talabre	23,2	12,2	0,52
Socaire	22,2	22,2	1,00

Fuente: SRK Consulting (2020).

En la Figura 4-125 se muestra que las zonas altas que aportan al polígono definido para representar al sistema local Aguas de Quelana son una parte de Talabre y Socaire completa. En el caso de Talabre, el flujo pasante se distribuye linealmente, donde el caudal se reparte proporcionalmente entre el tramo que aporta a la Zona Este-Agua y el tramo total que aporta a la zona media ubicada aguas abajo. Para Socaire, como todo el caudal disponible es traspasado a la Zona Este- Agua, no se realiza una redistribución de flujos.



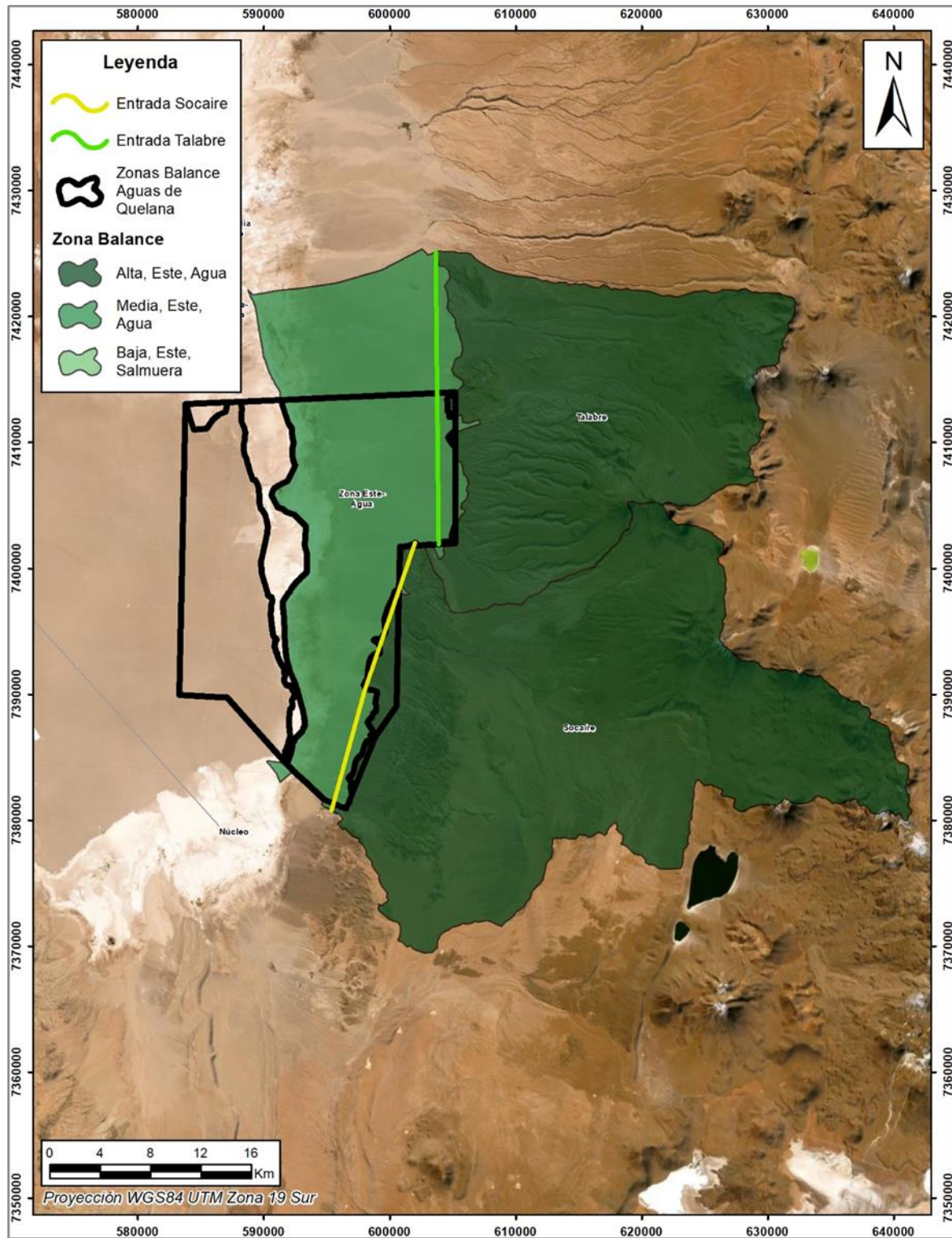
Figura 4-124. Zonas de balance de agua y salmuera utilizadas Sistema Agua de Quelana.



Fuente: Basado en SRK Consulting (2020).



Figura 4-125. Zonas aportantes a Zona Este- Agua Sistema Agua de Quelana.



Fuente: Basado en SRK Consulting (2020).

4.3.7.5.1.4.2.6.1 Balance de agua

El planteamiento del balance de agua en el sistema Aguas de Quelana, es igual al presentado para el caso regional en el acápite 4.3.7.5.1.3.6.1, mientras que el detalle de la obtención de cada uno de los valores se presenta en el Anexo 5.4: Modelo Hidrogeológico Conceptual del Sistema Aguas de Quelana.

Considerando lo anterior, en este capítulo se entregan los resultados de balance obtenidos para el sector Aguas de Quelana, los cuales indican que en la zona alta (Socaire y Talabre) es donde ocurre la mayor recarga al acuífero (612 L/s). Desde esta zona el agua fluye por el acuífero aluvial y, lo que no es evaporado, se traspasa hacia la zona media (435 L/s) (Tabla 4-52). Para efectos del balance, la zona media incluye parte del sistema aluvial y parte de la zona marginal, la cual limita con el sistema de salmuera que reside también en la zona marginal, siendo la interfaz salina el límite entre ambas áreas.

Tabla 4-52. Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo preoperacional Sistema Aguas de Quelana.

SECTOR	ZONAS DE BALANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
		Recarga Directa	Recarga Lateral	Escorrentía	Recarga desde otras zonas	Evaporación desde el acuífero	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Disponible para descarga hacia otras zonas	Variación de almacenamiento
E	Alta-Este-Agua	64	36	512		0	0	177	0	435	0
	Media-Este-Agua	72	0	36	435	472	28	89	0	0	-46
<b>TOTAL</b>		<b>136</b>	<b>37</b>	<b>548</b>		<b>472</b>	<b>28</b>	<b>266</b>	<b>0</b>	<b>435</b>	<b>-46</b>

Fuente: SRK Consulting (2020).

Con respecto al período operacional, las principales diferencias en el sistema de agua están dadas por las extracciones de agua realizadas por SQM. En el caso de las entradas, como se estiman con base en la distribución espacial de las precipitaciones, la cual representa una condición en el largo plazo, no se producen modificaciones en los períodos evaluados, debido a que tampoco se cuenta con cambios en las superficies capaces de generar recarga, como en el caso del núcleo para el sistema de salmuera (Tabla 4-53).

Tabla 4-53. Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo operacional Sistema Aguas de Quelana.

SEC-TOR	ZONAS DE BALANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
		Recarga Directa	Recarga Lateral	Escorrentía	Recarga desde otras zonas	Evaporación desde el acuífero	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Disponible para descarga hacia otras zonas	Variación de almacenamiento
E	Alta-Este-Agua	64	36	512		0	-	177	0	435	0
	Media-Este-Agua	72	0	36	435	472	28	89	80	0	-126
<b>TOTAL</b>		<b>136</b>	<b>37</b>	<b>548</b>		<b>472</b>	<b>28</b>	<b>266</b>	<b>80</b>	<b>435</b>	<b>-126</b>

Fuente: SRK Consulting (2020).

#### 4.3.7.5.1.4.3 Sistema Ambiental Peine

##### 4.3.7.5.1.4.3.1 Parámetros hidráulicos

De los 631 puntos con información de parámetros hidráulicos, 8 ensayos se ubican dentro del Sistema de Peine.

En particular, los tipos de ensayo realizados para estimar la conductividad hidráulica en este sector corresponden a 2 pruebas de bombeo, 2 corresponden a punteras de uno de los ensayos antes mencionados y 4 pruebas Lefranc de carga constante o variable. Las pruebas de bombeo se consideran representativas de una escala espacial mayor.

Las mediciones asociadas a cada pozo y unidad geológica se muestran en la Tabla 4-54. La ubicación de los puntos con información se muestra en la Figura 4-126.

Para la unidad Cloruros Superiores, se cuenta con cuatro pruebas de bombeo que entregan valores de conductividad hidráulica en el rango 151,6 m/d a 269,7 m/d. Los ensayos Lefranc disponibles para esta unidad entregan valores menores, de entre 3,2 m/d y 48,9 m/d. Para la unidad Sulfatos se cuenta con dos ensayos tipo Lefranc, que entregan valores de conductividad hidráulica entre 0,0009 m/d y 0,3 m/d.

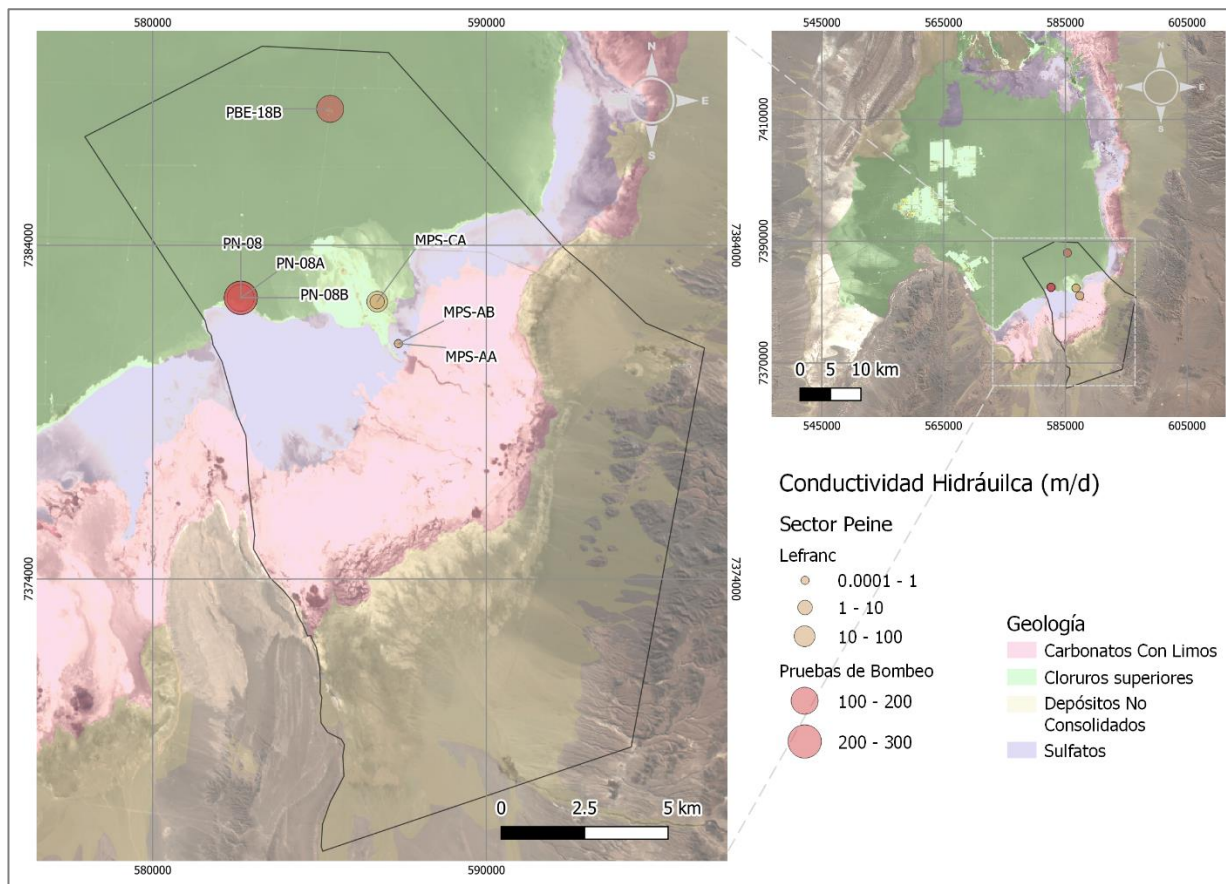
Estas estimaciones son consistentes con el rango descrito a nivel regional (Tabla 4-28).

Tabla 4-54. Parámetros hidráulicos por unidad geológica en el Sistema Peine.

Pozo	Tipo de ensayo	K (m/d)	Unidad Geológica
MPS-CA	LeFranc Carga Constante	48,9	Cloruros Superiores
MPS-CA	LeFranc Carga Variable	3,2	Cloruros Superiores
PBE-18B	Prueba de bombeo	153	Cloruros Superiores
PN-08	Prueba de bombeo	264,6	Cloruros Superiores
PN-08A	Prueba de bombeo	151,6	Cloruros Superiores
PN-08B	Prueba de bombeo	269,7	Cloruros Superiores
MPS-AA	LeFranc Carga Variable	0,3	Sulfatos
MPS-AB	LeFranc Carga Variable	0,0009	Sulfatos

Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-126. Distribución espacial de valores de conductividad hidráulica estimados en unidades geológicas del sistema Peine.



Fuente: SQM, 2021.



En cuanto al almacenamiento local, se tiene una estimación puntual a partir de la prueba de bombeo realizada para el pozo PN-08, ubicado en la unidad geológica de Cloruros Superiores, de la cual se obtuvo un valor de 0,14. Para mayor representatividad, este resultado se complementa con los obtenidos a nivel regional en las unidades presentes en el sistema.

#### 4.3.7.5.1.4.3.2 Interfaz Salina

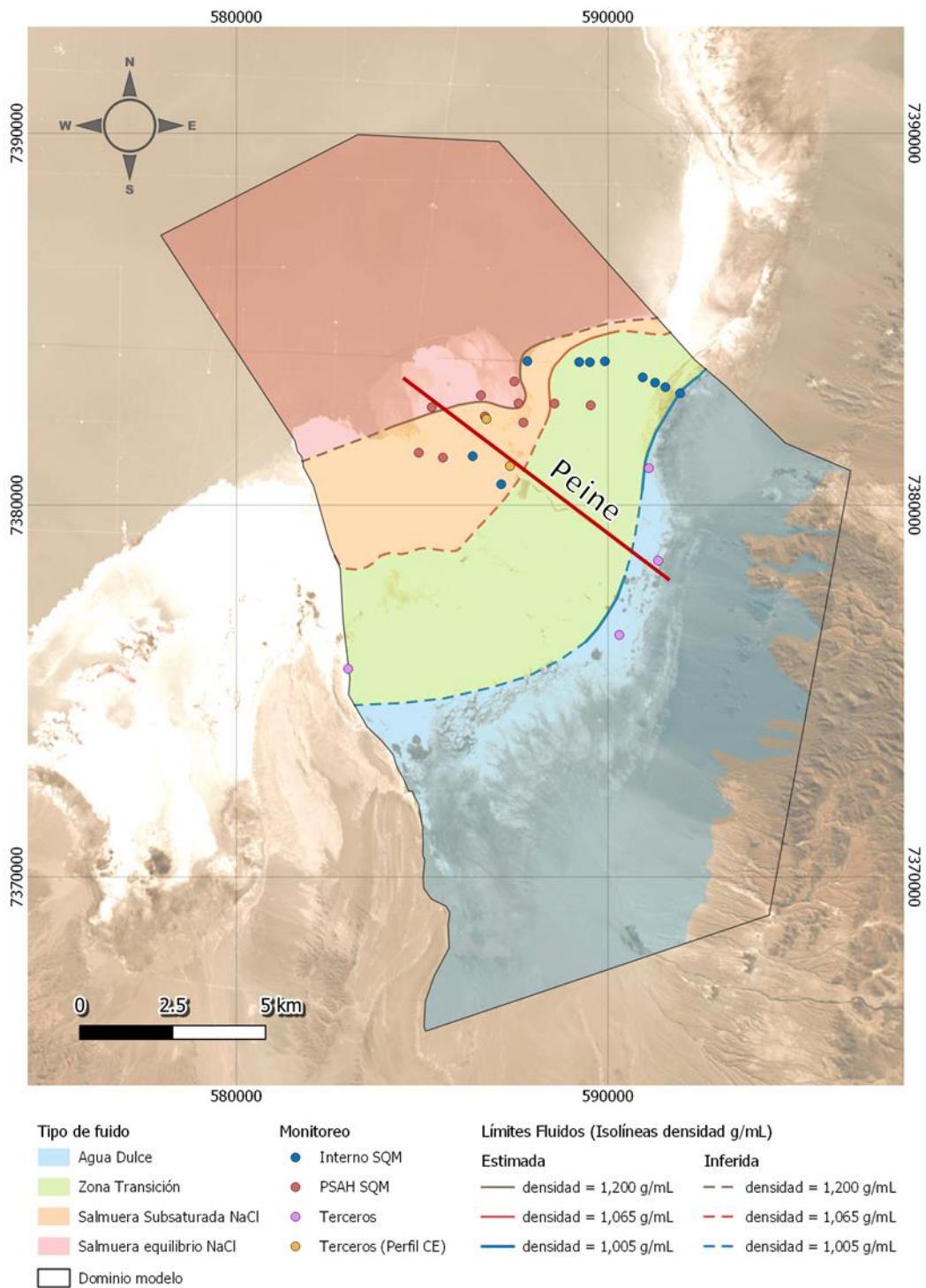
##### 4.3.7.5.1.4.3.2.1 Reconocimiento de zonas en superficie

De los 148 puntos con información de densidad utilizados para el reconocimiento regional de la interfaz salina en superficie, 26 se encuentran dentro del sector del Sistema Ambiental Peine.

El detalle de la ubicación de estos puntos y de los límites locales se presenta en la Figura 4-127, mientras que los criterios de reconocimiento son los mismos presentados en el acápite 4.3.7.5.1.3.1.



Figura 4-127. Ubicación puntos de monitoreo e isólinas de densidad que indican afloramiento interfaz salina en sistema Peine.



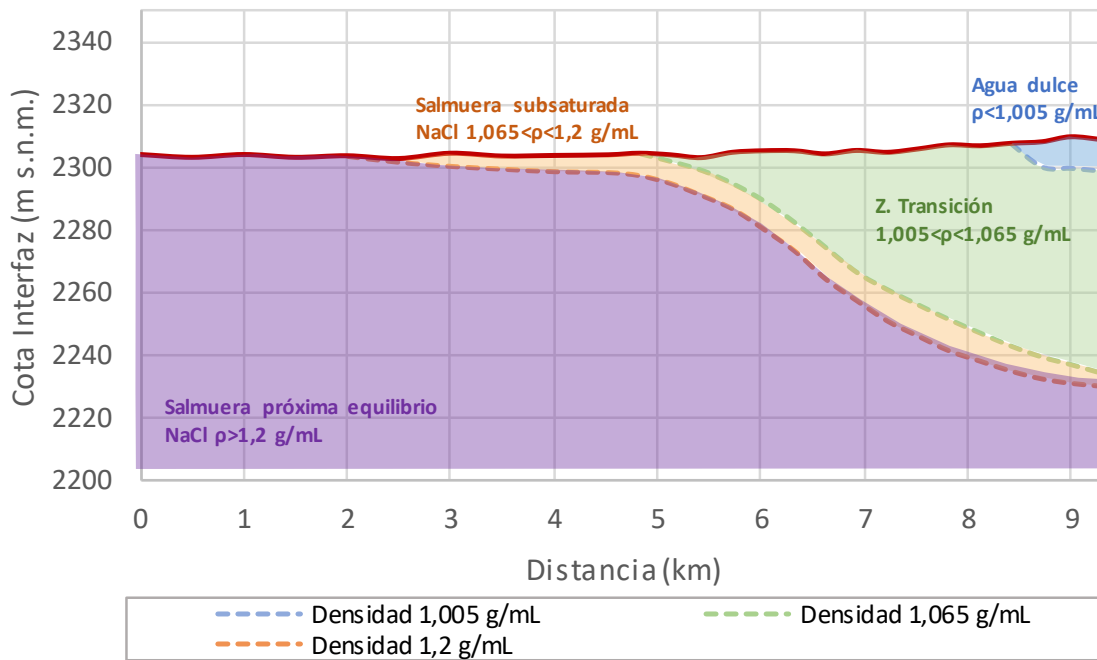
Fuente: SQM, 202

4.3.7.5.1.4.3.2.2 Reconocimiento de interfaz salina en profundidad

En base a la información descrita en el acápite 4.3.7.5.1.3.2, para delimitar la interfaz salina en profundidad, se analizó información de TEM y perfilajes de CE en 10 pozos del sistema Peine ( 3 pozos SQM: pozos L10-1, cuña 6 y cuña 7, Figura 4-53; y 7 pozos ALB: MP07C-1, MPS-AC, PP-01, PP-03, MP-12C, MPS-CC, PP-02, Figura 4-54), lo que permitió la elaboración del perfil que se muestra en la Figura 4-128 que permite conocer la pendiente, forma y volumen de la interfaz salina en el área de Peine. La ubicación de este perfil puede verse en la Figura 4-127.

Se observa que la interfaz presenta un amplio volumen de zona transición y considerablemente menor de Salmuera subsaturada en NaCl. Próximo al Km 8,5 desde el inicio del perfil, la base de la interfaz se estabiliza en profundidades en torno a 2.240 m s.n.m. y el techo en torno a 2.300 m s.n.m.

Figura 4-128 Perfil 2D para la caracterización de pendiente, forma, profundidad y volumen de la interfaz salina en sistema Peine



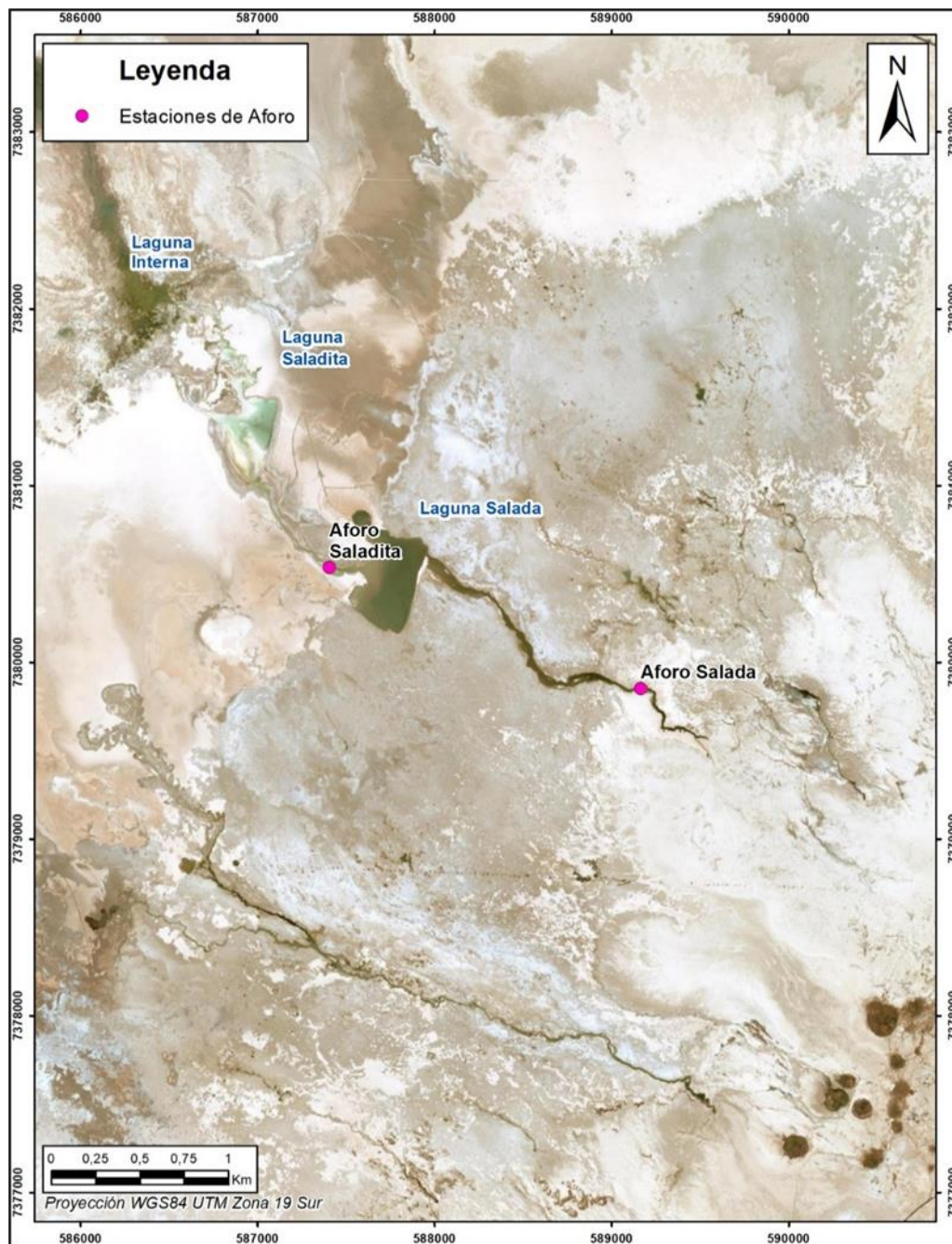
Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.3.3 Cuerpos de agua superficiales

##### 4.3.7.5.1.4.3.3.1 Escurrimientos superficiales Sistema local

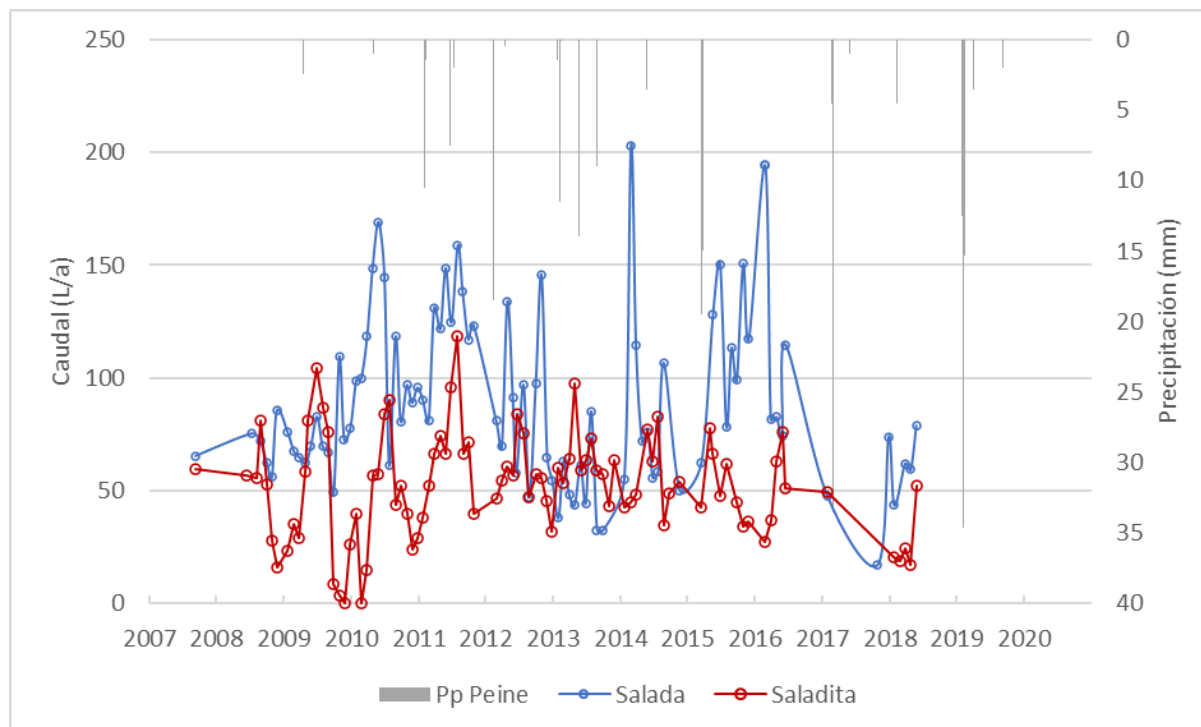
En la Figura 4-129 se muestran los puntos con medición de aforo en el sistema Peine. Por su parte, la Figura 4-130 muestra los promedios anuales para los aforos existentes en estos puntos. En general, los caudales en Saladita son menores que en Salada, con una mediana de 52 L/s y 76 L/s respectivamente, como consecuencia de la evaporación en el tránsito del agua desde el sureste y posibles infiltraciones. Es importante destacar que desde 2017 se cuenta con únicamente 5 mediciones por año. Lo que se debe a la negativa por parte de la Comunidad de Peine de permitir el acceso al sector (informado en los respectivos PSAH de SQM). Por lo anterior, al considerar una condición de promedio anual, los valores obtenidos para dichos años pueden considerarse menos representativos.

Figura 4-129. Puntos de aforo existentes en el sistema Peine.



Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-130. Valores de aforos medidos en el Sistema Peine.



Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.3.3.2 Cuerpos Lagunares

El sistema Peine está compuesto por los cuerpos lacustres denominados laguna Salada, laguna Saladita y Desborde Interna. Éstas se encuentran al sureste del núcleo del Salar de Atacama, alineadas en una dirección aproximada SE-NW. Las lagunas Salada y Saladita se consideran lagunas principales, ya que tienen una extensión relativamente estable. Mientras que, Desborde Interna presenta una extensión variable y errática al formarse producto de los desbordes desde laguna Saladita en temporadas de abundancia hídrica (SQM, 2021a).

En el mes de septiembre de 2018 se realizó un levantamiento batimétrico del sistema lagunar, con el fin de caracterizar la morfometría de las lagunas que lo componen (Figura 4-147). De esta manera, se puede apreciar que las lagunas del Sistema Peine presentan las mismas características del Sistema Barros Negros, es decir, son extensas cubetas con profundidades muy bajas entorno a los 50 cm de profundidad máxima y fondos uniformes sin presencia de resaltos topográficos evidentes.

Al igual que en el Sistema Soncor, en este sistema se monitorean anualmente las superficies lacustres (durante el mes de abril), mediante imágenes satelitales de alta resolución. En la Tabla 4-60 se recogen los registros de monitoreo desde el 2007 hasta el 2020.



Tabla 4-55. Superficies lacustres generadas en el PSA de SQM desde el 2007 a 2020.

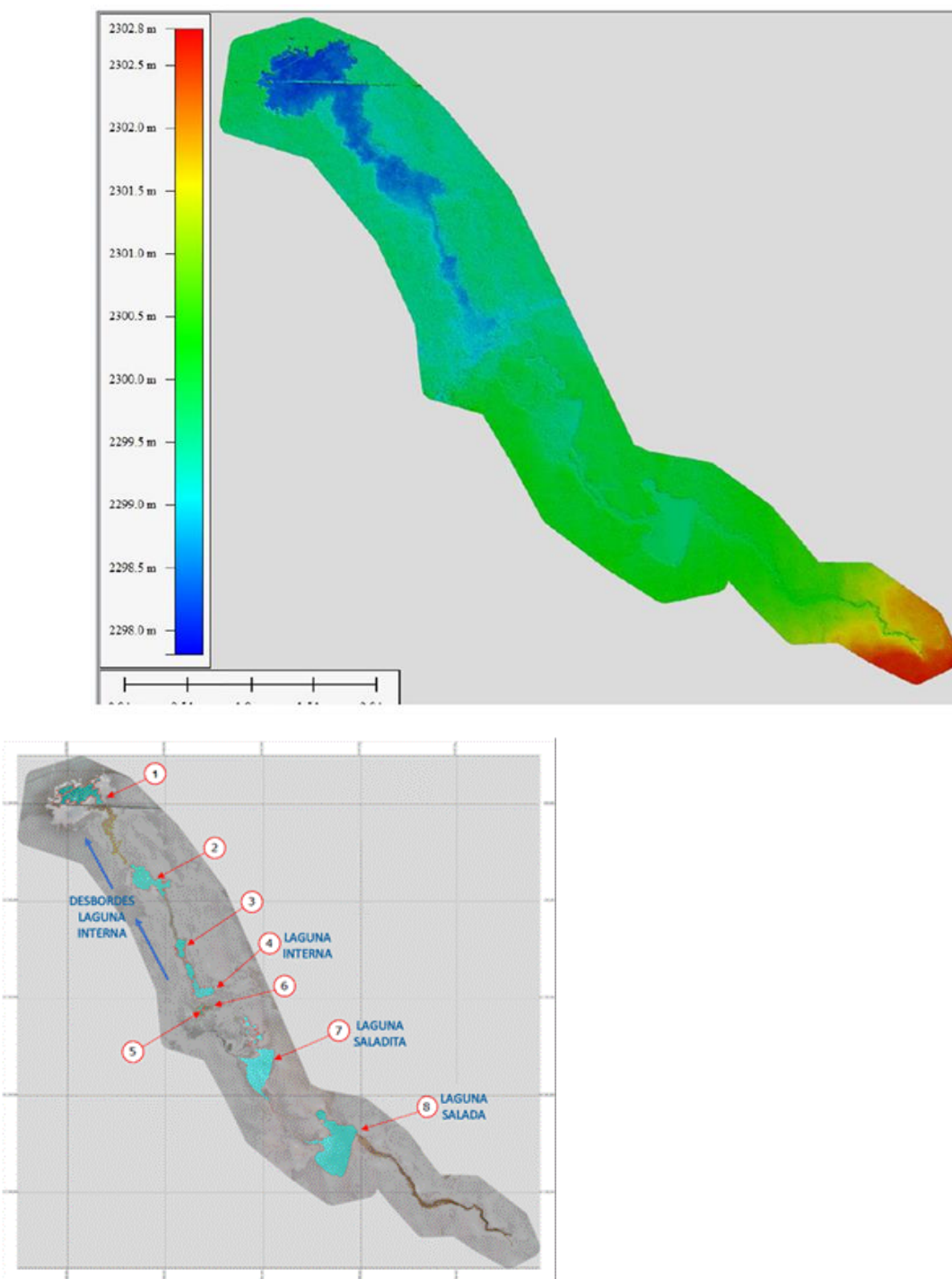
Año	Superficie (m <sup>2</sup> )		
	Salada	Saladita	Desborde Laguna Interna
2007	200.220	113.001	182.497
2008	199.967	113.240	175.958
2009	199.511	109.968	191.671
2010	198.178	108.022	198.838
2011	199.521	110.394	182.616
2012	196.398	116.315	246.828
2013	197.314	110.227	331.075
2014	197.427	105.522	261.763
2015	198.492	103.638	472.172
2016	198.028	96.262	134.054
2017	200.958	99.410	405.302
2018	200.710	95.010	112.523
2019	195.632	89.263	680.710
2020	180.238	90.767	446.388
<b>Promedio</b>	<b>197.328</b>	<b>104.360</b>	<b>287.314</b>

Fuente: SQM, 2021.

Por lo general, las lagunas Salada y Saladita presentan agua durante todo el año, manteniendo además una superficie con poca variación durante el año. No obstante, el Desborde Interno, dado que corresponde a un derrame de Saladita, presenta un comportamiento más errático, lo cual se debe a su característica terminal dentro del sistema, respondiendo principalmente a los aportes relictos de las dos lagunas localizadas aguas arriba. Por esta razón, es posible visualizar en los datos de monitoreo amplia variabilidad en los datos de superficie, donde los años con máximos registros (2015, 2017, 2019 y 2020) coinciden con altas magnitudes de precipitación anual.

Adicionalmente, en el estudio realizado por SGA (2015) se analiza la superficie lagunar con imágenes satelitales LANDSAT para el periodo 1984 - 2014, confirmando que los cuerpos de aguas Salada y Saladita mantienen una superficie estable e indicando que la laguna Saladita muestra una mayor superficie permanente en la temporada de invierno. Por su parte, las zonas de inundación de Desborde Interna se concentran al norte de ésta.

Figura 4-131. Arriba: Batimetría de las lagunas del Sistema Peine. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para las lagunas del Sistema Peine e información del levantamiento realizado.



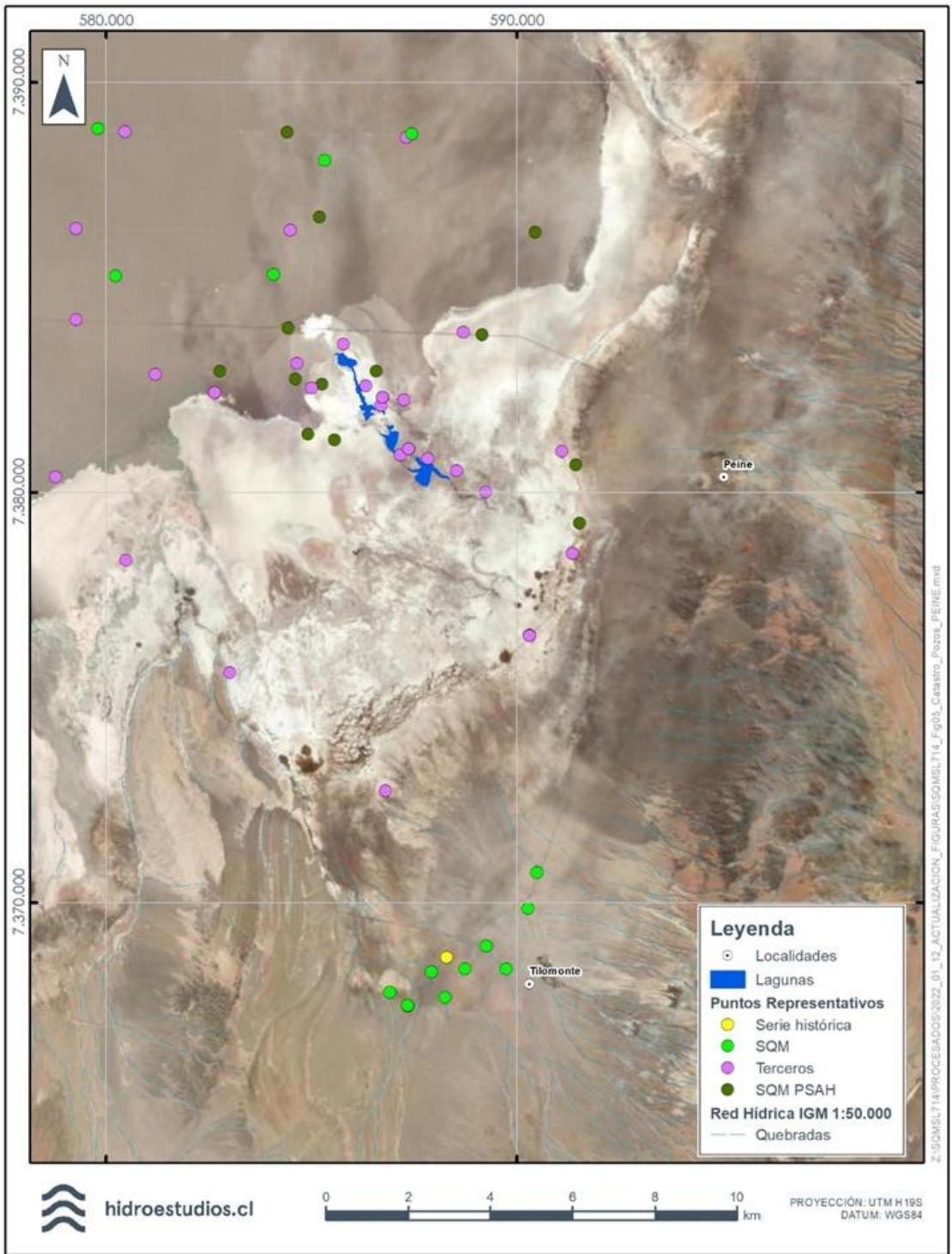
Fuente: Topoland, 2018.

#### 4.3.7.5.1.4.3.4 Niveles de agua subterránea y piezometría

De los 509 puntos con nivel piezométrico a escala regional, 62 se encuentran en el sector del Sistema local de Peine. Su ubicación y origen, se presenta en la Figura 4-132.

Al igual que en el caso regional, con el fin analizar el comportamiento de los niveles piezométricos a lo largo del tiempo en el Sistema Peine, a continuación, se presenta la evolución de una serie de pozos representativos para los distintos tipos de fluidos (Figura 4-133).

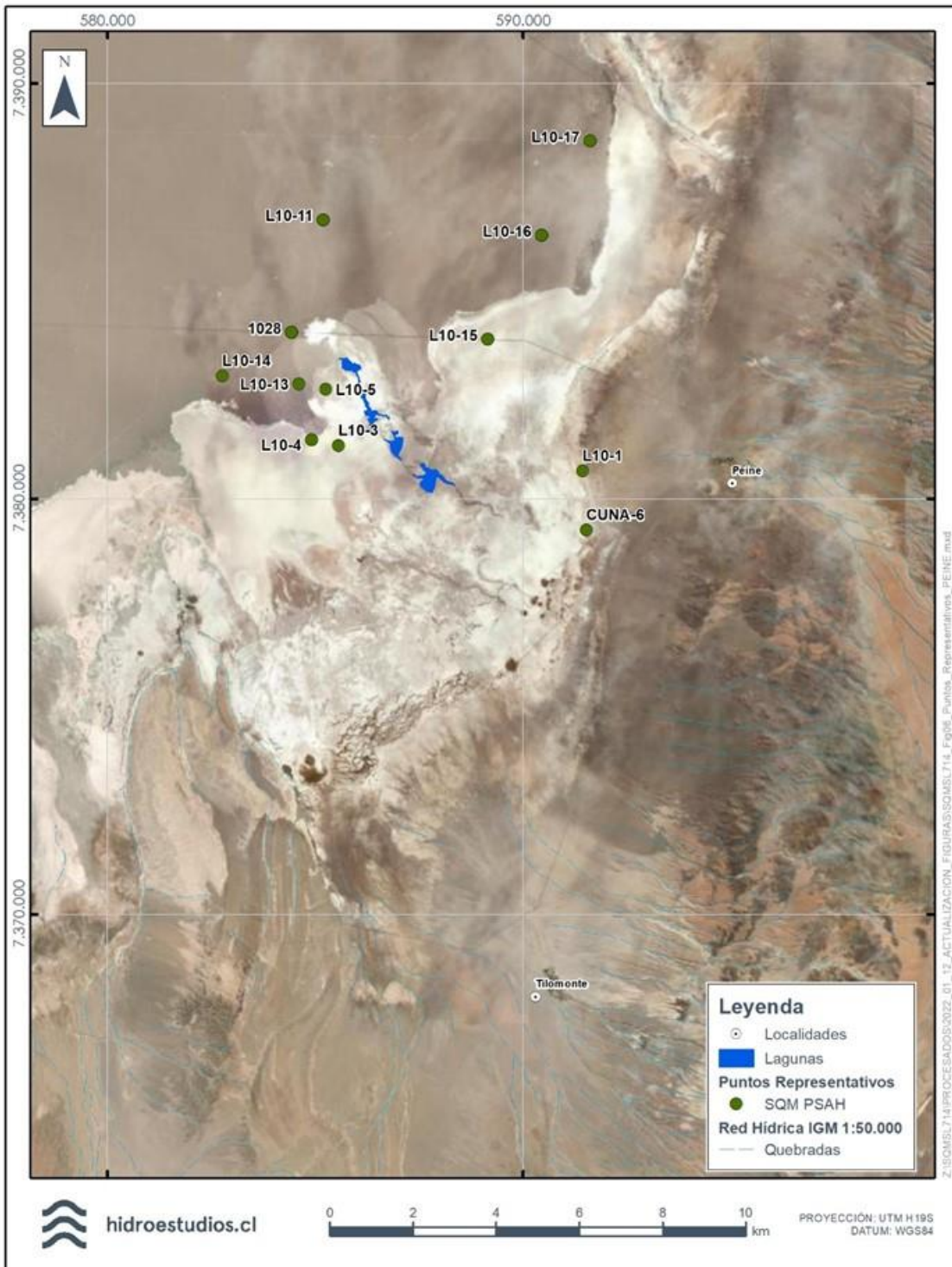
Figura 4-132 Pozos con información de nivel piezométrico Peine.



Fuente: Hidroestudios, 2021.



Figura 4-133 Puntos representativos de nivel piezométrico Peine.



Fuente: Hidroestudios, 2021.



Para representar el comportamiento de sistema de agua en el sector de Peine, se presenta la evolución de los niveles en los pozos: L10-18, L10-1 y Cuña-6 (Figura 4-134).

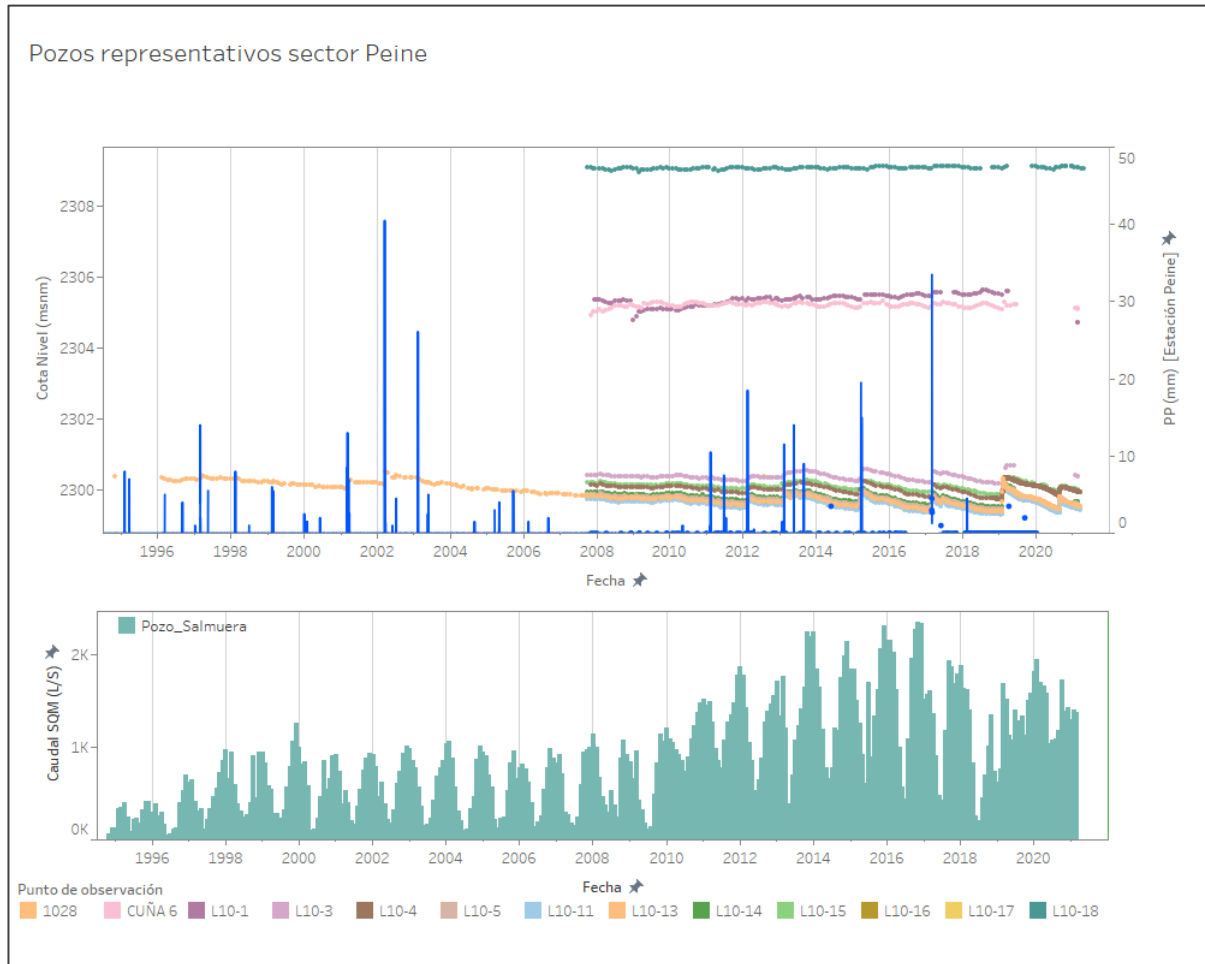
En el pozo L10-18, se observa una oscilación interanual de los niveles, que está determinada por el efecto de la evaporación, presentando los máximos niveles a finales de invierno y los mínimos a finales de verano. El nivel de este pozo se encuentra unos 9 m por encima del nivel de los pozos que se ubican en el núcleo del Salar en este sector (Figura 4-134). Además de la oscilación estacional, la tendencia de este pozo es plana (ni al ascenso ni al descenso).

Por otro lado, el pozo L10-1, que se encuentra situado en la parte más distal del abanico aluvial de Peine, presenta un comportamiento distinto del resto, con una oscilación marcada por la estacionalidad de la evaporación y un leve ascenso de los niveles en los últimos 10 años.

Finalmente, el pozo Cuña-6, muestra un comportamiento con tendencia plana (ni ascenso ni descenso), respondiendo sólo a la estacionalidad (Figura 4-134).

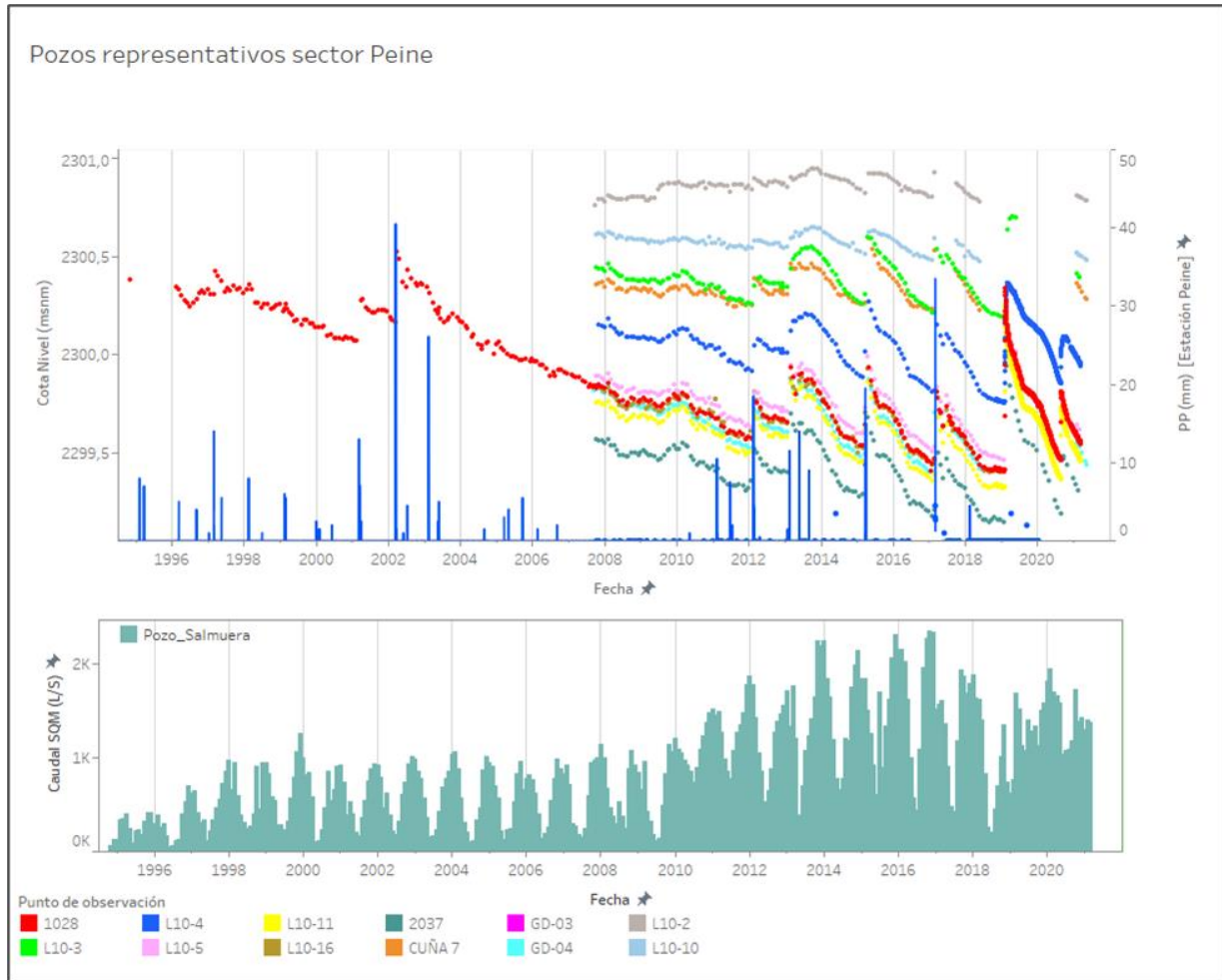
El resto de los pozos, cuyos niveles se muestran en la Figura 4-134, representan el comportamiento del sistema salmuera, siendo todos ellos levemente afectados por las extracciones desde el núcleo del Salar. Además, todos ellos responden a los peaks de precipitaciones. En la Figura 4-135 se muestran las series de los pozos cuyo comportamiento se asocia al sistema salmuera.

Figura 4-134. Registro de los niveles representativos del sector de Peine.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-135. Niveles representativos del sistema de salmuera en el sector de Peine.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.3.4.1 Piezometría local

A continuación, se presenta la piezometría para el Sistema local Peine, tanto para el periodo preoperacional (1986), como para el periodo actual (2020). El detalle de todos los puntos utilizados para la confección de la piezometría se presenta en el Anexo 5.5: Modelo Hidrogeológico Conceptual del Sistema Peine

- Piezometría 1986

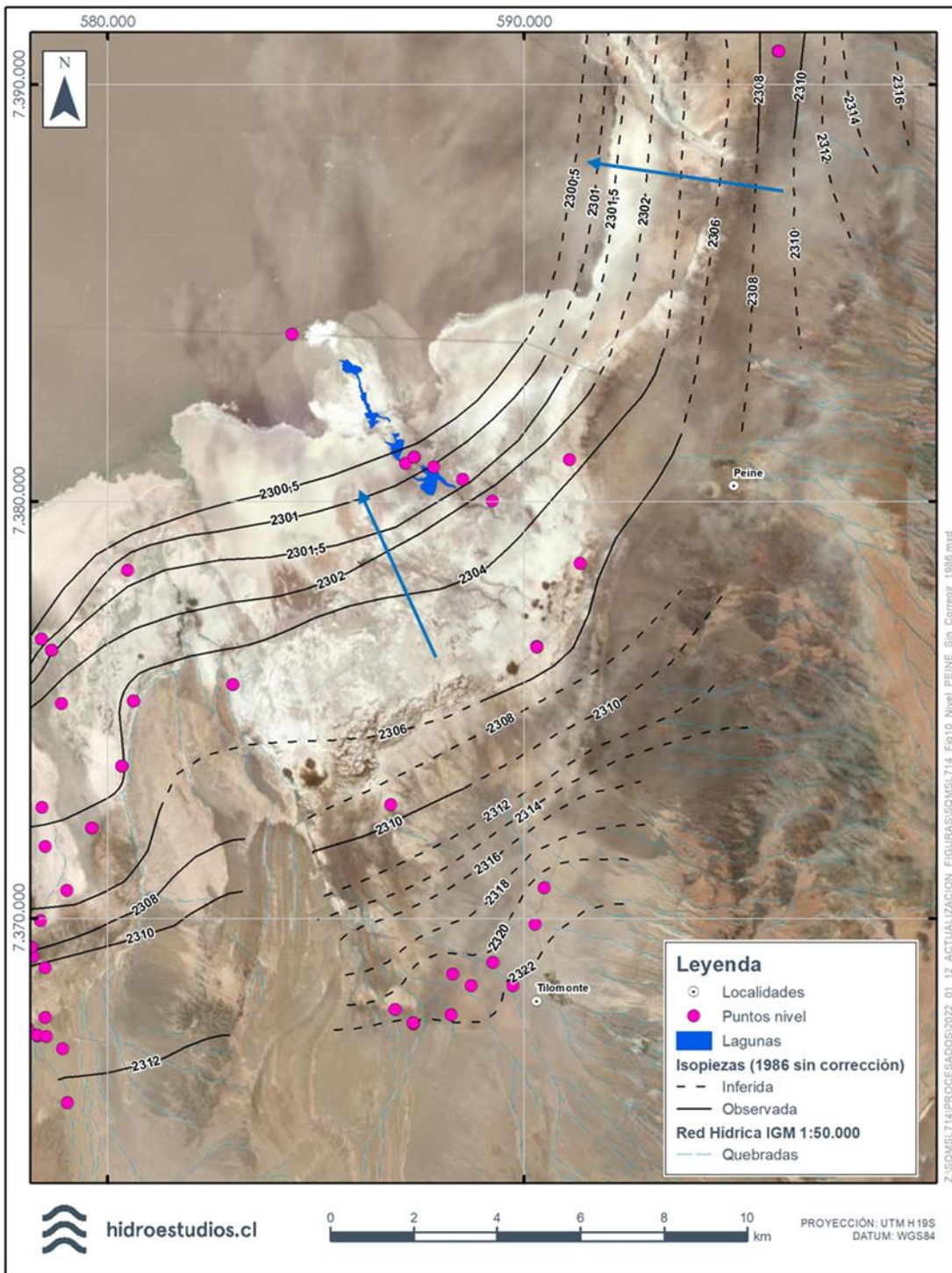
La Figura 4-120 muestra la piezometría asociada al año 1986, construida considerando directamente los niveles medidos para el periodo preoperacional, sin correcciones por densidad. La mayoría de los niveles considerados corresponden a extrapolaciones de registros recientes, excepto aquellos de los pozos S-4 y 1028, que cuentan con antecedentes en 1988 y 1989.

Los niveles considerados corresponden al promedio de los dos primeros años calendario de registro en cada pozo. En el caso de los pozos BA-21 y los de la serie MPS, que presentan tasas de descenso del orden de 1 cm/año, el periodo considerado incluye niveles que están aumentados por recargas que ocurren en eventos extremos de precipitación. Un cálculo del promedio incluyendo estos niveles puede compensar el hecho de no proyectar la tasa de descenso al pasado. En cualquier caso, las variaciones en el nivel estimado para el periodo preoperacional implicarían leves desplazamientos de las curvas de piezometría trazadas, que no son relevantes para el análisis de la configuración general del flujo.

Según esta piezometría, el flujo de agua dulce proveniente desde el Sur desarrollaría los mayores gradientes en el inicio de la zona aluvial, los que disminuirían considerablemente en la zona marginal, para prácticamente extinguirse en el núcleo. En la zona marginal, los niveles son aproximadamente 6 m más someros que en el núcleo, ascenso que ocurre en aproximadamente 5 km, y que configura un gradiente del orden de 0,1%. En la zona aluvial, y en una longitud similar, los niveles son entre 6 m a 22 m más someros que en el núcleo, correspondiendo a un gradiente del orden de 0,2% a 0,3%. Por su parte, en el salar las variaciones en longitudes similares son del orden un par de decenas de centímetros, correspondiendo a gradientes menores, del orden de 0,05%.

La traza de las curvas de piezometría dentro del núcleo de halita indica que todo su sector sur y este, aledaño a la zona marginal, es una zona de convergencia de flujos regionales. Adicionalmente, las correcciones por densidad implican un aumento en los potenciales asociados a la salmuera respecto de los considerados en la piezometría sin corregir (Figura 4-120). Esto reforzaría el concepto de que, en condiciones preoperacionales, el sector de la salmuera en el sistema Peine corresponda, al igual que en Tilopozo y Quelana, a zonas de convergencia de flujos y de evaporación regional.

Figura 4-136. Piezometría sin corrección por densidad interpretada para el año 1986.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

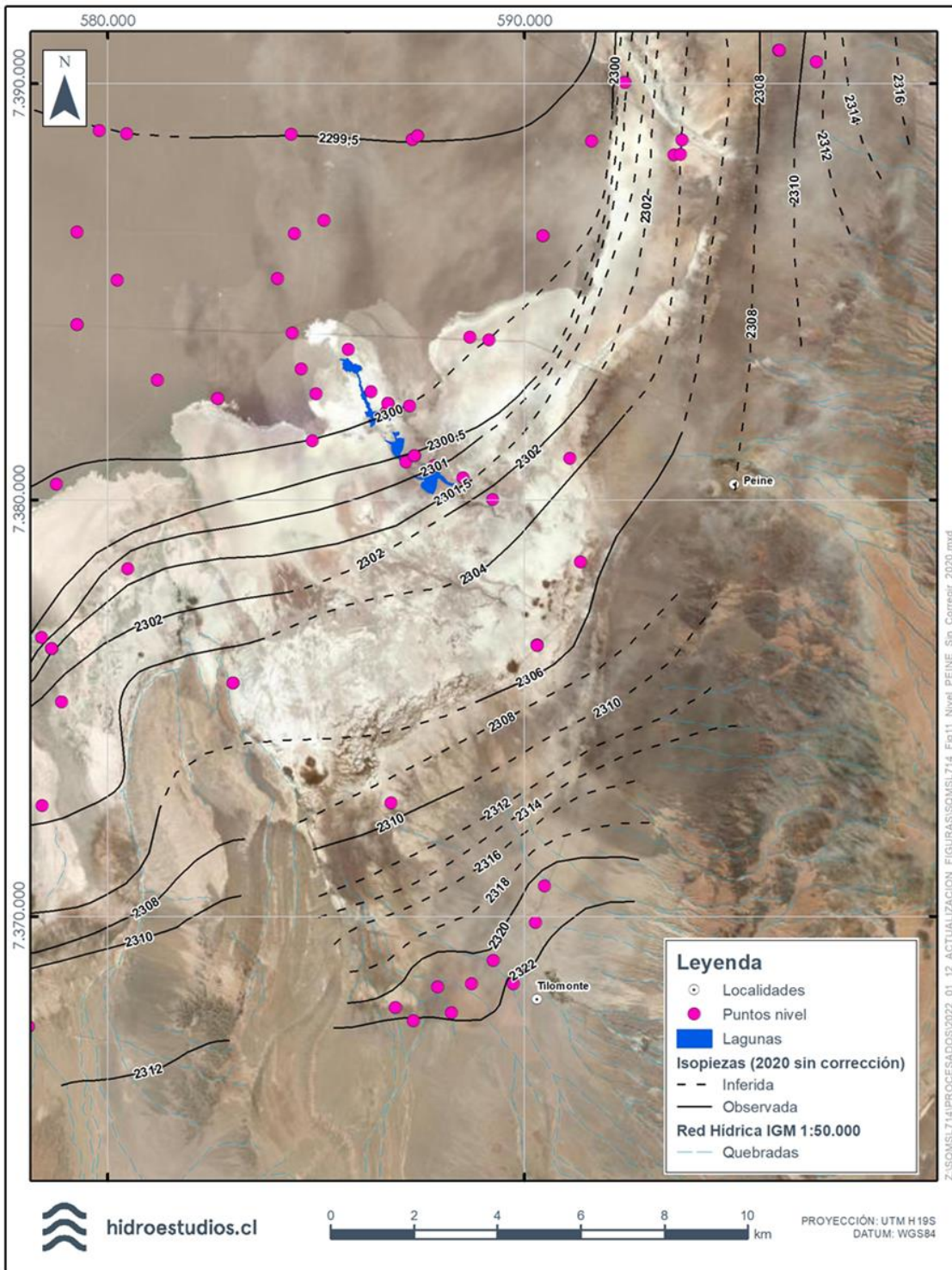


- Piezometría octubre a diciembre 2020

La Figura 4-152 muestra la piezometría interpretada para el último trimestre de 2020. En comparación con aquella interpretada para 1986, se aprecia que el cambio de niveles está acotado al núcleo y el sector de la salmuera, con un descenso de aproximadamente 1 m (desde aproximadamente 2.300,5 m.s.n.m. hasta 2299,5 m.s.n.m.).

El gradiente de flujo aparente, sin correcciones por densidad, se dirige en dirección norte, ampliando la zona que puede considerarse de convergencia de flujos, indicada por la curvatura de la curva 2.299.5 m.s.n.m., que se infiere a partir de los niveles en los pozos PN-03, P-03, MSW-425 y PN-07.

Figura 4-137. Piezometría sin corrección por densidad interpretada para diciembre de 2020.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

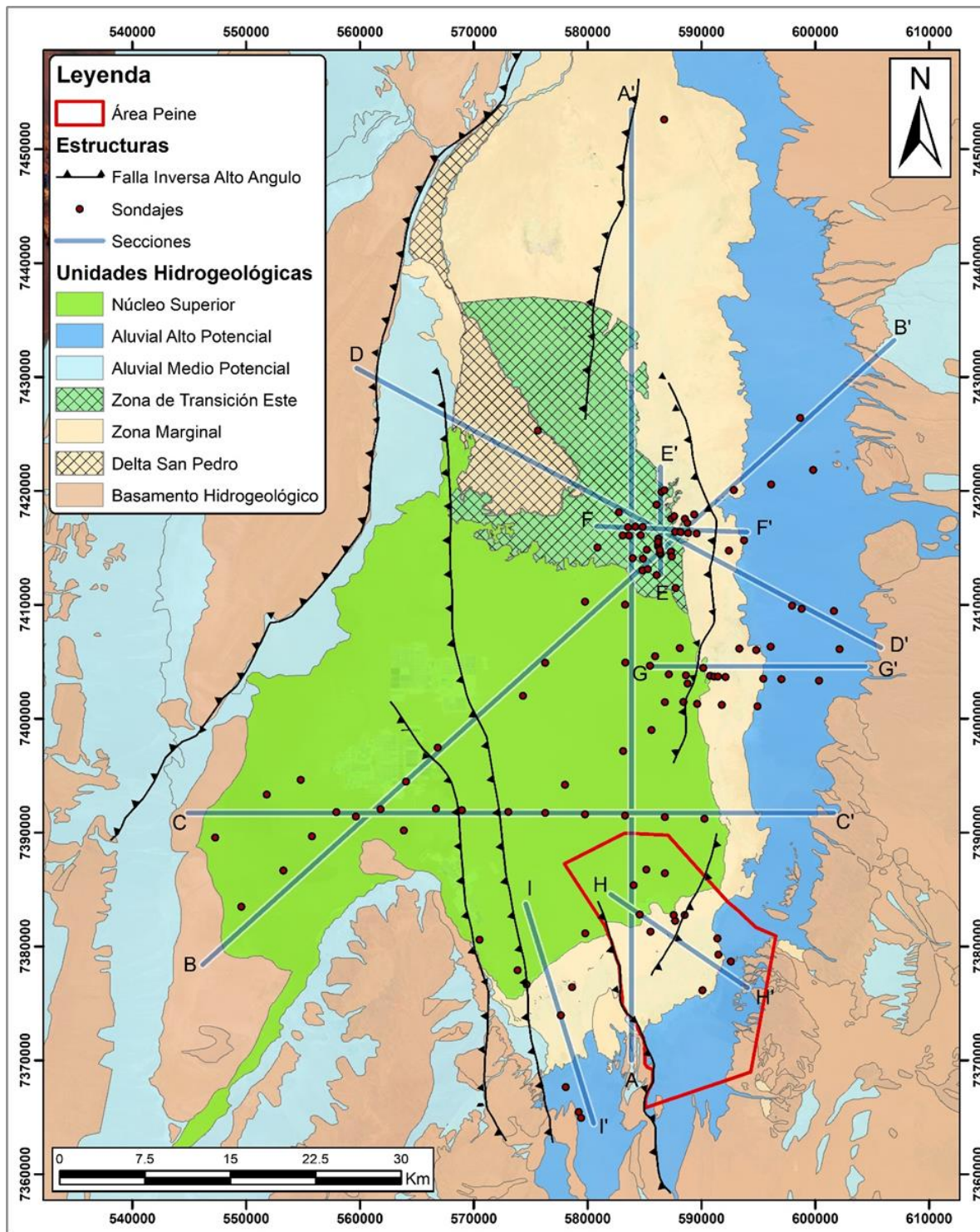
#### 4.3.7.5.1.4.3.5 Unidades Hidrogeológicas

En el área definida para el Sistema Peine se reconocen seis de las ocho UHs descritas a escala regional, estando ausentes las UH Zona Transición Este y UH Delta San Pedro. Destacan por su extensión areal las UH Aluvial, UH Zona Marginal y UH Núcleo Superior, Núcleo Intermedio y Núcleo Profundo.

La descripción detallada de estas unidades se presenta en acápite 4.3.7.5.1.3.5.4, mientras que la distribución en planta y en profundidad para este sector, se presentan en la Figura 4-138 y Figura 4-139.

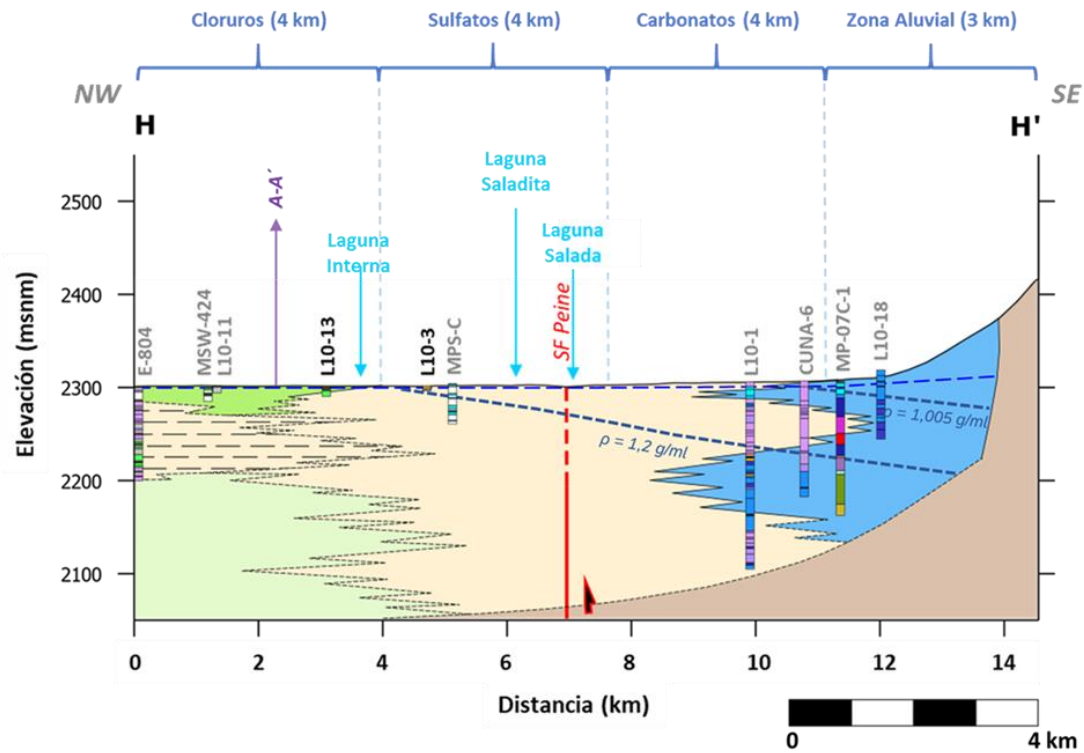


Figura 4-138. Mapa de unidades hidrogeológicas del Sistema local Peine.



Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-139. Sección hidrogeológica H-H'. Traza de la sección en Figura 4-138.



**SIMBOLOGÍA**

Unidades hidrogeológicas		Otros			
	Núcleo Superior		Lentes de limos y/o arcillas		Nivel freático
	Núcleo Intermedio		Falla observada/proyectada		Cuña Salina
	Núcleo Profundo		Contacto observado/inferido		
	Zona marginal		Techo observado/inferido de Secuencia heterogénea de sulfatos, tobas y tufitas		
	Delta San Pedro		Sistema lagunar		
	Aluvial (alto potencial)		Cruce con otra seccion		
	Aluvial (medio potencial)		Pozo X Pozo a < 1 km de traza		
	Basamento		Pozo Y Pozo a 1 - 6 km de traza		

Fuente: SQM, 2021.



#### 4.3.7.5.1.4.3.6 Balance Hídrico

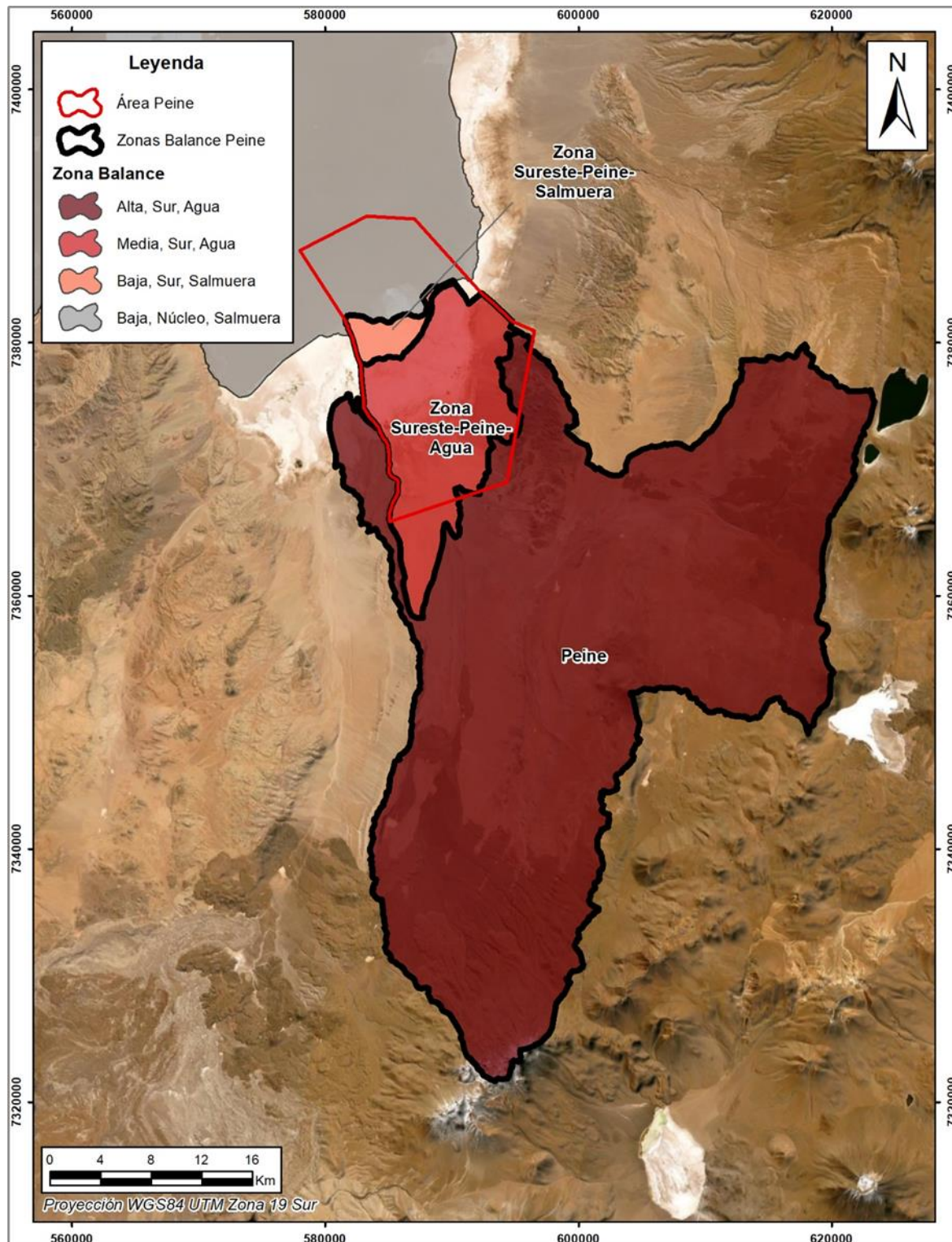
Tal como se indicó en el acápite 4.3.7.5.1.3.6, para estimar el balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama, esta se divide en zonas de balance, las cuales fueron agrupadas en función de su posición geográfica, en función de su altitud, y según el tipo de fluido analizado, el cual puede ser agua o salmuera. Para el caso particular del sistema local Peine, una parte del área se ubica en la zona de salmuera y otra en la zona de agua. En el sistema de salmuera, se tiene la zona de balance Zona Sureste Peine – Salmuera, la cual corresponde a zonas bajas. En el caso del sistema de agua, este incluye las zonas de balance Peine, ubicada en la zona alta; además de la Zona Sureste Peine – Agua, localizada en la zona media. La ubicación de cada una de las zonas antes mencionadas se muestra en la Figura 4-124.

Es importante señalar que, en el caso del sistema local de Peine el balance considera las zonas de balance asociadas a este sistema que abarcan un área mayor al área de balance hídrico del modelo conceptual, debido a que esta delimitación incluye a la totalidad de las entradas del sistema agua

En el sistema local Peine, se define como zona de balance a la sección de las zonas altas, medias y bajas por las cuales se produce una entrada lateral al núcleo.

Con respecto a la temporalidad de los balances, se consideran los mismos 2 escenarios presentados en el balance regional: uno previo a la operación de SQM y otro considerando las actividades productivas del Titular.

Figura 4-140. Zonas de balance de agua y salmuera utilizadas Sistema Peine.



Fuente: Basado en SRK (2020).

4.3.7.5.1.4.3.6.1 Balance de agua

El planteamiento del balance de agua en el sistema Peine, es igual al presentado para el caso regional en el acápite 4.3.7.5.1.3.6.1, mientras que el detalle de la obtención de cada uno de los valores se presenta en el Anexo 5.5: Modelo Hidrogeológico Conceptual del Sistema Peine.

Considerando lo anterior, en este capítulo se entregan los resultados de balance obtenidos para el sector Peine, del cual se obtiene un balance positivo que deja un caudal disponible de 36 L/s para recargar las zonas de salmuera. Esta condición corresponde tanto al período preoperacional como al operacional, debido a que las entradas al sistema son estimadas mediante la aplicación de la distribución de precipitaciones en el largo plazo, no se cuenta con superficies que reduzcan las áreas de recarga y, en el caso de las descargas, también se mantienen las salidas, puesto que tanto las superficies lagunares como las de vegetación consideran una condición de largo plazo, no se producen extracciones en este sector y, en el caso de la evaporación desde el acuífero, no se obtienen cambios de nivel freático significativos en las zonas marginales de agua, que es donde se produce la mayor evaporación de este fluido.

Los resultados, en términos agregados, indican que en la zona alta (Peine) es donde ocurre la mayor recarga al acuífero (237 L/s). Desde esta zona, el agua fluye por el acuífero aluvial y, lo que no es evaporado, se traspa hacia la zona media (169 L/s). Para efectos del balance, la zona media incluye parte del sistema aluvial y parte de la zona marginal. Hacia el norte, la zona media limita con el sistema de salmuera que reside también en la zona marginal, siendo la interfaz salina el límite entre ambas áreas (Tabla 4-56).

Tabla 4-56. Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo preoperacional y operacional.

SECTOR	ZONAS DE BALANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
		Recarga Directa	Recarga Lateral	Escorrentía	Recarga desde otras zonas	Evaporación desde el acuífero	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Disponible para descarga hacia otras zonas	Variación de almacenamiento
S	Alta-Sur Peine-Agua	39	14	184		0	34,3	33	0	169	0
	Media-Sur Peine-Agua	38	0	15	169	84	40,2	62	0	36	0
TOTAL		1.278	242	3.345		1.531	534,2	2.157	5	205	0

Fuente: SRK Consulting (2020).

4.3.7.5.1.4.3.6.2 Laguna Saladita

Para el balance del sistema lagunar de Peine (Figura 4-141), se considera como referencia a la laguna Saladita, debido a que se ubica más cerca de las actividades mineras que se desarrollan en el núcleo, por lo que los efectos potenciales de las extracciones se identificarían antes y en mayor magnitud. Si bien la laguna

Interna se ubica más cerca del núcleo, este cuerpo de agua corresponde a un desborde, el cual presenta una extensión variable en función del período que se esté evaluando y la estacionalidad.

En la Figura 4-142 se muestra un esquema conceptual de los flujos de entrada y salida a las lagunas Saladita e Interna, a partir del cual se obtiene que el balance hídrico en la laguna Saladita está dado por la expresión:

$$\Delta S = Q_{ENTRADA\ Saladita} + Pp_{Saladita} - Q_{EVAP\ Saladita} - Q_{INFILTRACION\ Saladita} - Q_{DESBORDE\ Saladita}$$

Donde:

$\Delta S$  = Variación en el almacenamiento en la laguna Saladita (L/s).

$Q_{ENTRADA\ Saladita}$  = Caudal de entrada en la laguna Saladita dada por datos de aforo Saladita (L/s).

$Pp_{Saladita}$  = Recarga por precipitaciones en la laguna Saladita (L/s).

$Q_{EVAP\ Saladita}$  = Caudal de salida por evaporación desde lámina libre en la laguna Saladita (L/s).

$Q_{INFILTRACION\ Saladita}$  = Caudal de salida por infiltración desde la laguna Saladita (L/s).

$Q_{DESBORDE\ Saladita}$  = Caudal de salida que llega a las zonas de desborde (L/s).

Es importante señalar que, si bien se han identificado aportes menores de agua al sistema hídrico superficial entre las lagunas Salada y Saladita, estos no son considerados, ya que resulta difícil establecer un valor concreto para los mismos debido a las pérdidas por evaporación y posibles infiltraciones que se produzcan entre los puntos de aforo.

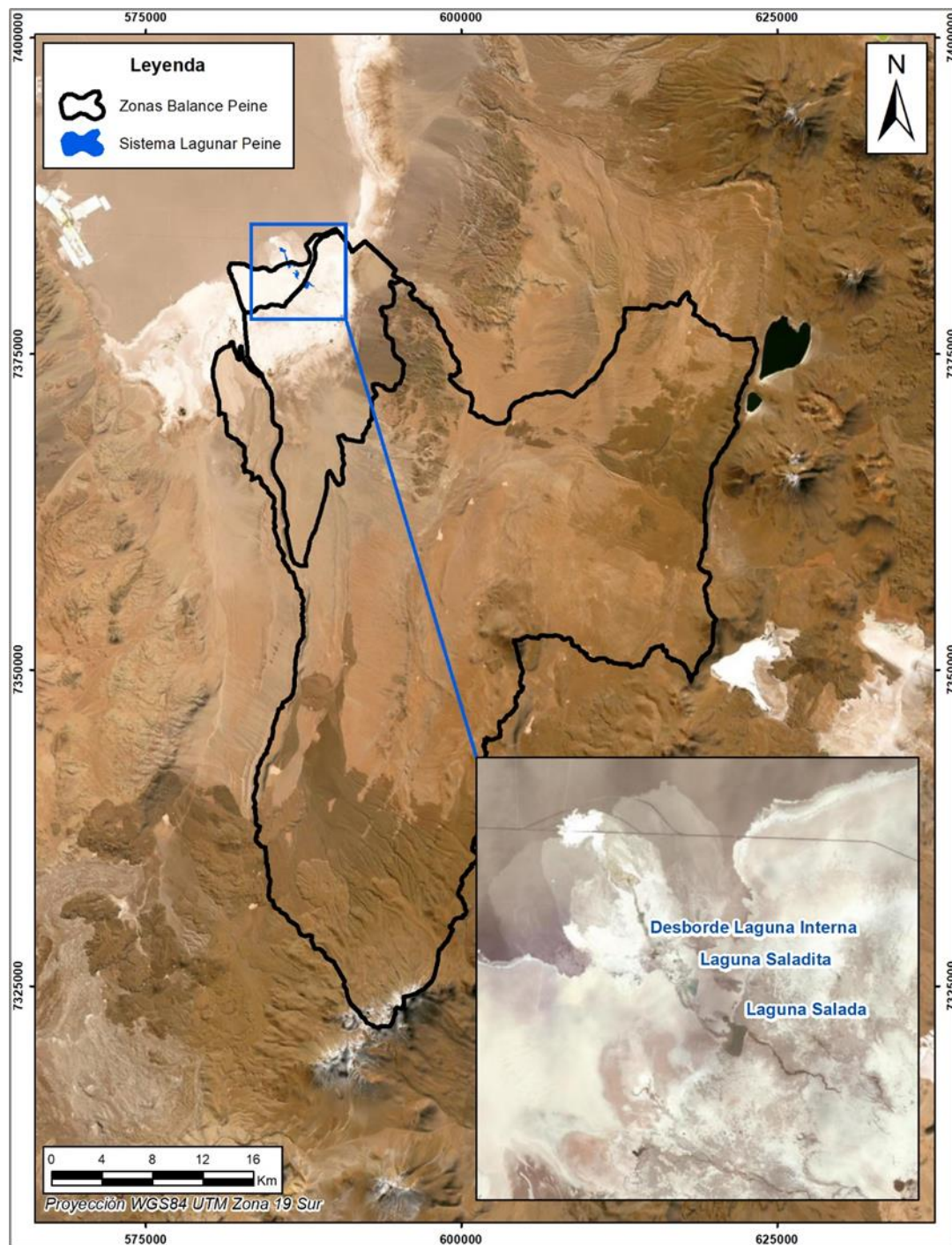
Los términos  $Q_{INFILTRACION\ Saladita}$  y  $Q_{DESBORDE\ Saladita}$  son desconocidos, ya que no se dispone de aforos en el canal de salida de la laguna, ni de mediciones de caudal de infiltración desde los cuerpos lacustres, por lo que se agrupan como caudal excedente ( $Q_{EXCEDENTE\ Saladita}$ ) obteniéndose la siguiente expresión:

$$Q_{EXCEDENTE\ Saladita} = Q_{ENTRADA\ Saladita} + Pp_{Saladita} - Q_{EVAP\ Saladita} - \Delta S$$

El detalle de la metodología utilizada para cuantificar cada uno de los componentes del balance de la Laguna Saladita se presenta en el Anexo 5.5: Modelo Hidrogeológico Conceptual del Sistema Peine, mientras que los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4-57.



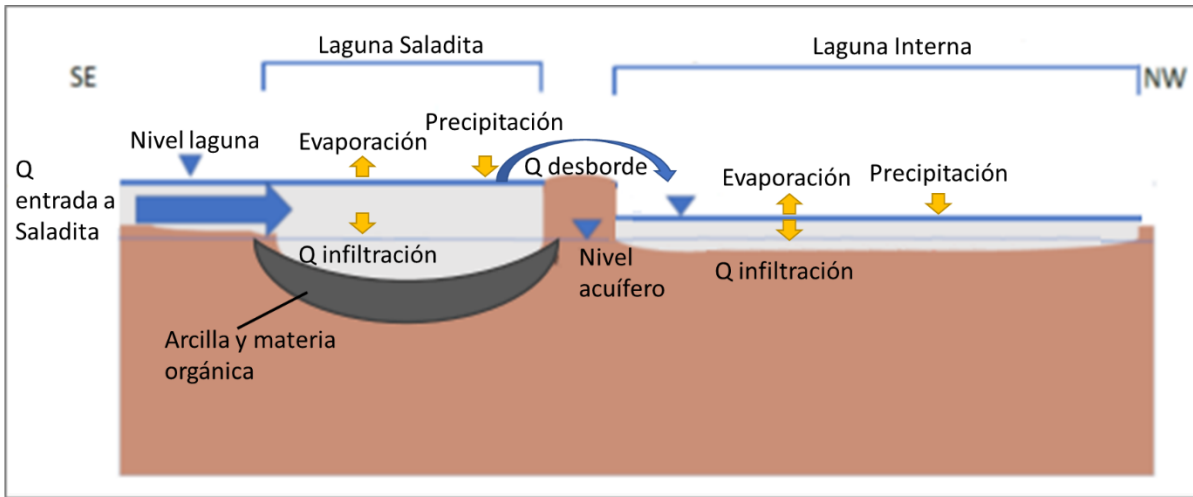
Figura 4-141. Ubicación de cuerpos lagunares en el sistema local Peine.



Fuente: SQM, 2021.



Figura 4-142. Esquema conceptual de la dinámica de flujos de entrada y salida del sistema lagunar de Saladita e Interna.



Fuente: SQM, 2021.

Tabla 4-57. Valores promedio por mes para componentes del balance en laguna Saladita.

Mes	Entradas (L/s)			Salidas (L/s)				$\Delta S$ (L/s)
	Precipitación promedio mensual	Aforo promedio mensual	Total Entradas	Evaporación promedio mensual laguna Saladita	Q Infiltración promedio mensual desde Saladita	Q Excedente promedio mensual (desborde)	Total Salidas	
Ene	0,0	39,1	39,2	9,0	0,2	30,1	39,4	-0,2
Feb	0,2	34,9	35,1	8,5	0,2	26,6	35,4	-0,2
Mar	0,0	42,5	42,5	7,7	0,2	34,7	42,7	-0,2
Abr	0,2	63,4	63,6	6,4	0,2	57,1	63,8	-0,2
May	0,1	65,9	65,9	4,9	0,2	60,9	66,0	-0,1
Jun	0,1	70,8	70,9	4,6	0,2	66,1	71,0	-0,1
Jul	0,0	76,2	76,2	4,0	0,2	72,2	76,4	-0,2
Ago	0,0	62,4	62,5	4,9	0,2	57,8	62,8	-0,4
Sept	0,0	51,0	51,1	6,4	0,2	44,1	50,7	0,3
Oct	0,0	33,2	33,2	7,8	0,2	25,5	33,5	-0,4
Nov	0,0	30,7	30,7	8,6	0,2	22,3	31,1	-0,4
Dic	0,0	29,3	29,3	9,3	0,2	20,0	29,5	-0,2
Prom	0,0	50,0	50,0	6,8	0,2	43,1	50,2	-0,2

Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.4 Sistema Ambiental Tilopozo

##### 4.3.7.5.1.4.4.1 Parámetros hidráulicos

De los 631 puntos con información de parámetros hidráulicos, 78 ensayos se ubican dentro del Sistema de Tilopozo.

En particular, los tipos de ensayo realizados para estimar la conductividad hidráulica en sector corresponden a 36 pruebas de bombeo, 24 slug test, 17 pruebas Lefranc de carga constante o variable, y un ensayo Lugeon. Las pruebas de bombeo se consideran representativas de una escala espacial mayor.

Las mediciones asociadas a cada pozo y unidad geológica se muestran en la Tabla 4-54. La ubicación de los puntos con información se muestra en la Figura 4-143.

Para la unidad Cloruros Superiores, se cuenta con 31 pruebas de bombeo, que entregan valores de conductividad hidráulica en el rango 0,22 m/d a 6.937,7 m/d. Los 6 ensayos Lefranc disponibles para esta unidad entregan valores menores, de entre 0,01 m/d y 0,6 m/d.

Para la unidad Sulfatos solo se cuenta con 2 pruebas de bombeo, que entregan valores de conductividad hidráulica entre 301,7 m/d y 363,5 m/d.

Para la unidad Carbonatos se cuenta con 22 slug test, que entregan valores de conductividad hidráulica en el rango 0,01 m/d a 22,3 m/d. Los 11 ensayos Lefranc disponibles para esta unidad entregan valores en un rango similar, de entre 0,014 m/d y 34,4 m/d.

Por último, la unidad Depósitos No Consolidados cuenta con tres tipos de ensayos: 2 pruebas de bombeo, que entregan valores de conductividad hidráulica de 50 m/d y 100 m/d; 2 slug test, que entregan valores de conductividad hidráulica de 0,35 m/d y 7,1 m/d; y 1 ensayo Lugeon, con un valor de 0,34 m/d.

Todas estas estimaciones son consistentes con el rango descrito a nivel regional (Tabla 4-28).

**Tabla 4-58. Valores de conductividad hidráulica por unidad geológica en el Sistema Tilopozo.**

Pozo	Tipo de ensayo	K (m/d)	Unidad Geológica
MP-01A	Lefranc de carga constante	0,038	Carbonatos Con Limos
MP-01A	Lefranc de carga variable	0,23	Carbonatos Con Limos
MP-01A	Slug Test	22,3	Carbonatos Con Limos
MP-02A	Lefranc	29,7	Carbonatos Con Limos
MP-02A	Lefranc de carga constante	0,014	Carbonatos Con Limos
MP-02A	Lefranc de carga variable	0,23	Carbonatos Con Limos
MP-03A	Lefranc	34,4	Carbonatos Con Limos
MP-03A	Lefranc de carga constante	0,34	Carbonatos Con Limos
MP-03A	Lefranc de carga variable	5,13	Carbonatos Con Limos
MP-03B	Lefranc	21	Carbonatos Con Limos
MP-03B	Lefranc de carga constante	21	Carbonatos Con Limos

Tabla 4-58. Valores de conductividad hidráulica por unidad geológica en el Sistema Tilopozo.

Pozo	Tipo de ensayo	K (m/d)	Unidad Geológica
MP-03B	Lefranc de carga variable	2,58	Carbonatos Con Limos
TPZ-10	Slug Test	2,98	Carbonatos Con Limos
TPZ-11A	Slug Test	0,1	Carbonatos Con Limos
TPZ-11B	Slug Test	0,66	Carbonatos Con Limos
TPZ-11C	Slug Test	1,25	Carbonatos Con Limos
TPZ-12	Slug Test	2,13	Carbonatos Con Limos
TPZ-13C	Slug Test	0,32	Carbonatos Con Limos
TPZ-13E	Slug Test	0,34	Carbonatos Con Limos
TPZ-130	Slug Test	0,31	Carbonatos Con Limos
TPZ-1A	Slug Test	0,06	Carbonatos Con Limos
TPZ-1B	Slug Test	0,27	Carbonatos Con Limos
TPZ-1C	Slug Test	1,13	Carbonatos Con Limos
TPZ-4	Slug Test	1,3	Carbonatos Con Limos
TPZ-5A	Slug Test	1,06	Carbonatos Con Limos
TPZ-5B	Slug Test	0,2	Carbonatos Con Limos
TPZ-6	Slug Test	3,29	Carbonatos Con Limos
TPZ-7A	Slug Test	0,36	Carbonatos Con Limos
TPZ-7B	Slug Test	3,35	Carbonatos Con Limos
TPZ-8	Slug Test	0,51	Carbonatos Con Limos
TPZ-9A	Slug Test	0,01	Carbonatos Con Limos
TPZ-9B	Slug Test	0,3	Carbonatos Con Limos
TPZ-9C	Slug Test	1,92	Carbonatos Con Limos
CAO-4.1	Prueba de Bombeo	40,9	Cloruros Superiores
CAO-4.2	Prueba de Bombeo	10,7	Cloruros Superiores
CAO-5	Prueba de Bombeo	30,2	Cloruros Superiores
CAO-6	Prueba de Bombeo	4,2	Cloruros Superiores
CAO-7	Prueba de Bombeo	7,1	Cloruros Superiores
CL-1	Prueba de Bombeo	665	Cloruros Superiores
CL-11	Prueba de Bombeo	83,6	Cloruros Superiores
CL-12	Prueba de Bombeo	12,5	Cloruros Superiores
CL-13	Prueba de Bombeo	115	Cloruros Superiores

Tabla 4-58. Valores de conductividad hidráulica por unidad geológica en el Sistema Tilopozo.

Pozo	Tipo de ensayo	K (m/d)	Unidad Geológica
CL-16	Prueba de Bombeo	10,3	Cloruros Superiores
CL-21	Prueba de Bombeo	13,4	Cloruros Superiores
CL-21 obs	Prueba de Bombeo	13,6	Cloruros Superiores
CL-22	Prueba de Bombeo	3,54	Cloruros Superiores
CL-23	Prueba de Bombeo	76	Cloruros Superiores
CL-24	Prueba de Bombeo	63,1	Cloruros Superiores
CL-25	Prueba de Bombeo	40,6	Cloruros Superiores
CL-28	Prueba de Bombeo	2,6	Cloruros Superiores
CL-29	Prueba de Bombeo	7,43	Cloruros Superiores
CL-37	Prueba de Bombeo	86,4	Cloruros Superiores
CL-6	Prueba de Bombeo	13,4	Cloruros Superiores
CL0-53.1	Prueba de Bombeo	0,22	Cloruros Superiores
CL0-53.2	Prueba de Bombeo	0,22	Cloruros Superiores
CL0-61	Prueba de Bombeo	3,36	Cloruros Superiores
P-01	Lefranc de carga constante	0,066	Cloruros Superiores
P-01	Lefranc de carga variable	0,026	Cloruros Superiores
P-02	Prueba de Bombeo	13,6	Cloruros Superiores
P-02	Lefranc de carga constante	0,6	Cloruros Superiores
P-02	Lefranc de carga variable	0,01	Cloruros Superiores
P-03	Lefranc de carga constante	0,22	Cloruros Superiores
P-03	Lefranc de carga variable	0,15	Cloruros Superiores
PN-05	Prueba de Bombeo	2813,5	Cloruros Superiores
PN-05A	Prueba de Bombeo	4071,2	Cloruros Superiores
PN-05B	Prueba de Bombeo	3962,2	Cloruros Superiores
PN-14	Prueba de Bombeo	6397,7	Cloruros Superiores
PN-14A	Prueba de Bombeo	1195,9	Cloruros Superiores
PN-14B	Prueba de Bombeo	1195,9	Cloruros Superiores
TRENCH	Prueba de Bombeo	10,4	Cloruros Superiores
TE-1	Lugeon	0,34	Depósitos No Consolidados
TM-1	Prueba de Bombeo	50	Depósitos No Consolidados
TPW-1	Prueba de Bombeo	100	Depósitos No Consolidados

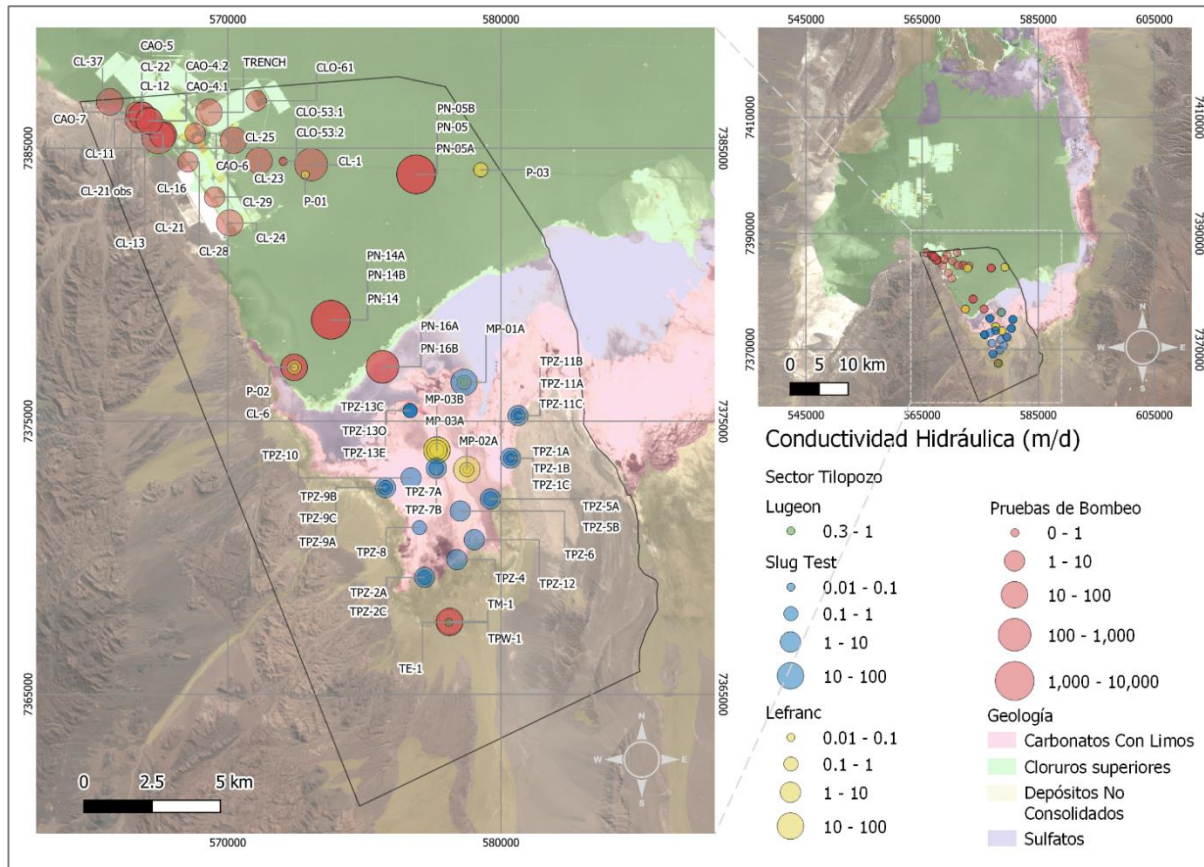
Tabla 4-58. Valores de conductividad hidráulica por unidad geológica en el Sistema Tilopozo.

Pozo	Tipo de ensayo	K (m/d)	Unidad Geológica
TPZ-2A	Slug Test	7,1	Depósitos No Consolidados
TPZ-2C	Slug Test	0,35	Depósitos No Consolidados
PN-16A	Prueba de Bombeo	301,7	Sulfatos
PN-16B	Prueba de Bombeo	363,5	Sulfatos

Fuente: SQM, 2021.



Figura 4-143. Distribución espacial de valores de conductividad hidráulica estimados en unidades geológicas del sistema Tilopozo.



Fuente: SQM, 2021.

En cuanto al almacenamiento, los tipos de ensayos realizados para estimarlo en el Sistema Tilopozo corresponden solo a pruebas de bombeo.

Las mediciones asociadas a cada pozo y unidad geológica se muestran en la Tabla 4-59. La ubicación de los puntos con información se muestra en la Figura 4-144.

Para la unidad de Cloruros Superiores, se cuenta con 16 pruebas de bombeo, que entregan valores de almacenamiento en el rango  $8 \times 10^{-3}$  a  $4,6 \times 10^{-1}$ .

Por otro lado, para la unidad de Sulfatos se cuenta con tres pruebas de bombeo, que entregan un valor de almacenamiento en el rango de  $1,5 \times 10^{-1}$  a  $2 \times 10^{-1}$ .

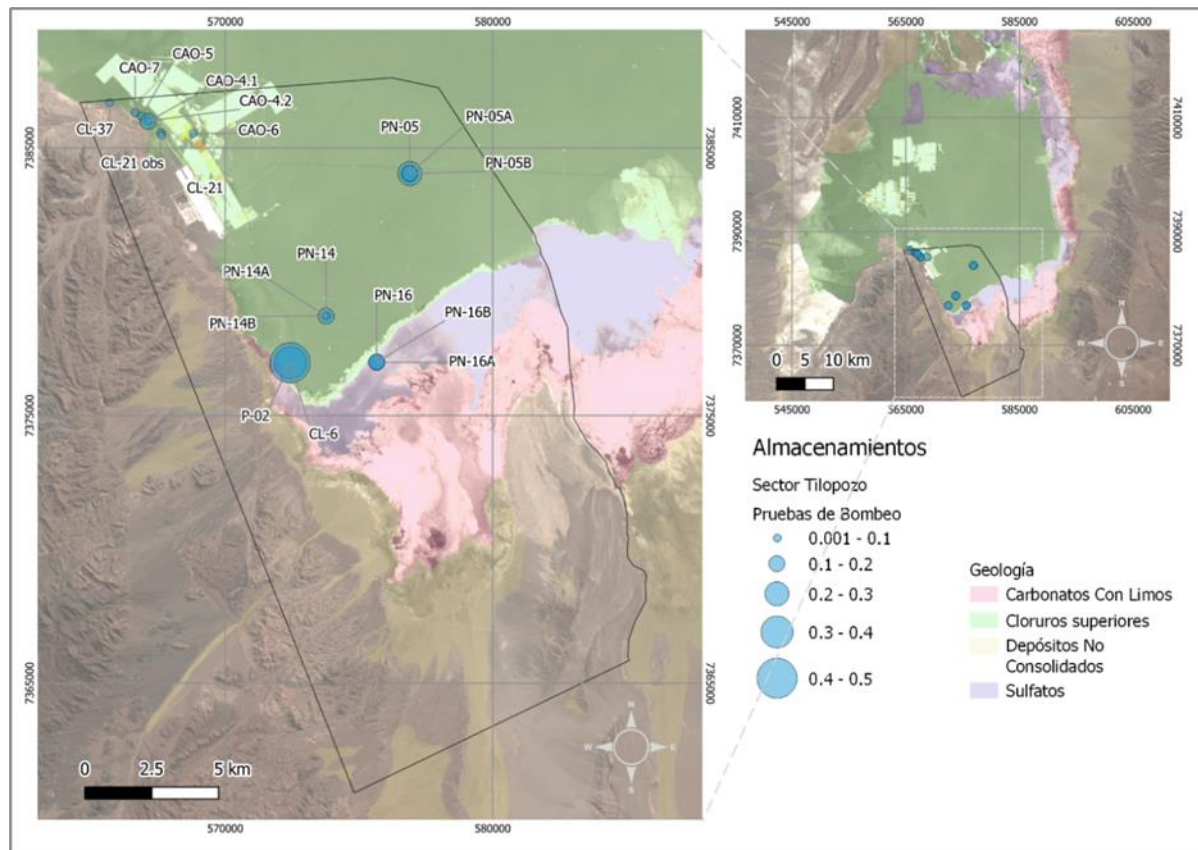
Estas estimaciones son consistentes con el rango descrito a nivel regional (Tabla 4-28).

Tabla 4-59. Valores de almacenamiento por unidad geológica en el Sistema Tilopozo.

Pozo	Tipo de ensayo	S	Unidad Geológica
CAO-4.1	Prueba de Bombeo	0,15	Cloruros Superiores
CAO-4.2	Prueba de Bombeo	0,042	Cloruros Superiores
CAO-5	Prueba de Bombeo	0,015	Cloruros Superiores
CAO-6	Prueba de Bombeo	0,053	Cloruros Superiores
CAO-7	Prueba de Bombeo	0,037	Cloruros Superiores
CL-21	Prueba de Bombeo	0,092	Cloruros Superiores
CL-21 obs	Prueba de Bombeo	0,07	Cloruros Superiores
CL-37	Prueba de Bombeo	0,1	Cloruros Superiores
CL-6	Prueba de Bombeo	0,46	Cloruros Superiores
P-02	Prueba de Bombeo	0,35	Cloruros Superiores
PN-05	Prueba de Bombeo	0,19	Cloruros Superiores
PN-05A	Prueba de Bombeo	0,17	Cloruros Superiores
PN-05B	Prueba de Bombeo	0,27	Cloruros Superiores
PN-14	Prueba de Bombeo	0,12	Cloruros Superiores
PN-14A	Prueba de Bombeo	0,008	Cloruros Superiores
PN-14B	Prueba de Bombeo	0,032	Cloruros Superiores
PN-16	Prueba de Bombeo	0,15	Sulfatos
PN-16A	Prueba de Bombeo	0,15	Sulfatos
PN-16B	Prueba de Bombeo	0,2	Sulfatos

Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-144. Distribución espacial de valores de almacenamiento estimados en unidades geológicas del sistema Tilopozo.



Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.4.2 Interfaz Salina

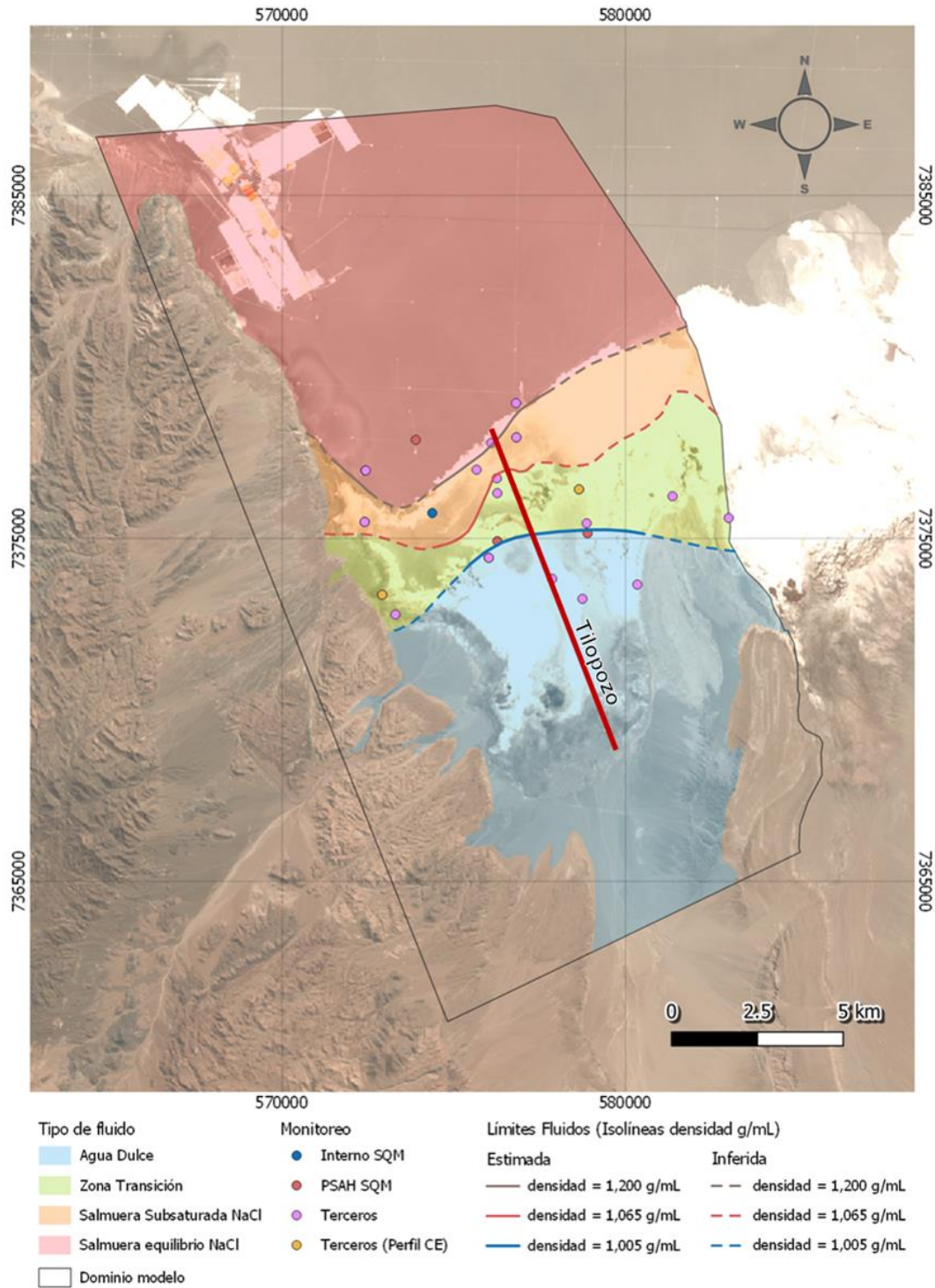
##### 4.3.7.5.1.4.4.2.1 Reconocimiento de zonas en superficie

De los 148 puntos con información de densidad utilizados para el reconocimiento regional de la interfaz salina en superficie, 25 se encuentran dentro del sector del Sistema Ambiental Tilopozo.

El detalle de la ubicación de estos puntos y de los límites locales se presenta en la Figura 4-145, mientras que los criterios de reconocimiento son los mismos presentados en el acápite 4.3.7.5.1.3.1.



Figura 4-145. Ubicación puntos de monitoreo e isólineas de densidad que indican afloramiento interfaz salina en sistema Tilopozo.



Fuente: SQM, 2021.

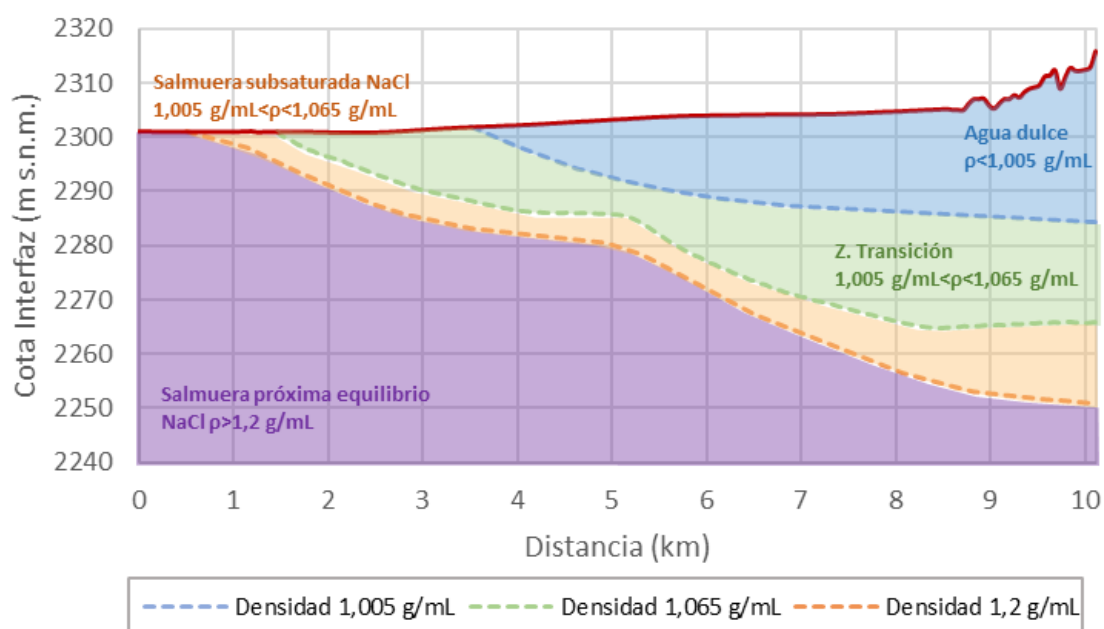


4.3.7.5.1.4.4.2.2 Reconocimiento de interfaz salina en profundidad

En base a la información descrita en el acápite 0, para delimitar la interfaz salina en profundidad, se analizó información de TEM y perfilajes de CE en 6 pozos del sistema Tilopozo (pozos ALB: MP-03C, MP-04C, MP-06C, MP-01C, MP-05C y MP-09C, Figura 4-55), lo que permitió la elaboración del perfil que se muestra en la Figura 4-146 que permite conocer la pendiente, forma y volumen de la interfaz salina en el área de Tilopozo. La ubicación de este perfil puede verse en la Figura 4-145.

El volumen de la interfaz corresponde a todo lo comprendido entre las isolíneas 1,005 y 1,2g/mL de densidad: fluido zona transición y salmuera subsaturada en NaCl.

Figura 4-146 Perfil 2D NW-SE del volumen ocupado por la interfaz salina para el sector de Tilopozo.



Fuente: SQM, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.4.3 Cuerpos de agua superficiales

#### 4.3.7.5.1.4.4.5 Cuerpos lagunares

El sistema de Tilopozo se compone de las Lagunas La Punta y La Brava y la Vega de Tilopozo. Sin embargo, al SQM no poseer extracción de agua dulce en este sector, sólo se analizarán los cuerpos Lagunares la Punta y La Brava, ubicados en la zona marginal, no la Vega de Tilopozo ya que su ubicación está fuera de algún posible efecto del proyecto de extracción de salmuera.

LA laguna La Punta se caracteriza por presentar numerosos islotes en todo el cuerpo lagunar, teniendo, por ende, una morfología mucho más irregular que La Brava. Debido a esto, en el mes de diciembre de 2017 se realizó un levantamiento batimétrico para caracterizar la morfometría del cuerpo lagunar de La Brava (Figura 4-147). A partir de la batimetría, se aprecia que la laguna representa una cubeta de tamaño similar a los otros sistemas, presentando un fondo plano y uniforme, ubicado a una profundidad máxima promedio de 50 cm.

SQM no realiza monitoreo de las superficies lacustres; no obstante, Albemarle, en su PSA aprobado mediante la RCA 23/2015, realiza mediciones semestrales en las lagunas La Punta y La Brava. En la Tabla 4-60 se indican los promedios anuales de las superficies lacustres generadas desde el 2015 a la fecha, obtenidas mediante el cálculo del promedio de las mediciones semestrales, considerando la estimación realizada con base en las imágenes de alta resolución Pleiades 1-A. Estas lagunas tienen la característica de presentar agua durante todo el año.

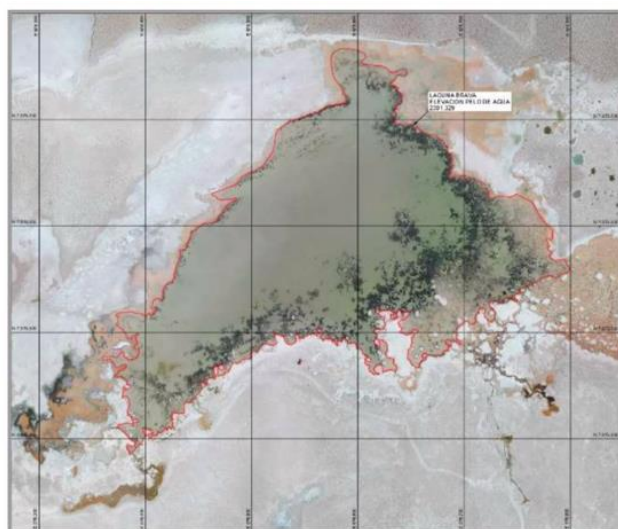
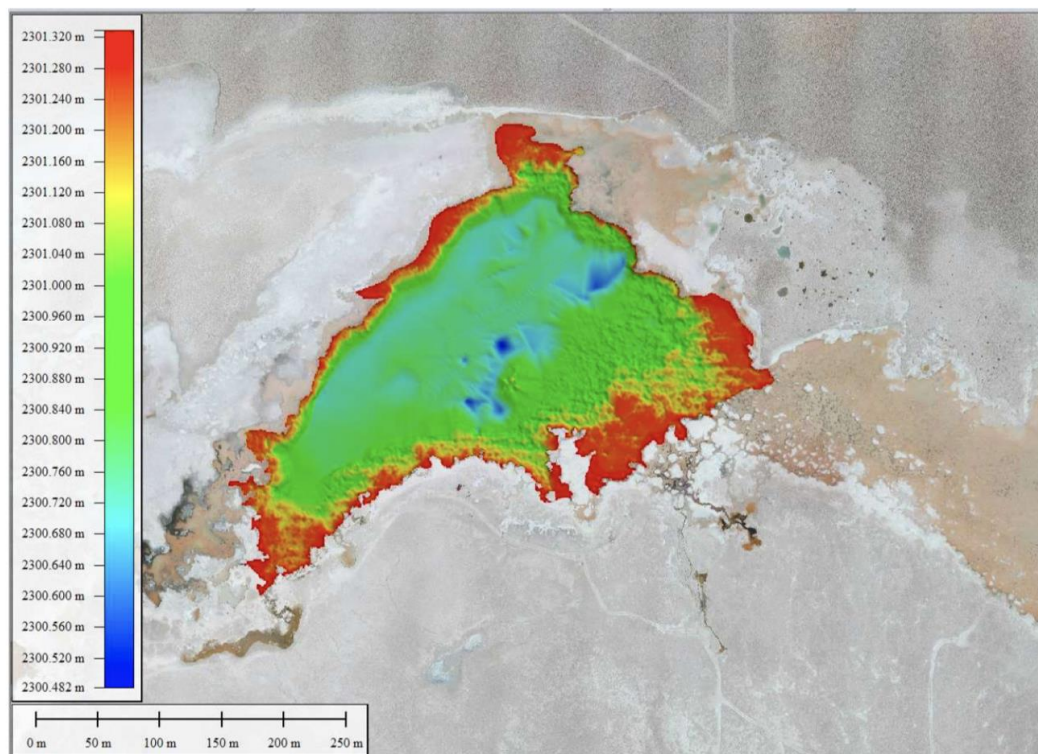
Adicionalmente, en el estudio realizado por SGA (2015) se analiza la superficie lagunar con imágenes satelitales LANDSAT para el periodo 1984 - 2014, indicando que los cuerpos de aguas varían mayormente en invierno respecto lo observado en el verano. Por su parte, las áreas estimadas en verano se han mantenido constantes. Sin embargo, al oeste de la laguna La Brava se evidencian cuerpos superficiales permanentes en invierno y no en verano. Los desbordamientos eventuales se concentran al norte del sistema, donde en verano se visualizan espejos de agua difusos mientras que en invierno una amplia zona de inundación.

Tabla 4-60. Superficies lacustres promedio anual generadas en el PSA de Albemarle desde el 2015 a 2020.

AÑO	SUPERFICIE (m <sup>2</sup> )
	La Punta y La Brava
2015	338.200
2016	441.500
2017	483.668
2018	489.025
2019	577.841
2020	399.295
PROMEDIO	454.922

Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-147. Arriba: Batimetría de Laguna La Brava. Abajo: Ortofoto con trazado de lámina de agua para Laguna La Brava e información del levantamiento realizado.



Fuente: Topoland, 2018

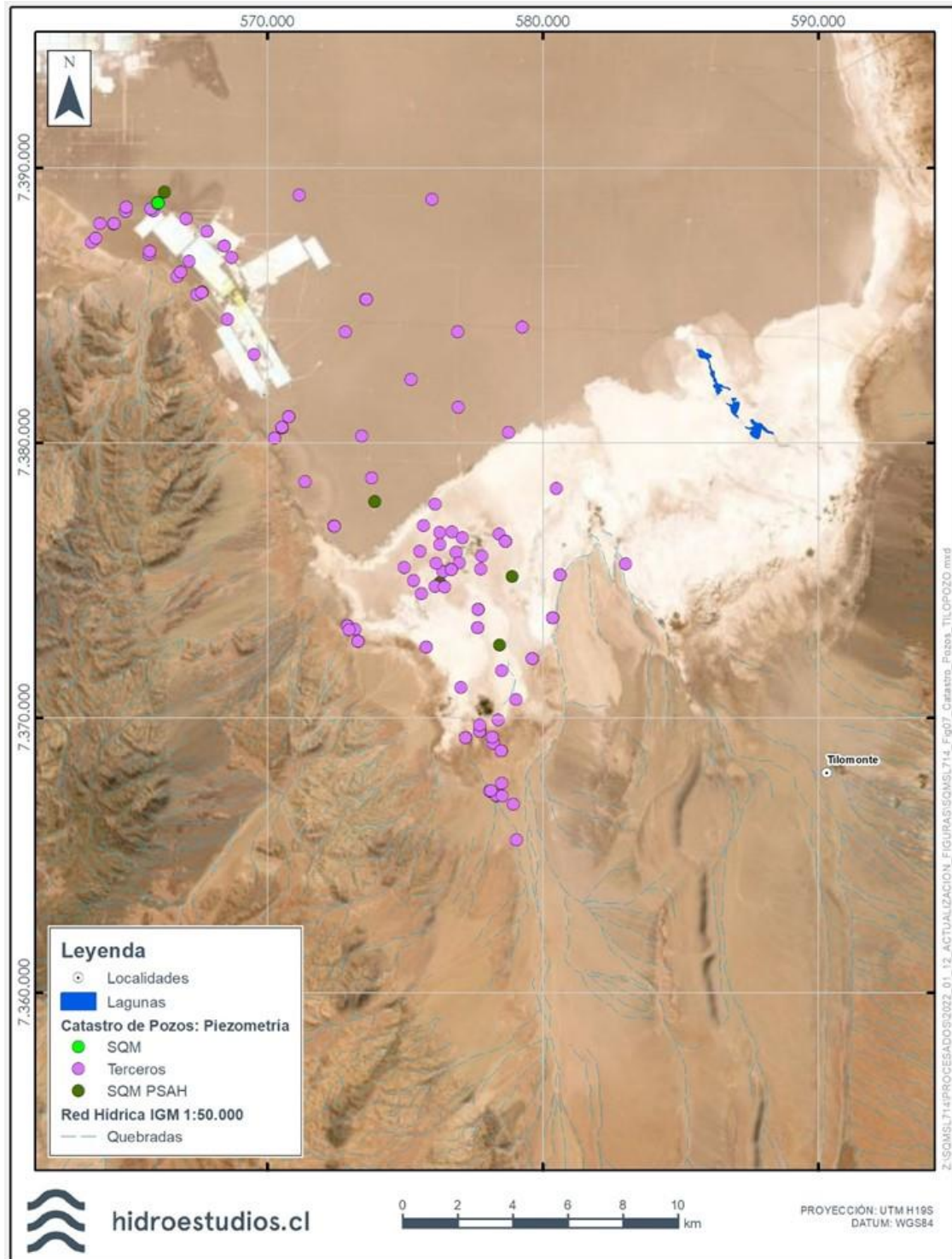
#### 4.3.7.5.1.4.5.1 Niveles de agua subterránea y piezometría

De los 509 puntos con nivel piezométrico a escala regional, 128 se encuentran en el sector del Sistema local de Tilopozo. Su ubicación y origen, se presenta en la Figura 4-148.

Al igual que en el caso regional, con el fin analizar el comportamiento de los niveles piezométricos a lo largo del tiempo en el Sistema Tilopozo, a continuación, se presenta la evolución de una serie de pozos representativos para los distintos tipos de fluidos (Figura 4-149).

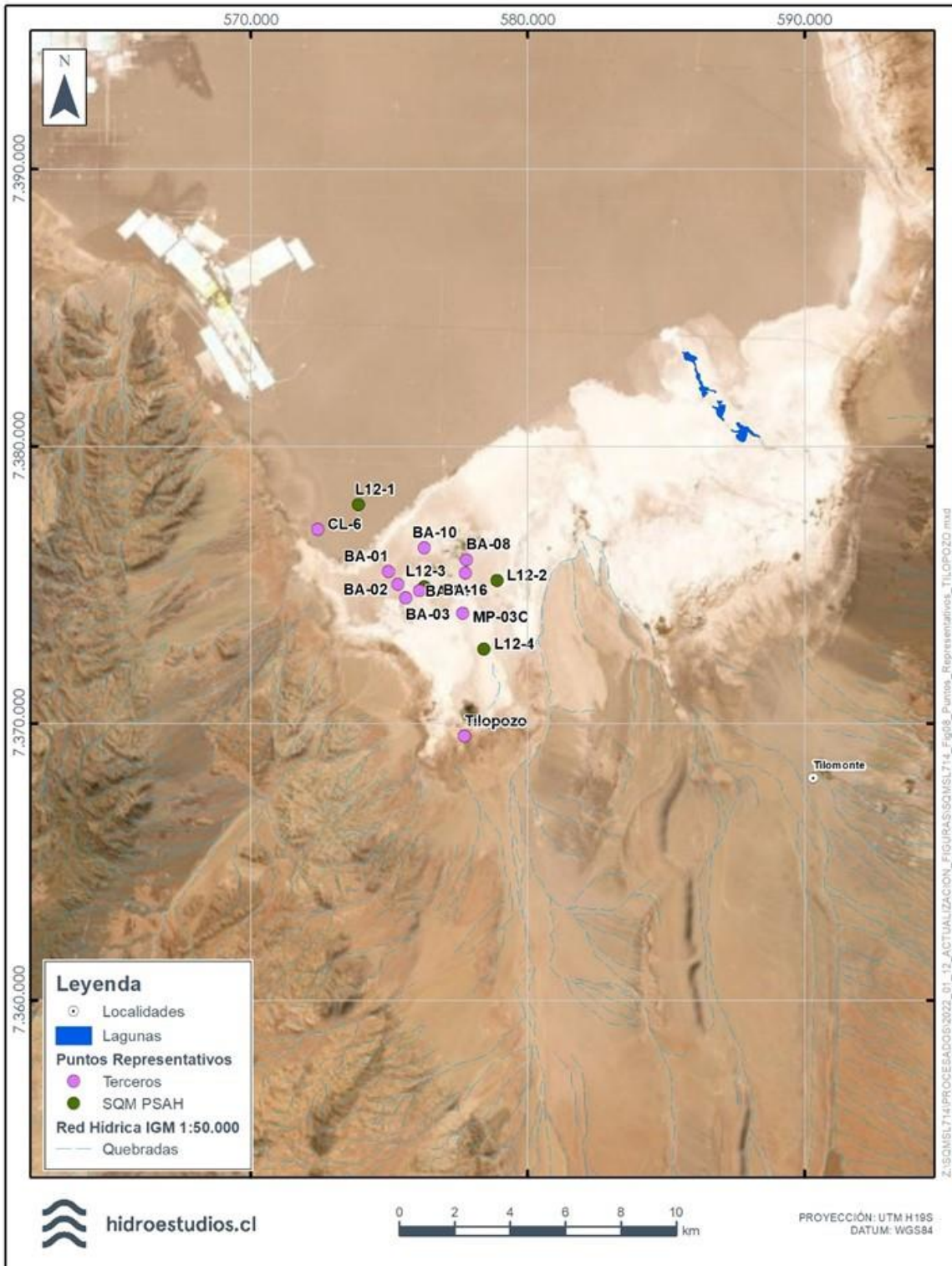


Figura 4-148 Pozos con información de nivel piezométrico Tilopozo.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

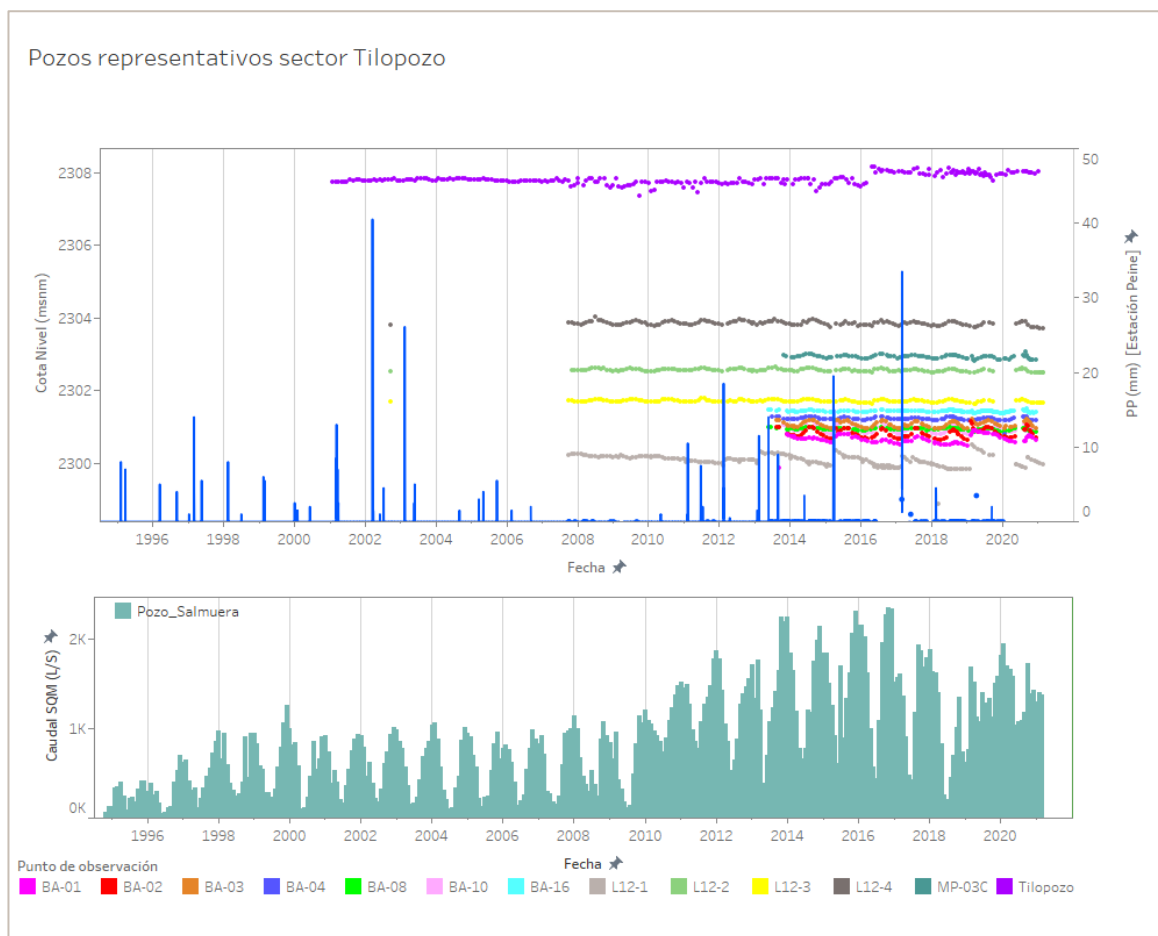
Figura 4-149 Puntos representativos de nivel piezométrico Tilopozo.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Los pozos L2-1 y CL-6 representativos del sistema salmuera, muestran una tendencia al descenso con máximos producto de los eventos de precipitación. Por otro lado, los pozos representativos del sistema agua, ubicados en la UH Zona Marginal (L12-2, L12-3, L12-4, BA-01, BA-02, BA-03, BA-08, BA-16, MP-03C) muestran registros de nivel oscilando alrededor de una cota fija, que varía en función de la posición del pozo. Mientras, los pozos más cercanos al núcleo presentan registros de nivel con oscilaciones de mayor amplitud y con una cierta tendencia al descenso (BA-10). Los más cercanos a la planicie aluvial (L12-4) muestran series con oscilaciones mucho más atenuadas en torno a niveles hidráulicos más altos y sin tendencia. Esto es consistente con lo observado en todos los otros sistemas locales (Figura 4-150).

Figura 4-150. Registro de niveles representativos en el sector de Tilopozo.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.5.1.1 Piezometría local

A continuación, se presenta la piezometría para el Sistema local Tilopozo, tanto para el periodo preoperacional (1986), como para el periodo actual (2020). El detalle de todos los puntos utilizados para la confección de la piezometría se presenta en el Anexo 5.6: Modelo Hidrogeológico Conceptual del Sistema Tilopozo.

- Piezometría 1986

La Figura 4-120 muestra la piezometría asociada al año 1986, construida considerando directamente los niveles medidos para el periodo preoperacional, sin correcciones por densidad. La mayoría de los niveles considerados corresponden a extrapolaciones de registros recientes, excepto aquellos de los pozos ubicados dentro del núcleo. Además, en el trazado de esta piezometría se ha considerado la operación de los pozos de extracción de Albemarle operativos antes de 1986 y los niveles registrados en pozos de observación aledaños, para definir un cono de depresión centrado en esta zona. Este cono, necesariamente, debe estar caracterizado en dicha piezometría, por cuando una de las características del núcleo superior es su alta permeabilidad, lo que implica una rápida propagación e intersección de los conos de bombeo local centrados en torno a cada pozo.

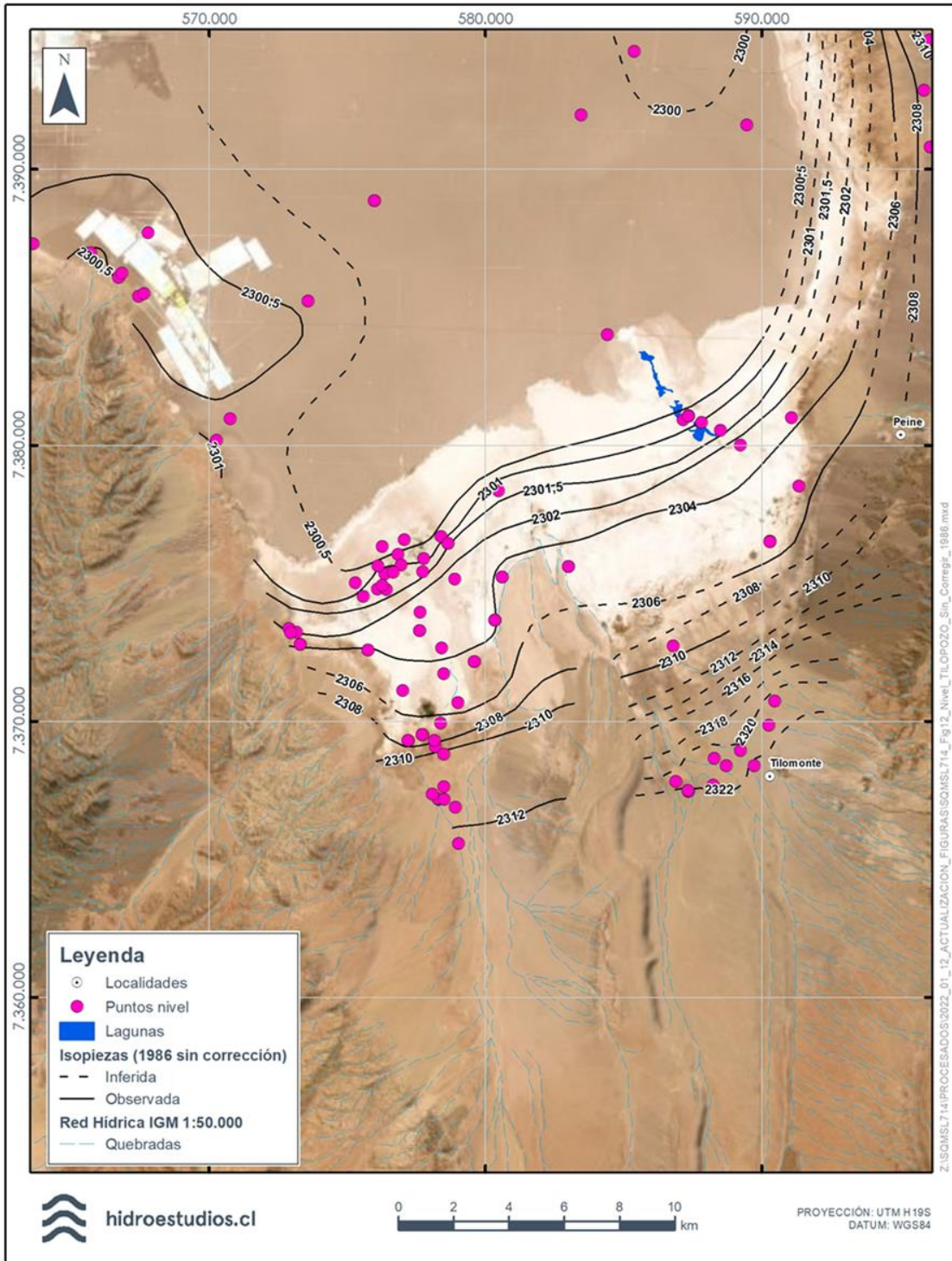
Los niveles considerados en los pozos relativamente estables corresponden al promedio de los dos primeros años calendario de registro en cada punto. Dado que la mayoría de los pozos en el sector de Tilopozo presenta niveles estables al inicio de su registro, se consideró que la extrapolación o retroproyección de niveles proporciona una estimación apropiada de las condiciones preoperacionales. Se considera que, con la información disponible, los potenciales errores en los niveles estimados no son relevantes para establecer los patrones del flujo a la escala del dominio.

Según esta piezometría, y al igual que en otros sectores del margen del salar, el flujo de agua dulce proveniente desde el Sur desarrollaría gradientes variables desde la planicie aluvial, que disminuyen en la zona marginal, para prácticamente extinguirse en el núcleo.

En la zona marginal, los niveles son aproximadamente 4 m a 6 m más someros que los del núcleo, ascenso que ocurre en aproximadamente 5 km, y que configura un gradiente en torno a 0,1%. En la planicie aluvial, los gradientes son variables y mayores en la proximidad a la zona de vegas. Por su parte, en el núcleo, las variaciones de nivel son menores, pero, en este caso, se configuran gradientes y direcciones más complejas, que tienen que ver con ingresos laterales en el sector ubicado en el contacto con el basamento, al sur de la zona de extracción. De hecho, una de las características más relevantes de esta piezometría corresponde a que los niveles en los pozos S-1 y S-3, ubicados al norte de Tilopozo, al sur de la zona de extracción de Albemarle, y aledaños al borde oeste, muestran niveles más elevados que los de CL-2 y S-4, ubicados al interior del núcleo.



Figura 4-151. Piezometría sin corrección por densidad interpretada para el año 1986.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

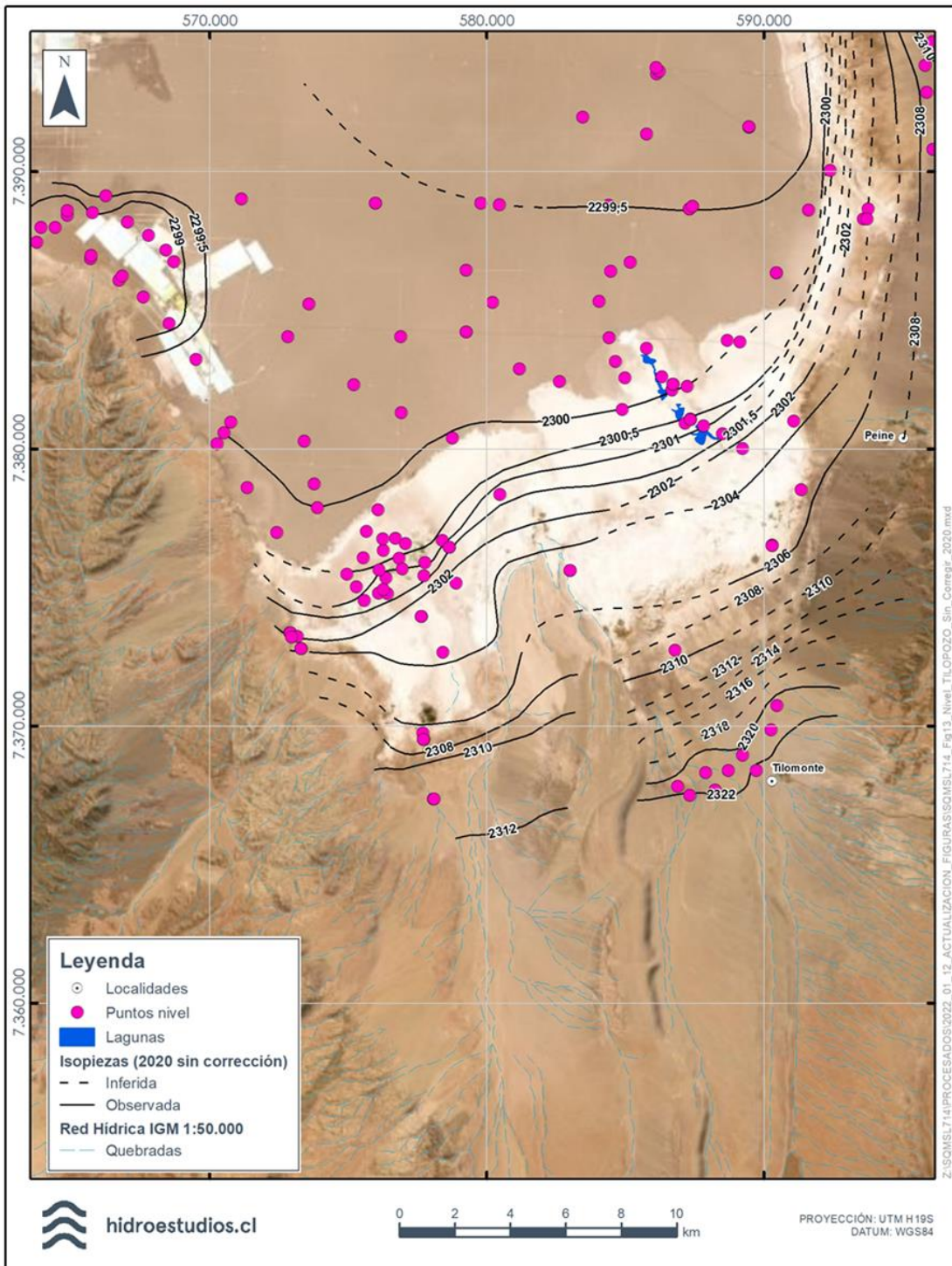


- Piezometría octubre a diciembre 2020

La Figura 4-152 muestra la piezometría interpretada para el último trimestre de 2020. En comparación con aquella interpretada para 1986, se aprecia que el cambio de niveles está acotado al núcleo y el sector de la salmuera. En el sector al norte de Tilopozo se aprecia un descenso de aproximadamente 1 m (desde aproximadamente 2.300,8 m.s.n.m. hasta 2299,8 m.s.n.m., en los pozos S-3 y CL-2). Los descensos en la zona marginal de Tilopozo, en el orden de centímetros, no son perceptibles en la escala de esta piezometría.

En términos de direcciones de flujo, la piezometría de 2020, antes de correcciones por densidad, muestra una dirección preferente hacia el norte en la salmuera dentro del núcleo, lo cual está mayormente determinado por los cambios en el núcleo asociado a las piezometrías de los sistemas de Peine y Quelana.

Figura 4-152. Piezometría sin corrección por densidad interpretada para diciembre de 2020.



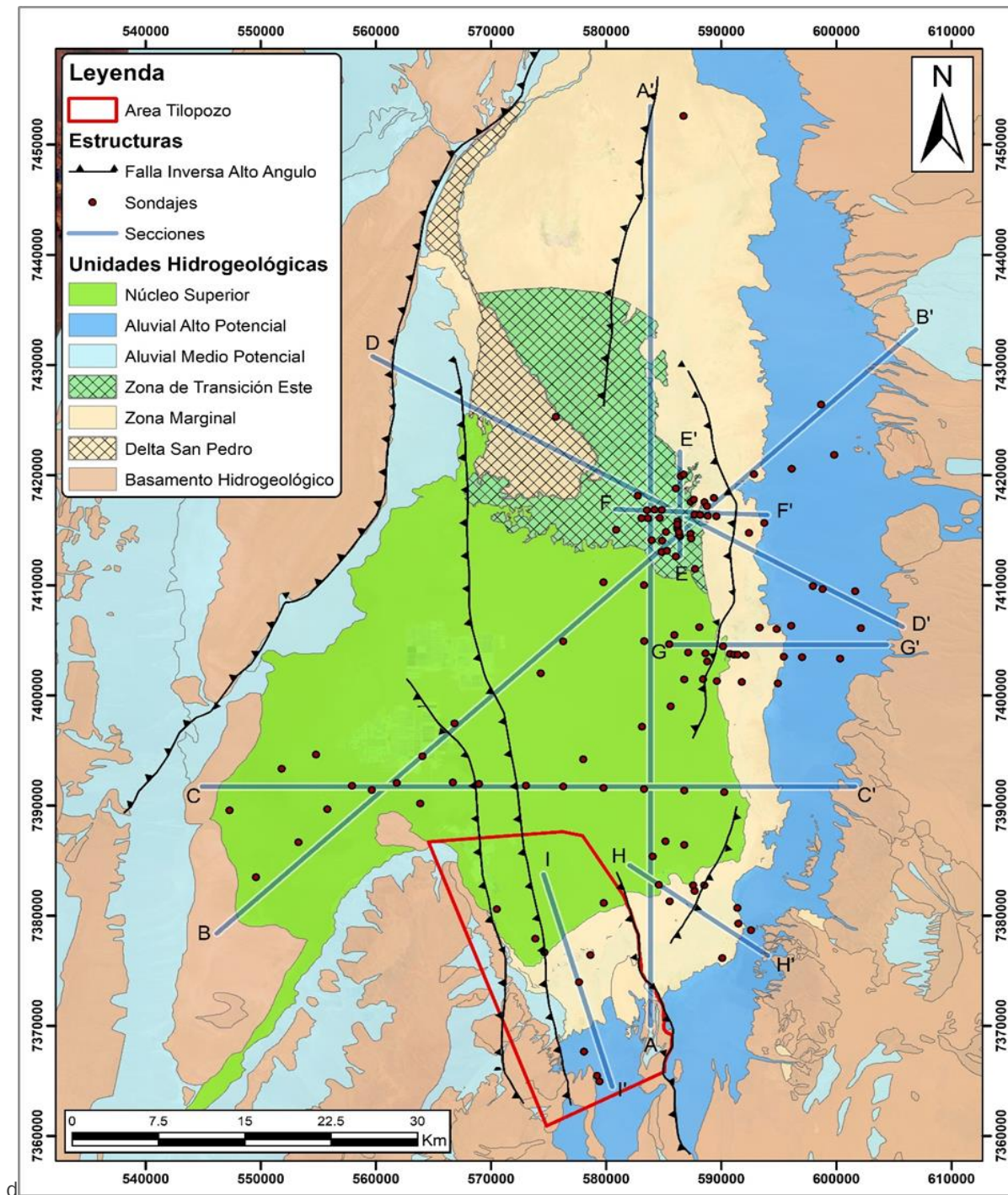
Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.7.5.1.4.5.2 Unidades Hidrogeológicas

En el área definida para el Sistema Tilopozo se reconocen seis de las ocho UHs descritas a escala regional, estando ausentes las UH Zona Transición Este y UH Delta San Pedro. Destacan por su extensión areal las UH Aluvial, UH Zona Marginal y UH Núcleo Superior, Núcleo Intermedio y Núcleo Profundo.

La descripción detallada de estas unidades se presenta en el acápite 4.3.7.5.1.3.5.4, mientras que la distribución en planta y en profundidad para este sector, se presentan en la Figura 4-153 y Figura 4-154.

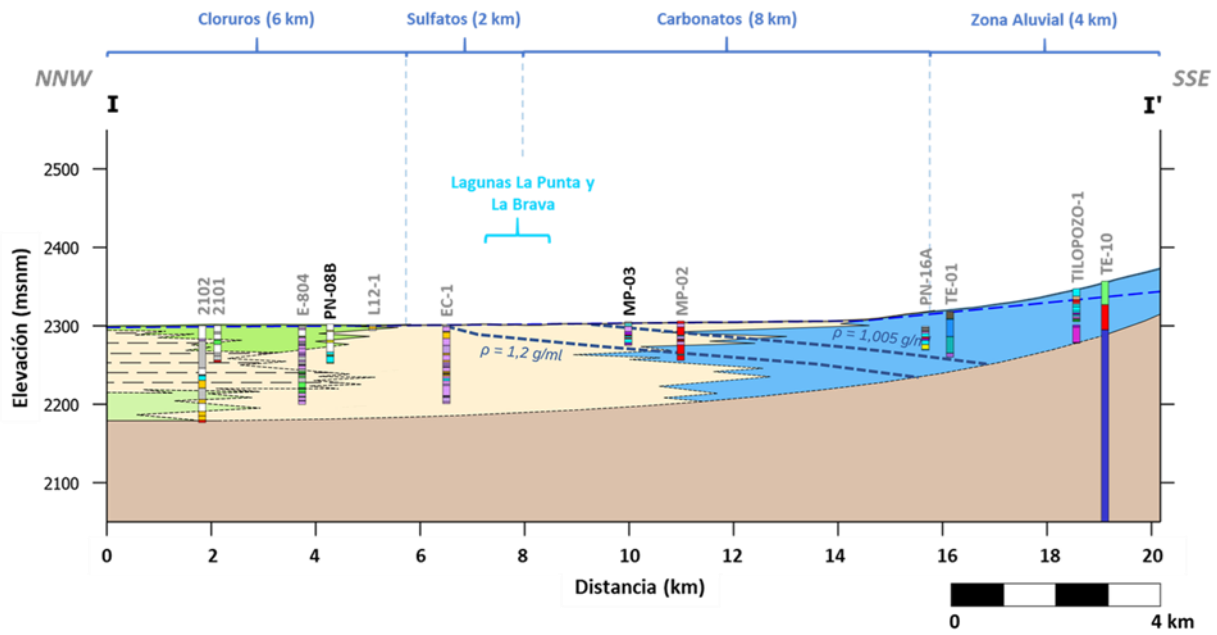
Figura 4-153. Mapa de unidades hidrogeológicas del Sistema local de Tilopozo.



Fuente: SQM, 2021.



Figura 4-154. Sección hidrogeológica I - I'. Traza de la sección en Figura 4-153.



**SIMBOLOGÍA**

- |                                 |  |                |  |
|---------------------------------|--|----------------|--|
| <b>Unidades hidrogeológicas</b> |  | <b>Otros</b>   |  |
| Núcleo Superior                 | Lentes de limos y/o arcillas   | Nivel freático |  |
| Núcleo Intermedio               | Falla observada/proyectada   | Cuña Salina    |  |
| Núcleo Profundo                 | Contacto observado/inferido  |                |  |
| Zona marginal                   | Techo observado/inferido de Secuencia heterogénea de sulfatos, tobas y tufitas |                |  |
| Delta San Pedro                 | Sistema lagunar  |                |  |
| Aluvial (alto potencial)        | Cruce con otra sección   |                |  |
| Aluvial (medio potencial)       | Pozo X<br>Pozo a < 1 km de traza   |                |  |
| Basamento                       | Pozo Y<br>Pozo a 1 - 6 km de traza   |                |  |

Fuente: SQM, 2021.



#### 4.3.7.5.1.4.5.3 Balance Hídrico

Tal como se indicó en el acápite 4.3.7.5.1.3.6, para estimar el balance hídrico de la cuenca del Salar de Atacama, esta se divide en zonas de balance, las cuales fueron agrupadas en función de su posición geográfica, en función de su altitud, y según el tipo de fluido analizado, el cual puede ser agua o salmuera. Para el caso particular del sistema local Tilopozo, una parte del área se ubica en la zona de salmuera y otra en la zona de agua. En el sistema de salmuera, las zonas de balance se clasifican en Zona Sureste Tilopozo – Salmuera y un sector del Núcleo, las cuales corresponden a zonas bajas. En el caso del sistema de agua, este incluye las zonas de balance Monturaqui y una fracción de Peine, ubicadas en la zona alta; además de la Zona Sureste Tilopozo - Agua y fracción de Chépica Norte, localizadas en la zona media. La ubicación de cada una de las zonas antes mencionadas se muestra en la Figura 4-107.

Con respecto a la temporalidad de los balances, se consideran los mismos 2 escenarios presentados en el balance regional: uno previo a la operación de SQM y otro considerando las actividades productivas del Titular.

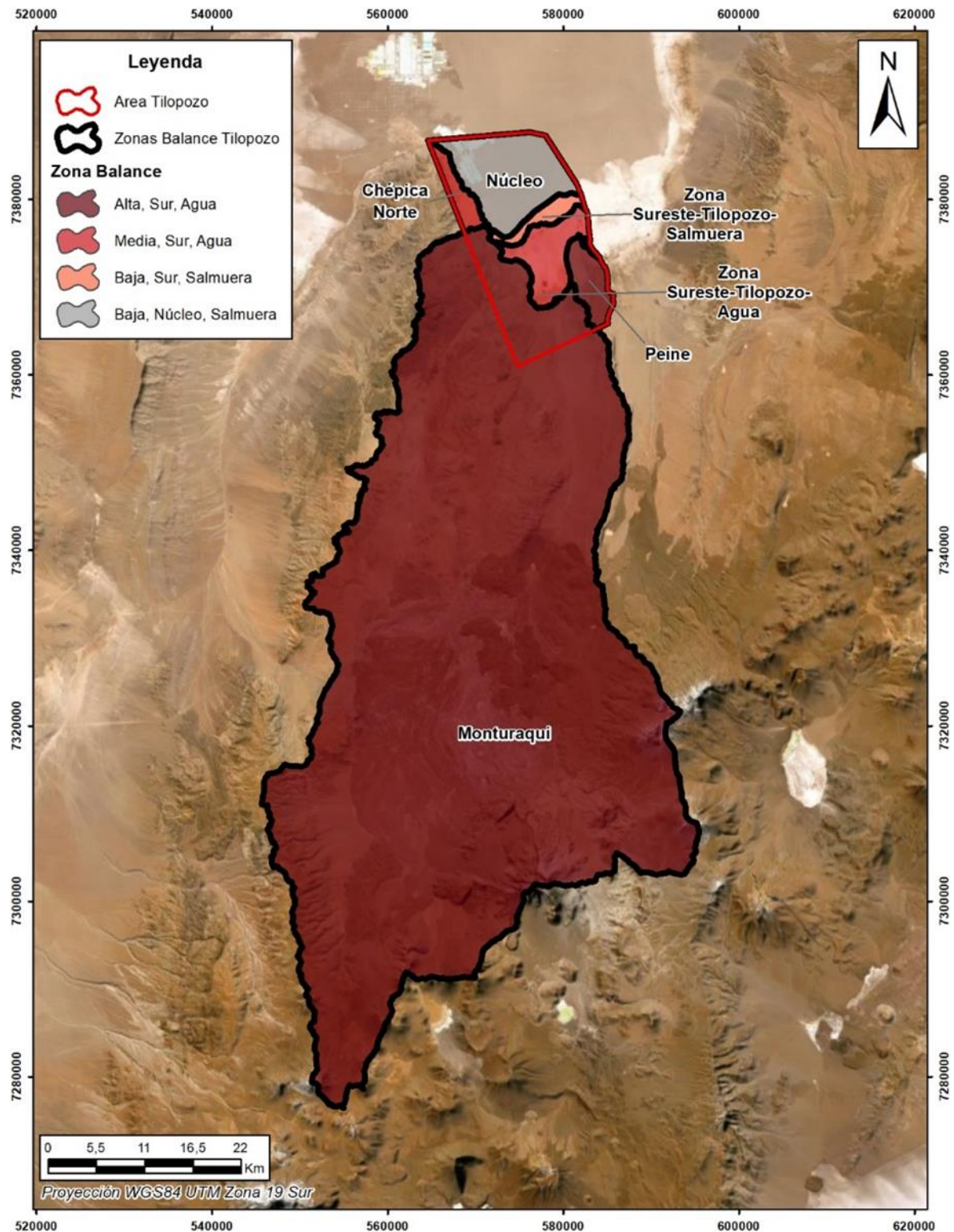
Es importante señalar que, el balance a escala de cuenca se desarrolla con zonas de mayor o igual tamaño al considerado en el cálculo del sistema local Tilopozo, por lo cual, los flujos estimados para la zona completa deben ser distribuidos en el caso que se cuente con solo una parte de la zona inicial. En la Tabla 4-49 se muestra el factor utilizado para distribuir los flujos de cada zona. Cabe señalar que, en el caso de Chépica Norte y Monturaqui, si bien solo una parte de estas zonas de balance se encuentran dentro del dominio del modelo conceptual, todo el flujo disponible para pasar a las zonas más bajas estaría inserto dentro de este dominio, por lo que, en este caso, no se aplica la distribución por superficie.

Tabla 4-61. Factor de ajuste para estimar caudales de entrada para dominio sistema local Tilopozo.

Sector	Área Zona Balance Total (km <sup>2</sup> )	Área Zona Balance Tilopozo (km <sup>2</sup> )	Factor de ajuste
Chépica Norte	114,0	114,0	1,00
Monturaqui	2.682,5	2.682,5	1,00
Núcleo	1.335,7	112,5	0,08
Peine	1.193,8	32,8	0,03
Zona Sureste-Tilopozo- Agua	56,2	56,2	1,00
Zona Sureste-Tilopozo- Salmuera	19,2	19,2	1,00

Fuente: SRK Consulting (2020).

Figura 4-155. Zonas de balance de agua y salmuera utilizadas sector Tilopozo.



Fuente: Basado en SRK Consulting (2020).

4.3.7.5.1.4.5.3.1 Balance de agua

El planteamiento del balance de agua en el sistema Tilopozo, es igual al presentado para el caso regional en el acápite 4.3.7.5.1.3.6.1, mientras que el detalle de la obtención de cada uno de los valores se presenta en el Anexo 5.6: Modelo Hidrogeológico Conceptual del Sistema Tilopozo.

Considerando lo anterior, en este capítulo se entregan los resultados de balance obtenidos para el sector Tilopozo, los cuales indican que para el periodo preoperacional (Tabla 4-56) se tiene que las mayores entradas se producen en la parte alta de la cuenca, superando a las salidas, debido a que las salidas por evapotranspiración se concentran en la zona de Monturaqui y Peine, las que cuentan con presencia de bofedales y vegas, respectivamente. Las descargas por evaporación desde el acuífero son prácticamente nulas, los niveles se encuentran a una profundidad mayor al umbral de extinción y los cuerpos de agua presentes son de menor superficie.

Según el balance estimado para la zona Sur Tilopozo, se obtiene un balance positivo que deja caudal disponible para recargar las zonas de salmuera, de 250 L/s. Las extracciones de agua en el periodo preoperacional corresponden a 5 L/s reportados por SCL en el período preoperacional en la zona media Sur Tilopozo (SRK Consulting, 2020).

Los resultados en términos agregados indican que en las zonas altas predomina la escorrentía como entrada al sistema, y que las salidas están dominadas por la evapotranspiración (sin considerar las descargas hacia la zona media); por otro lado, en la zona media se identifica la preeminencia de las entradas por recarga lateral desde zonas altas, mientras que las salidas no sólo están dominadas por la evapotranspiración, sino que además la evaporación desde la napa cumple un rol importante. La evaporación desde lámina libre juega un papel de menor importancia en el balance, puesto que es de un orden de magnitud inferior al de la evapotranspiración y la evaporación desde el núcleo (SRK Consulting, 2020).

Tabla 4-62: Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo preoperacional

SECTOR	ZONAS DE BALANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
		Recarga Directa	Recarga Lateral	Escorrentía	Recarga desde otras zonas	Evaporación desde el acuífero	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Disponible para descarga hacia otras zonas	Variación de almacenamiento
S	Alta-Sur Tilopozo-Agua	227	27	498		3	20	11	0	719	0
	Media-Sur Tilopozo-Agua	11	0	8	719	407	42	35	5	250	0
<b>TOTAL</b>		<b>239</b>	<b>27</b>	<b>506</b>		<b>409</b>	<b>62</b>	<b>46</b>	<b>5</b>	<b>969</b>	<b>0</b>

Fuente: SRK Consulting (2020).

El balance de agua dulce obtenido para el periodo operacional se muestra en la Tabla 4-63, donde se puede observar que la principal diferencia se produce en las descargas, correspondiente al aumento en las extracciones de agua producto de la operación de Albemarle, CMZ y MEL.

Cabe señalar que este aumento de las extracciones genera una disminución en el caudal disponible para ser traspasado a las zonas de salmuera, generando una reducción en las entradas a dicho sistema.

Tabla 4-63: Resumen de recargas y descargas por zona de balance de agua en el periodo operacional.

SECTOR	ZONAS DE BALANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
		Recarga Directa	Recarga Lateral	Escorrentía	Recarga desde otras zonas	Evaporación desde el acuífero	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Disponible para descarga hacia otras zonas	Variación de almacenamiento
S	Alta-Sur Tilopozo-Agua	227	27	498		3	20	11	0	719	0
	Media-Sur Tilopozo-Agua	11	0	8	719	407	42	35	51	204	0
<b>TOTAL</b>		<b>239</b>	<b>27</b>	<b>506</b>		<b>409</b>	<b>62</b>	<b>46</b>	<b>51</b>	<b>923</b>	<b>0</b>

Fuente: SRK Consulting (2020).

#### 4.3.7.6 Conclusiones

La Cuenca del Salar de Atacama se caracteriza por la presencia de siete rasgos morfoestructurales y geomorfológicos, de primer orden, de rumbo aproximadamente nor-noreste a norte-sur. De oeste a este, ellas corresponden a: Cordillera de Domeyko, Llano de la Paciencia, Cordillera de la Sal, Planicie Aluvial, Salar de Atacama (el cuál se compone del núcleo, zona de transición este y zona marginal), Cordón de Lila y Cordillera Occidental sur.

En particular, en la zona marginal del Salar de Atacama se han identificado cuatro sectores con valor ambiental y ecológico, donde se encuentran los objetos de protección ambiental. Dichos sectores corresponden, de norte a sur, a: Sistema Soncor, Sistema Aguas de Quelana, Sistema Peine y Sistema Tilopozo. Adicionalmente, como un quinto grupo de objetos de interés ambiental, se presenta, al este de los sistemas previamente mencionados, el sistema de vegetación del Borde Este.

La superficie de la Cuenca del Salar de Atacama y su entorno está caracterizada por el afloramiento de rocas ígneas y sedimentarias, de edad paleozoica a holocena; depósitos no consolidados y secuencias evaporíticas encontrándose, en general, delimitadas y cortadas por sistemas de fallas regionales (SQM, 2020b).

Para caracterizar hidrogeológicamente las unidades geológicas previamente mencionadas, se utilizaron un total de 650 puntos con información de parámetros hidráulicos, de los cuales en 643 se posee valores de permeabilidad y en 80 de almacenamiento.

La mayor variabilidad de valores de conductividad hidráulica, que además incluye los valores más altos obtenidos, se presenta en la unidad geológica de Cloruros Superiores ubicada en el núcleo del salar con rangos que oscilan entre un mínimo de  $1 \times 10^{-2}$  m/d hasta máximos de  $4 \times 10^4$  m/d.

Por otro lado, los menores valores de conductividad hidráulica se presentan en la unidad Delta San Pedro con un rango entre  $8 \times 10^{-5}$  y  $4 \times 10^{-4}$  m/día.

Uno de los elementos clave para entender el funcionamiento hidrogeológico del Salar de Atacama es la presencia de una cuña o interfaz salina en todos los márgenes del Salar. Esta interfaz se forma por el contraste de densidad del agua dulce, que fluye hacia el núcleo del Salar, con la salmuera que se encuentra almacenada en las unidades hidrogeológicas del núcleo, cuando ambos fluidos entran en contacto, el agua dulce, al ser menos densa ( $< 1,005 \text{ g/cm}^3$ ), tiende a posicionarse por sobre la salmuera próxima al equilibrio con halita, que posee una densidad mucho mayor ( $> 1,2 \text{ g/cm}^3$ ). La zona de contacto o de mezcla entre ambos fluidos es la que se denomina cuña o interfaz salina.

La clasificación de fluidos en la cuenca del SdA se divide en cuatro tipos: agua dulce, zona transición, salmuera subsaturada y salmuera en equilibrio. Se infiere entonces que la interfaz salina corresponde a la unión de las dos zonas “intermedias”: zona de transición y salmuera subsaturada.

Para el reconocimiento de la interfaz salina en superficie, se cuenta con 148 puntos con información de densidad, mientras que para el reconocimiento en profundidad se cuenta con: 19 perfiles TEM y 25 perfilajes de CE en pozos.

Al respecto de la estabilidad de la interfaz salina, como resultado del análisis de los datos de SQM, se ha inferido que la posición de la interfaz durante el periodo monitoreado no ha experimentado variaciones significativas (SQM, 2021).

En cuanto a la extracción de salmuera en el núcleo del salar, actualmente cuentan con autorización: SQM Salar S.A. y Albemarle.

Desde el inicio de su operación el caudal bruto medio anual extraído por SQM es de 1.094 L/s, el caudal medio anual inyectado por SQM desde 1996 es de 241 L/s, lo que genera una extracción neta de 853 L/s.

Por su parte, el caudal medio anual extraído por ALB, en el periodo comprendido entre 1983 al año 2020 es de 121 L/s, con un aumento constante de las extracciones, siendo el mayor aumento el observado posterior a 2016, relacionado a la aprobación de la RCA 21/2016.

Sobre los caudales de extracción agua subterránea, el caudal medio anual de agua extraído por SQM es de 140 L/s, mientras que el de Albemarle corresponde a 6,6 L/s.

Para realizar seguimiento de niveles piezométricos a lo largo del tiempo en el sector estudiado a escala regional se cuenta con un total de 509 puntos con información. A partir de estos puntos, se observa que los pozos ubicados en el sector del núcleo del Salar de Atacama y habilitados en salmuera poseen un comportamiento que se caracterizan por presentar una tendencia a la baja durante todo el período de registro, variando



sólo en su pendiente o tasa de descenso. También se caracterizan por presentar un comportamiento sensible a los eventos de precipitación directa sobre el núcleo del salar, respondiendo de forma inmediata a eventos significativos y recuperando la tendencia precedente al corto tiempo de haber ocurrido dichos eventos.

En cuanto a la evolución de los niveles en el sistema agua, existen diversos comportamientos dependiendo de la ubicación de los puntos de monitoreo analizados. En el caso de los pozos ubicados en la zona marginal del Salar de Atacama, tienen la particularidad de reflejar principalmente la influencia estacional característica de la evaporación, debido a que los niveles en este sector se encuentran muy próximos a la superficie. De esta manera, es posible visualizar una ciclicidad producto de la estacionalidad de la evaporación durante el verano e invierno, a consecuencia de lo cual los niveles disminuyen y aumentan respectivamente.

Por otro lado, en los pozos más alejados del núcleo, ubicados en la planicie aluvial, se distinguen por mostrar una tendencia al descenso desde el comienzo de su registro, incluso antes que comenzara la operación de los pozos de agua. La tasa de descenso en este período se estima entre 1 y 2 cm/año, y era común a todos los pozos. Al comenzar la extracción de agua, la tasa aumentó hasta 10 cm/año con los 5 pozos en operación.

En general, los pozos ubicados en la planicie aluvial no presentan afecciones a estímulos inmediatos relacionados por eventos atmosféricos (precipitaciones o evaporación), debido especialmente a la mayor profundidad de los niveles en este sector.

La piezometría corregida a salmuera, muestra, de manera general, que existe un mínimo piezométrico en toda la zona marginal, especialmente marcado en la situación preoperacional de 1986. En dicho año se observa que, dentro del núcleo, los niveles piezométricos más altos se encuentran localizados aproximadamente en el límite del núcleo con el Cordón de Lila, especialmente en su costado oriental. El agua dulce, en tanto, fluye desde el norte, este y sureste en dirección hacia la zona marginal.

Por otro lado, para la piezometría del año 2020, se observa que la zona marginal sigue siendo la zona donde confluyen los flujos desde el bloque este, aunque no de forma tan marcada como en la etapa preoperacional. Para este año, además, se observa un mínimo piezométrico en el sector SW del bloque oeste del núcleo, debido al cono de bombeo generado por las operaciones de SQM.

Haciendo una comparación entre las piezometrías de 1986 y 2020, es claro que las extracciones tanto de salmuera como de agua dulce han disminuido los niveles en el núcleo y en el acuífero aluvial. Sin embargo, dentro del núcleo los descensos en el bloque este alcanza aproximadamente 1m, mientras que al oeste de Falla Cabeza de Caballo se observan descensos de 8m. En el acuífero aluvial, en tanto, se aprecian claramente los conos de descenso de los pozos de agua, siendo los descensos en la zona marginal poco significativos.

En función de la información presentada previamente, se definieron 8 unidades hidrogeológicas (UH) regionales (UH Núcleo Superior, UH Núcleo Intermedio, UH Núcleo Profundo, UH Zona Marginal, UH Zona Transición, UH Aluvial, UH Delta San Pedro y Basamento hidrogeológico) de las cuales una de ellas se ha subdividido en dos (Unidad Hidrogeológica Aluvial Superior de Alto y de Medio potencial).

Para la estimación del balance hídrico, la cuenca del Salar de Atacama se dividió en zonas de balance, las cuales fueron agrupadas en función de los siguientes criterios: (1) posición geográfica, entre zonas norte,

sur, este y oeste; (2) altitud, entre zonas altas, medias y bajas; y (3) tipo de fluido analizado, el cual puede ser agua o salmuera.

Para realizar el balance de agua dulce se consideraron las zonas altas y medias de la cuenca del Salar de Atacama. Los resultados en términos agregados indican que en las zonas altas predomina la escorrentía como entrada al sistema, y que las salidas están dominadas por la evapotranspiración (sin considerar las descargas hacia la zona media); por otro lado, en la zona media se identifica la preeminencia de las entradas por recarga lateral desde zonas altas, mientras que las salidas no sólo están dominadas por la evapotranspiración, sino que además la evaporación desde la napa cumple un rol importante. La evaporación desde lámina libre juega un papel de menor importancia en el balance, puesto que es de un orden de magnitud inferior al de la evapotranspiración y la evaporación desde el núcleo (SRK Consulting 2020).

La diferencia en los resultados obtenidos para el balance de agua dulce de los periodos pre-operacional y operacional radica en las descargas, correspondiente al aumento en las extracciones de agua producto de la operación de los distintos actores que se ubican en la cuenca. Estas diferencias se producen en la zona este, asociado al bombeo de SQM y en la zona sur, debido al bombeo de Albemarle, CMZ y MEL.

Cabe señalar que este aumento de las extracciones genera una disminución en el caudal disponible para ser traspasado a las zonas de salmuera, generando una reducción en las entradas a dicho sistema.

Por otro lado, el balance de salmuera incluye el núcleo más la parte de la zona marginal que se encuentra hacia el interior de la interfaz (llamada Zona Marginal – salmuera). En este sistema predominan las entradas por recarga directa y los aportes de la zona media, los que están en el orden de las salidas por concepto de evaporación desde el suelo, esta última promovida por las condiciones de la napa en la etapa preoperacional, menos influenciada por la explotación de la salmuera (SRK Consulting, 2020).

El balance de salmuera para el periodo preoperacional (previo al año 1994), indicó una variación de almacenamiento negativa (-105 L/s), la cual aumento a 660 L/s, producto del aumento de las extracciones en el núcleo, que pasan de 46 L/s en el periodo preoperacional a 1249 L/s en el periodo operacional.

En cuanto a la caracterización de los sistemas locales, en todos ellos esta se muestra concordante con lo planteado regionalmente. El detalle de los puntos con información para cada sistema se presenta en la Tabla 4-64.

Tabla 4-64. Puntos con información por sistema local

Sistema Local	Parámetros Hidráulicos	Reconocimiento Interfaz Salina		Niveles de agua
		Puntos densidad superficie	Perfilajes CE pozos	
Soncor	30	51	3	131
Aguas de Quelana	35	46	3	163
Peine	8	26	10	62
Tilopozo	78	25	6	128

Fuente: SQM, 2021.

Adicionalmente los sistemas locales cuentan con cuerpos de agua superficiales que corresponden a los objetos de protección ambiental.

En el caso de Soncor, el agua superficial es el resultado de la confluencia de numerosas manifestaciones de agua subterránea que originalmente precipitan en las zonas altas de la cuenca (al norte y noreste de ésta), se infiltran, y afloran nuevamente al norte y noreste del Salar de Atacama. Las surgencias de estas zonas dan origen a canales que representa la alimentación principal del Sistema Soncor.

El sistema lacustre de Soncor se compone por las lagunas Puilar, Chaxa y Barros Negros, las cuales tienen un área relativamente estable. Puilar no muestra conexión directa con el canal de Burro Muerto y su única alimentación proviene de la descarga del acuífero aluvial del este. El canal de Burro Muerto, por su parte, termina en Barros Negros, siendo ésta la laguna terminal del sistema.

A partir de mediciones periódicas realizadas a la superficie lacustre de las lagunas Barros Negros, Chaxa y Puilar, se obtuvo que, la laguna Barros Negros es la de mayor superficie, seguida por las lagunas Chaxa y Puilar, y que todas mantienen un comportamiento estable de sus niveles.

Por otro lado, el sistema de Aguas de Quelana lo componen un conjunto de lagunas de poca profundidad, ubicadas sobre una zona de topografía plana, al pie de los depósitos aluviales que conectan con las Quebradas Camar y El Toro, su morfología es alargada y se alinea en paralelo a la interfaz salina. El desarrollo de estos cuerpos de agua tiene directa relación con el afloramiento del agua salobre subterránea proveniente desde el este, al encontrarse ésta con la salmuera ubicada al oeste, principalmente en el núcleo.

A partir del análisis de imágenes multiespectrales de alta resolución (QuickBird, Geoeye-1 y WorldView-2) para el período 2005-2020, se obtuvo, considerando el error por el mapeo de las imágenes, las superficies fluctúan entre 8,7 y 35,4 ha.

En funcionamiento del sistema Peine, es similar al indicado en Soncor, con afloramientos de agua subterránea que generan canales que a su vez alimentan las lagunas. Los cuerpos lacustres acá presentes, se denominan laguna Salada, laguna Saladita y Desborde Interna. Éstos se encuentran al sureste del núcleo del Salar de Atacama, alineados en una dirección aproximada SE-NW. Las lagunas Salada y Saladita se consideran lagunas principales, ya que tienen una extensión relativamente estable. Mientras que, Desborde Interna presenta una extensión variable y errática al formarse producto de los desbordes desde laguna Saladita en temporadas de abundancia hídrica.

En el Sistema de Tilopozo, se presentan dos cuerpos lagunares: La Punta y La Brava. La Punta se caracteriza por presentar numerosos islotes en todo el cuerpo lagunar, teniendo, por ende, una morfología mucho más irregular que La Brava.

SQM no realiza monitoreo de las superficies lacustres en el sistema Tilopozo, sin embargo, a partir de mediciones realizados por Albemarle, y en el estudio realizado por SGA (2015), se observa que los cuerpos de aguas varían mayormente en invierno respecto lo observado en el verano. Por su parte, las áreas estimadas en verano se han mantenido constantes. Sin embargo, al oeste de la laguna La Brava se evidencian cuerpos superficiales permanentes en invierno y no en verano. Los desbordamientos eventuales se concentran al norte del sistema, donde en verano se visualizan espejos de agua difusos mientras que en invierno una amplia zona de inundación.

Finalmente, es importante mencionar, que los cuerpos lagunares de los distintos sistemas locales se han mantenido estables, con las respectivas oscilaciones asociables a eventos meteorológicos, dentro del periodo estudiado (Soncor: entre 2007 y 2020; Aguas de Quelana: entre 2005 y 2020; Peine: entre 2007 y 2020; Tilopozo: entre 2015 y 2020).

#### 4.3.7.7 Referencias

Acevedo, E., M. Ortiz, Franck, N., and P. Sanguinetti. Relaciones hídras de *Prosopis tamarugo* Phil, Uso de isótopos estables, Santiago: Universidad de Chile. 2007.

Albemarle. «Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual N° 1. Período septiembre – diciembre 2016.» 2017.

Albemarle. «Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual N° 2. Período enero – diciembre 2017.» 2018.

Albemarle. «Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual N° 3. Período Enero – Diciembre 2018.» 2019.

Albemarle. «Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual N° 5. Período Enero – Diciembre 2020.» 2021.

Amphos 21. "Actualización del modelo conceptual del sector Soncor, Informe para SQM." Santiago, 2009a.

Amphos 21. "Análisis sistemático de la información hidrológica del PSA." Santiago, 2009c.

Amphos 21. «Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados para el Salar de Atacama. Preparado para el Comité de Minería no Metálica de CORFO.» 2018a.

Amphos 21. «Hidrología del sector oriental del Salar de Atacama, Informe para SQM.» Santiago, 2009b.

Amphos 21. Modelo Hidrogeológico Consolidado Cuenca del Salar de Atacama. Santiago: Para Comité Minería no Metálica CORFO. Estudio de Modelos Hidrogeológicos Conceptuales Integrados para los Salares de Atacama, Maricunga y Pedernales, 2018b.

AquaTerra Ingenieros Ltda.; Chile. Dirección General de Aguas; Arrau Ingeniería Spa. «Diagnóstico de Disponibilidad Hídrica en Cuencas Alto – Andinas de la Región de Atacama.» 2013.

Aravena, R., O. Suzuki, H. Pena, A. Pollastri, H. Fuenzalida, and A. Grilli. "Isotopic composition and origin of the precipitation on Northern Chile." *Applied Geochemistry*, 14(4), 1999: 411-422.

Arriagada, C. «Estudio geológico-estructural de la cuenca del Salar de Atacama.» Informe Inédito para SQM Salar S.A., 2009.

Arriagada, C., P. R. Cobbold, y P. Roperch. «Salar de Atacama basin: A record of compressional tectonics in the central Andes since the mid-Cretaceous.» *Tectonics* 25, n° 1 (2006).

Arriagada, Cesar. «Rotaciones tectónicas y deformación del antearco en los Andes Centrales durante el Cenozoico. Tesis. 317 p.» 2003.

Basso, y Mpodozis. «Carta Cerro Químal, Región de Antofagasta. Santiago.» 2012.



- Becerra, J., S. Henríquez, y C. Arriagada. «Geología del área Salar de Atacama, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 166, 1 mapa escala 1:100.000.» 2014.
- Bevacqua, P. «Descripción de las unidades geológicas de superficie del Salar de Atacama.» Santiago: Minsal Ltda, 1988.
- Bevacqua, P. «Descripción geológica y evolución del delta del Río San Pedro, Salar de Atacama, Chile.» *Congreso Geológico Chileno, Actas I.*, 1994: 235-239.
- Bevacqua, P. «Geología del salar de Atacama y estratigrafía, de su núcleo y delta, II Región de Antofagasta, Chile.» Tesis de la Universidad Católica del Norte, 1993.
- Bevacqua, P. «Geomorfología del salar de Atacama y estratigrafía de su núcleo y delta, Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Antofagasta, 284 p.» 1992.
- Boschetti, T., G. Cortecchi, M. Barbieri, y M. Mussi. «New and past geochemical data on fresh to brine waters of the Salar de Atacama and Andean Altiplano, northern Chile. *Geofluids* 7, 33-50.» 2007.
- Boutt, David, Lilly Corenthal, Brendan Moran, LeeAnn Munk, and Scott Hynek. "Imbalance in the modern hydrologic budget of topographic catchments along the western slope of the Andes (21–25° S): implications for groundwater recharge assessment." *Hydrogeology Journal*, 2021.
- Breitkreuz, C. «The Late Permian Peine and Cas Formation at the eastern margin of the Salar de Atacama, Northern Chile: stratigraphy, volcanic facies, and tectonics. *Revista Geológica de Chile* 22 (1), 3-23.» 1995.
- Brüggen, J. «Fundamentos de la Geología de Chile. Instituto Geográfico Militar, p. 1-374, Santiago. .» 1959.
- Brüggen, J. «Geología de la Puna de San Pedro de Atacama y sus formaciones de areniscas y arcillas rojas. Congreso Panamericano de Ingeniería de Minas y Geología, Anales, v.2, p 342-367, Santiago.» 1943.
- Cembrano, J., A. Lavenu, y G. Yañez. «The geology of Chile.» *Neotectonics*, 2007: 231-261.
- CHP Consultores. «Adenda III Anexo 5. Estudio hidrogeológico del Salar de Atacama. Modelo Conceptual. Proyecto SLM NX Uno de Peine Rev O. EIA Planta de Producción de Sales de Potasio. Realizado para Minera SLM NX Uno de Peine.» 2017.
- COMINOR S.A. «Estudio Geofísico Transiente Electromagnético (TEM) Sector Borde Oeste Salar de Atacama.» 2007.
- Cortés. «Carta Sierra Mariposa, Región de Antofagasta.» 2012.
- Crist, Eric P., R. Laurin, and Richard C. Cicone. "Vegetation and soils information contained in transformed Thematic Mapper data." *Proceedings of IGARSS'86 symposium*. Paris: European Space Agency Publications Division, 1986. 1465-1470.
- Custodio, E., y M. Llamas. «Hidrología Subterránea, segunda edición.» 2001.
- Davie, Tim. *Fundamentals of hydrology*. Routledge, 2008.
- De Silva, S. L. «The Altiplano-Puna volcanic complex of the Central Andes. *Geology* 17, 1102-1106.» 1989.

DGA. "Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para construir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al salar de Atacama.S.I.T. 210, pp 277). Ministerio de Obras Públicas. realizado por GCF." 2010.

DGA. "Análisis de la oferta hídrica del salar de Atacama. Santiago, Chile. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Estudios y Planificación." 2013.

DGA. "Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Informe Final S.I.T N° 357. Ministerio de Obras Públicas. Realizado por ICASS." 2014a.

DGA. "Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos." 1987.

DGA. «Estimaciones de demanda de agua y proyecciones futuras. Zona I norte. Regiones I a IV. SIT N° 122.» 2007.

DGA. «Evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos en los sectores acuíferos del Salar de Atacama. Informe Técnico DARH N° 234.» 2014b.

DGA. «Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Atacama: informe técnico. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.» 2012.

DGA. «Informe hidrogeológico: evaluación de la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, cuenca Salar de Atacama, II región. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.» 1986.

DGA. «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. Informe Final Parte I: Hidrografía Regional del Altiplano de Chile. (S.I.T N° 157).» Ministerio de Obras Públicas. Realizado por DICTUC, 2008.

DGA. *SDT N° 392: Sistematización de información de los recursos hídricos del Salar de Atacama para un futuro Plan de Gestión.* Santiago: División de Estudios y Planificación de la Dirección General de Aguas, 2016.

DGA, y CADE-IDEPE. «Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad.» 2004.

DGA; Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. *Levantamiento Hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la Zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III : etapa 2.* Pontificia Universidad Católica de Chile, 2009.

DICTUC. «Estimación de Aportes Superficiales y Subterráneas del Salar de Atacama, Mediante el Modelo Estacional SEAMOD.» Informe para SQM, 2000.

DICTUC. «PSAH. Proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. Informe N° 5.» Santiago de Chile, 2009.

Dingman, R.J. «Cuadrángulo San Pedro de Atacama: Provincia de Antofagasta, escala 1:50.000. IIG, Carta Geológica de Chile (n.14): 29 p., ils., 1 mapa, Santiago. Coordenadas: 22° 45' - 23° 00' / 68° 15' - 68° 00'. Escala: 1:50.000.» 1965.

Espíldora, Basilio, Ernesto Brown, Guillermo Cabrera, and Pablo Isensee. *Elementos de Hidrología*. Santiago: Centro de Recursos Hidráulicos, departamento de Obras Civiles, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 1975.

Flint, S., P. Turner, E. Jolley, y A. Hartley. «Extensional tectonics in convergent margin basins: An example from the Salar de Atacama, Chilean Andes.» *Geological Society of America. Bulletin* 105, 1993: 603-617.

GAC. «Estudio de Impacto Ambiental Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama Región de Antofagasta, Chile. para SCL Sociedad Chilena del Litio.» Santiago, Chile, 2009.

Garces, I., P. L. López, L. F. Auqué, G. Chong, V. Vallés, y M. J. Gimeno. «CARACTERÍSTICAS GEOQUÍMICAS GENERALES DEL SISTEMA SALINO DEL SALAR DE LLAMARA (CHILE).» *Estudios Geológicos* 52, 1996: 23-35.

Gardeweg, M, y C F Ramírez. «La Pacana caldera and The Atana ignimbrite: a major ash-flow and resurgent caldera complex in the Andes of Northern Chile. Bulletin of Volcanology Vol.49 N° 3: pp. 547-566.» 1987.

Geodatos. «Estudio geofísico de Resistividad Métodos TEM y NanoTEM. Borde Este Salar de Atacama, Sectores de Quelana y Soncor, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta, Chile. SQM Salar S.A.» 2017.

Geodatos. «Estudio geofísico de Transiente Electromagnético TEM y nanoTEM. Proyecto: Soncor-Toconao, Salar de Atacama.» SLM-NX-1 de Peine, 2011.

Geodatos. «Estudio geofísico mediante transiente electromagnético (TEM) y nano-TEM. Proyecto borde este Salar de Atacama.» 2000.

Golder Associates. «Modelo Hidrogeológico Conceptual y Numérico para el Acuífero de Monturaqui-Negrillar-Tilopozo. Informe preparado para Minera Escondida Ltda. Número de Informe: 179 215 3075-IT001\_Rev.3. 940 p.» 2017a.

González, G., J. Cembrano, F. Aron, E. Veloso, y J. Shyu. «Coeval compressional deformation and volcanism in the central Andes, case studies from northern Chile (23\_s-24\_s) [Publicación periódica].» *Tectonics. Vol* 28, 2009.

Google. «Google Earth Web.» 2014.

Google. «Google Earth Web.» 2015.

Google. «Google Earth Web.» 2016.

Google. «Google Earth Web.» 2020.

HARZA. «Desarrollo de los recursos de agua en el norte grande, Chile. Con el Proyecto CHI- 69/535 CORFO-D.G.A-CCC-P.N.U.D. para las Naciones Unidas.» 1978.

Henríquez, S, J Becerra, y C Arriagada. «Geología del área San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta.» 2014.

Hidroterra. *Evaluación de la Evaporación de Salares*. Salar de Atacama, 1988.

Houston, J. «Variability of precipitation in the Atacama Desert: Its causes and hydrological impact. Int. J. Climatol. 26, 2181-2198. <https://doi.org/10.1002/joc.1359>.» 2006.

- Huerta, G. «Use of Isotopes and Chemical Tools for Understanding the Processes that control the Chemical Composition of Brines in the Salar de Atacama, Northern Chile. University of Waterloo.» Tesis for degree of Master of Science in Earth and Environmental Sciences, Waterloo, 2012.
- Hydrotechnica. «Evaluation of brine reserves in the Salar de Atacama.» 1987.
- Hydrotechnica. «Evaluation of Brine Reserves in the Salar de Atacama.» 1987.
- IDAEA-CSIC. «Cuarta Actualización del Modelo de Flujo del Salar de Atacama.» Santiago, 2017.
- Ide, F. "Cubicación del yacimiento salar de Atacama. Memoria de título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Minas, 144 p. Santiago." 1978.
- Ide, F., y IA. Kunasz . «Ide F, Kunasz IA (1989) Origin of lithium in Salar de Atacama, northern Chile. In: Ericksen GE, Cañas Pinochet MT, Reinemund JA (eds) Geology of the Andes and its relation to hydrocarbon and mineral resources, vol 11, Earth Sci Series., pp 165–172.» 1989.
- International Geophysical Technology S.L. (IGT). «Ensayos geofísicos en el Salar de Atacama para diferenciar las zonas con contenido de salmuera.» 2012.
- Jian, Ji, Wunian Yang, Hong Jiang, Xinnan Wan, Yuxia Li, and Li Peng. "A model for retrieving soil moisture saturation with Landsat remotely sensed data." *International Journal of Remote Sensing*, 2012: 4553 - 4566.
- Johnson, Juan Eduardo. *Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano chileno*. Pontificia Universidad Católica de Chile, 2009.
- Jordan, T., C. Mpodozis, N. Muñoz, N. Blanco, y P. Pananont. «Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of the Salar de Atacama Basin, northern Chile.» *Journal of South American Earth Sciences*, 23(2), 2007: 122-146.
- Jordan, T.E., N. Muñoz, M. Hein, T. Lowenstein, L. Godfrey, and J. Yu. "Active faulting and folding without topographic expression in an evaporite basin, Chile." *Geological Society of America. Bulletin* 114, 2002: 1406-1421.
- Kuhn, D. «Fold and thrust belt structures and strike-slip faulting at the SE margin of the Salar de Atacama basin, Chilean Andes.» *Tectonics*, 21(4), 2002.
- Le Roux, J. P. «Pleistocene-Holocene paleoclimatic and sedimentological changes in the Salar de Atacama. Unedited Research Report for SQM. Updated 2018.» 2018.
- Le Roux, J. P. «Reconocimiento superficial y mapeo geológico del sector de Aguas de Quelana, Salar de Atacama. Preparado para SQM.» 2019.
- Lin, Y., y otros. «Structural characteristics of an active fold-and-thrust system in the southeastern Atacama Basin, northern Chile. Tectonophysics. Volume 685, p. 44-59.» 2016.
- López Steinmetz, R.L. «Lithium- and boron-bearing brines in the Central Andes: Exploring hydrofacies on the eastern Puna plateau between 23 and 23300S. Miner. Depos. 2017, 52, 35–50.» 2017.

- Lowenstein, T.K., y F. Risacher. «Closed Basin Brine Evolution and the Influence of Ca–Cl Inflow Waters: Death Valley and Bristol Dry Lake California, Qaidam Basin, China, and Salar de Atacama, Chile. *Aquat Geochem* 15, 71–94. <https://doi.org/10.1007/s10498-008-9046-z>.» 2009.
- Marazuela, M.A., E. Vásquez-Suñé, C. Ayora, A. García-Gil, y T. Palma. «Hydrodynamics of salt flat basins: The Salar de Atacama example. *Science of the Total Environment*. 651, 668-683.» 2019.
- Marazuela, M.A., E.I. Vásquez-Suñé, E. Custodio, T. Palma, A. García-Gil, and C. Ayora. "3D mapping, hydrodynamics and modelling of the freshwater-brine mixing zone in salt flats similar to the Salar de Atacama (Chile). *J. Hydrol.* 561, 223-235." 2018.
- Mardones, L. "Características geológicas e hidrogeológicas del Salar de Atacama." In *El litio, un nuevo recurso para Chile*, by G. Lagos, 181-216. 1986.
- Mardones, L. «Estudio de evaporación en el salar de Atacama. Tesis Doctorado.» 1997.
- Marinovic, N., y A. Lahsen. *Carta geológica de Chile. Escala 1:250.000. Hoja de Calama. Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)*. SERNAGEOMIN, 1984.
- MEL. «Plan de Alerta Temprana para Acuífero Monturaqui-Negrillar- Tilopozo. Datos Monitoreo, Informe N° 18: Revisión hasta fines de 2018.» 2019.
- MINSAL. *Hydrogeology. Appendix II: Water Levels*. Toconao: MINSAL. Reporte Interno., 1989.
- MINSAL. *Hydrology. Appendix V: Evaporation Study*. Toconao: MINSAL, 1988a.
- MINSAL. «Summary Report Clay Area, Salar de Atacama.» 1988b.
- Moraga, A., G. Chong, y H. Henríquez. *Estudio geológico del Salar de Atacama, provincia Antofagasta*. Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG), 1974.
- Morel-Seytoux, H.J., y A. Mermoud. *Modélisation et observation du flux hydrique vers la surface du sol depuis une nappe peu profonde*. 1989.
- Morgan J. Salisbury, Brian R. Jicha, Shanaka L. de Silva, Brad S. Singer, Néstor C. Jiménez, Michael H. Ort. «<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar chronostratigraphy of Altiplano-Puna volcanic complex.» *Geological Society of America Bulletin*, 2010.
- Mpodozis, C, F Hervé, J Davidson, y S Rivano. «Los granitoides de Cerros de Lila, Manifestaciones de un episodio intrusivo y termal del Paleozoico inferior en los Andes del Norte de Chile. *Revista Geológica de Chile*, vol. 18, pp. 3-14.» 1983.
- Mpodozis, C, N Blanco, T Jordan, y M Gardeweg. «Estratigrafía y deformación del Cenozoico tardío en la región norte de la cuenca del Salar de Atacama: La zona de Vilama-Pampa Vizcachitas. Puerto Varas.» 2000.
- Mpodozis, C., M. Basso, P. Roperch, P. Cobbold, y M. Reich. «Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar de Atacama Basin, Antofagasta, Northern Chile: implications for the tectonic evolution of the Central Andes.» *Tectonophysics*, 399(1), 2005: 125-154.



- Munk, L.A., D. Boutt, S. Hynek, y B. Moran. «Hydrogeochemical fluxes and processes contributing to the formation of lithium-enriched brines in a hyper-arid continental basin, *Chemical Geology*, Volume 493, Pages 37-57, ISSN 0009-2541, <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.05.013>.» 2018.
- Munk, L.A., D.F. Boutt, B.J. Moran, S.V. McKnight, y J. Jenckes. «Hydrogeologic and Geochemical Distinctions in Freshwater-Brine Systems of an Andean Salar.» 2021.
- Muñoz, N., R. Charrier, y J. K. Reutter. «Evolución de la Cuenca del Salar de Atacama: Inversión tectónica y relleno de una cuenca de antepaís de retroarco. *Proc. VIII Congreso Geológico Chileno*, 1: pp. 195-199.» 1997.
- Muñoz, N., R. Charrier, y T. Jordan. «Interactions between basement and cover during the evolution of the Salar de Atacama Basin, northern Chile.» *Revista Geológica de Chile*, 29(1), 2002: 55-80.
- Muñoz-Pardo, J.F., L. Mardones-Perez, y P. Vidts-Sabelle. «Funcionamiento hidrogeológico del acuífero del núcleo del Salar de Atacama, Chile.» *Ingeniería hidráulica en México*, vol. XIX, núm. 3, pp. 69-81. julio-septiembre de 2004., 2004.
- Niemeyer, H. «Geología del área Cerro Lila-Peine, Región de Antofagasta. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 147, 1 mapa escala 1:100.000. .» Santiago, 2013.
- NX-UNO. «Informe del Modelo Conceptual del Anexo 5, Adenda N°3 (Apéndice 1 - Estudio Geofísico Transiente Electromagnético - TEM - Margen Oriental del Salar de Atacama.» 2004.
- Orphanopoulos, D. «Informe Hidrogeológico: Evaluación de la disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas. Cuenca Salar de Atacama, II Región. DGA.» 1988.
- Pananont, P., Mpodozis, C., Blanco, N., Jordan, T.E., and Brown, L.D. «Cenozoic Evolution of the Northwest Salar de Atacama Basin, Northern Chile.» *Tectonics*, 2004.
- Philip, J. "Theory of infiltration. *Soil Science* 83 (5): 345-357." 1957.
- Post, V, H Kooi, y C Simmons. «Using hydraulic Head Measurements in Variable-Density Ground Water Flow Analyses. *Groundwater (NGWA)*, 45: 664-671. doi:10.1111/j.1745-6584.2007.00339.x.» 2007.
- PRAMAR. "Adenda I Estudio de Impacto Ambiental Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama., para SQM Salar S.A." 2005a.
- PRAMAR. «Hidrología, Hidrogeología y Comportamiento Hidráulico de las Lagunas Marginales del Salar del EIA Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama.» 2005b.
- Pueyo, J.J., G. Chong, y C. Ayora. «Lithium saltworks of the Salar de Atacama: a model for MgSO<sub>4</sub>-free ancient potash deposits. *Chem. Geol.* 466, 173-186.» 2017.
- Ramírez. «Evidencias de glaciación en el macizo de los volcanes Pular y Pajonales, Región de Antofagasta. V Congreso Geológico Chileno. Santiago.» 1988.
- Ramírez, C. «Geología del Cuadrángulo Río Grande y sector suroriental del Cuadrángulo Barros Arana, Provincia El Loa, II Región, Santiago, Chile. Memoria para optar al título de geólogo, Dpto. de Geología, Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.,» 1979.

- Ramírez, C., y M. Gardeweg. «Hoja Toconao. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 54, 1 mapa escala 1:250.000.» 1982.
- Ramírez, E. *Caracterización climatológica e hidrológica del Salar de Atacama*. Santiago: Corporación de Fomento de la Producción, Departamento Recursos Hidráulicos. 85 p., 1972.
- Riochilex. «Modelo de flujo de aguas subterráneas sector norte Salar de Atacama.» 1999a.
- Risacher, F., H. Alonso, y C. Salazar. «Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones, Chile. Síntesis.» 1999.
- Rockwood Lithium. «Estudio Geofísico NanoTEM y TEM. Proyecto Sector Sur Salar de Atacama. Región de Antofagasta, Chile.» 2013.
- Rubilar, C., and J. F. Sebastián. "Arquitectura interna y desarrollo oligoceno-neógeno de la cuenca del Salar de Atacama, Andes Centrales del Norte de Chile." Tesis de la Universidad de Chile, 2015.
- Rubilar, J., F. Martínez, C. Arriagada, J. Becerra, y S. Bascuñán. «Structure of the Cordillera de la Sal: A key tectonic element for the Oligocene-Neogene evolution of the Salar de Atacama basin, Central Andes, northern Chile. *Journal of South Ame.*» 2017.
- Salas J., Guimerà J., Cornellà O., Aravena R., Guzmán E., Tore C., Von Igel W., Moreno R. «Hidrogeología del sistema lagunas del margen Este del Salar de Atacama. (Chile).» 2010.
- Salazar, C., L. Rojas, A. Lillo, and E. Aguirre. *Análisis de requerimientos hídricos de vegas y Bofedales en el norte de Chile, Revista Vertiente*. 1999.
- Salisbury, M.J., B.R. Jicha, S.L. de Silva, B.S. Singer, and N.C. Jiménez. "40Ar/39Ar chronostratigraphy of Altiplano-Puna volcanic complex ignimbrites reveals the development of a major magmatic province. *Geological Society of America Bul.*" 2011.
- Şen, Zekâî. *Practical and applied hydrogeology*. Elsevier, 2015.
- SGA. «Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama (Anexo 1). Para Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones del Sistema de Pozas de Evaporación solar en el Salar de Atacama de Rockwood Lithium.» Santiago, Chile, 2015.
- Shah, Nirjhar, Mahmood Nachabe, y Mark Ross. «Extinction depth and evapotranspiration from ground water under selected land covers.» *Groundwater*, 45(3), 2007: 329-338.
- Solari, M, y otros. «Geología del área de Imilac-Quebrada Guanaqueros, Región de Antofagasta. Santiago.» s.f.
- SQM. «Informe N° 23 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del Proyecto "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama". INFORME DE MONITOREO SEMESTRAL ACTUALIZADO A JUNIO 2018.» 2018.
- SQM. «Informe N° 27 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del Proyecto "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama".» 2020b.
- SQM. «Informe N° 28 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del Proyecto "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama".» 2021b.

SQM. «Modelo Hidrogeológico Conceptual del Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Plan de Reducción de Extracciones en el Salar de Atacama. SQM S.A.» 2021a.

SQM. «Proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental. Apéndice 4.1. Línea de Base de Geología.» 2020a.

SRK Consulting. «Estudio Hidrológico Salar de Atacama.» 2020.

Topoland. «Topografía Especializada, Aerofotogrametría Sistema Lacustre de Peine.» 2018d.

## 4.3.8 Cambio Climático

### 4.3.8.1 Introducción

En el año 2021, el Servicio de Evaluación Ambiental publicó el documento “Criterio de Evaluación en el SEIA: Contenidos Técnicos para la Evaluación Ambiental del Recurso Hídrico”, el cual tiene como objetivo principal entregar lineamientos técnicos para la elaboración de los estudios asociados a proyectos que serán ingresados al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Este documento plantea que uno de los elementos a considerar al momento de realizar una caracterización de agua subterránea y/o agua superficial, es un análisis de sensibilidad que incorpore escenarios futuros de precipitaciones y temperaturas (Servicio de Evaluación Ambiental, 2011).

Para esto, se generaron proyecciones climáticas bajo escenarios de cambio climático, con base en modelos de circulación general (GCM, en adelante, por sus siglas en inglés), utilizando aquellos que representan de mejor manera los fenómenos climáticos característicos de Chile y que corresponden a un escenario más conservador, con condiciones más adversas, considerando un escenario de máximas emisiones de GEI (escenario RCP 8,5<sup>5</sup>). Cabe señalar que, con el fin de caracterizar de manera más realista las condiciones locales imperantes en el área de estudio, los GCM fueron sometidos a un proceso de escalamiento espacial, pasando la información de escala global<sup>6</sup> a escala local<sup>7</sup> mediante el uso de la información observada en estaciones y otros productos meteorológicos con base en observaciones; luego, se realizó un proceso de selección de modelos tomando en cuenta las tendencias del período histórico y los registros medidos en terreno, así como la revisión de correlaciones anuales, variabilidad mensual y representación estacional. Adicional a lo anterior, se realiza una corrección de sesgo para ambas variables estudiadas en las estaciones meteorológicas utilizadas, corroborando el buen ajuste en términos de variabilidad estacional y de magnitudes anuales, permitiendo de esta forma elegir los GCMs que representan de mejor manera la climatología del área de estudio.

Los valores obtenidos de los GCMs corresponden a series mensuales de precipitación y temperatura en puntos que representan a las estaciones meteorológicas, para el período comprendido entre 1850-2100. Es importante destacar que, para fines del modelo numérico, se considera solo el período 2021-2100, puesto que el período previo (1975 – 2020) corresponde a información observada. Con esta información y con el fin de contar con un análisis de sensibilidad asociado a los GCMs seleccionados, se estimaron balances hídricos considerando las variaciones en las entradas y salidas del sistema, producto de la variabilidad estimada para las precipitaciones y la temperatura media en distintos puntos ubicados en la cuenca.

### 4.3.8.2 Objetivo del estudio

---

5 Escenario de trayectorias de concentración representativas (Representative Concentration Pathways) que combina supuestos sobre una alta población y un crecimiento relativamente lento de los ingresos con tasas modestas de cambio tecnológico y mejoras en la intensidad energética, lo que lleva a largo plazo a una alta demanda de energía y emisiones de GEI en ausencia de políticas de cambio climático (Riahi, *et al.*, 2011). Lo anterior implica que presenta cambios más extremos en el caso de la temperatura.

6 Se refiere a la resolución espacial original del GCM utilizado.

7 Referente a la resolución espacial de las estaciones meteorológicas.

El presente informe tiene como objetivo presentar la metodología empleada para generar las series proyectadas de precipitaciones y temperatura media considerando el efecto de cambio climático bajo un escenario conservador, además de mostrar los resultados obtenidos. Esto, con el fin de generar los insumos necesarios para poder alimentar a los modelos hidrogeológicos numéricos y calcular los niveles proyectados, estimando, además, la variación en las recargas y en las descargas del sistema considerando los diferentes escenarios de cambio en temperaturas y precipitaciones.

#### 4.3.8.3 Área de estudio

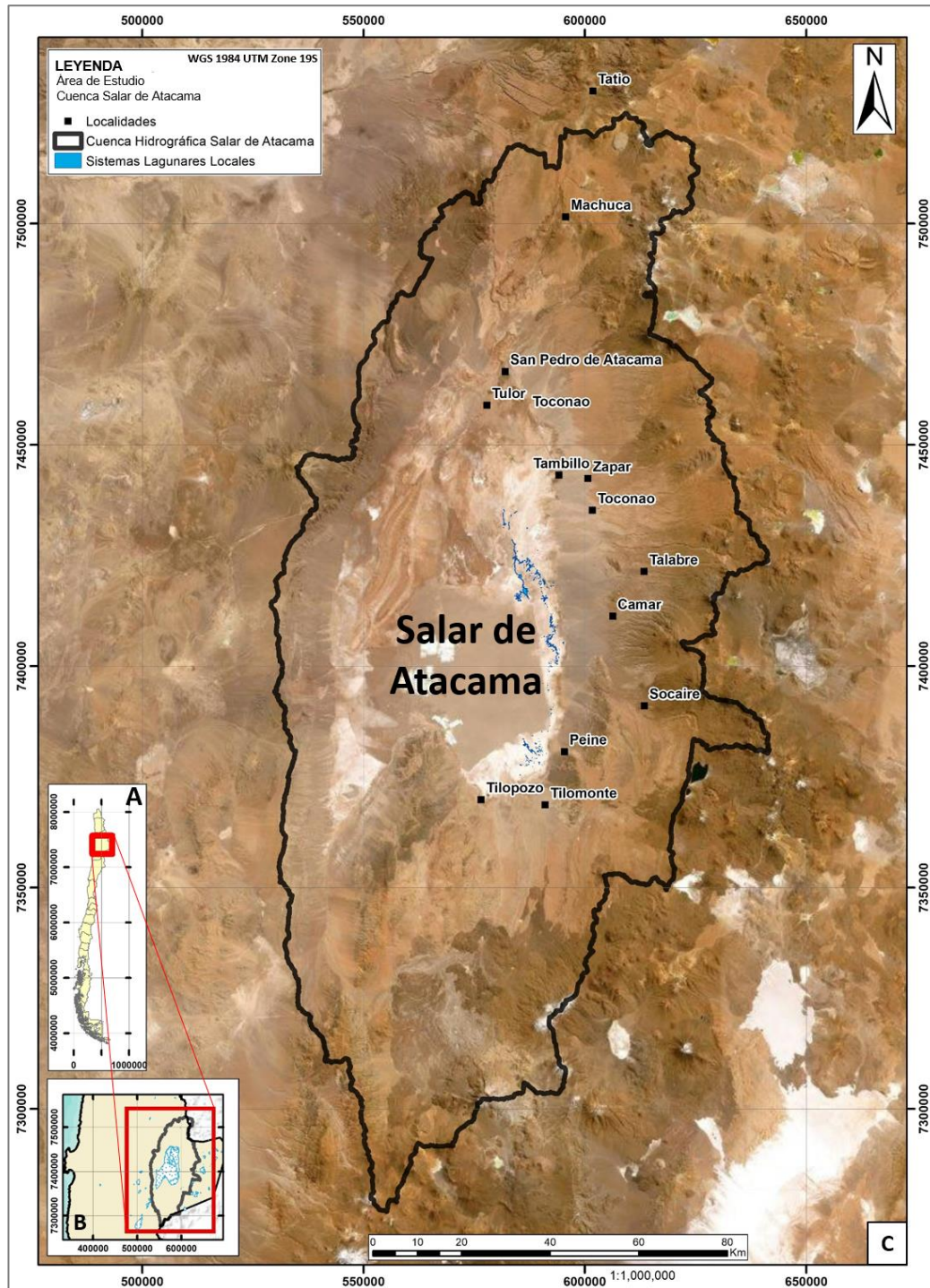
Para evaluar el comportamiento de las precipitaciones y las temperaturas medias modeladas con los GCM, se consideró un análisis a escala de cuenca<sup>8</sup> (Figura 4-156), poniendo mayor énfasis en aquellos puntos que cuentan con información meteorológica, los cuales permiten generar interpolaciones que indican la distribución de las variables analizadas en el área de estudio para un período determinado.

---

<sup>8</sup> Integra la información recopilada en todas las estaciones meteorológicas existentes en la cuenca.



Figura 4-156. Ubicación general del Salar de Atacama



En (A) se muestra un mapa de Chile con sus divisiones regionales, sobre el cual se resalta el área aproximada de la Región de Antofagasta (B). La cuenca del Salar de Atacama (C) se encuentra en el extremo oriental de dicha región.

Fuente: SQM, 2021a.

#### 4.3.8.4 Metodología de trabajo

Para generar las series climáticas proyectadas bajo escenarios de cambio climático, se utilizó como metodología general la secuencia presentada en la Figura 4-157. El primer paso corresponde a la preparación de las series de precipitaciones y temperaturas medias observadas, en el cual se aplicó una metodología de relleno de datos para el periodo histórico (1975 - 2019) en el caso de las estaciones que contaran con registros incompletos; y luego se realizó un análisis de consistencia, el cual radica en verificar la coherencia en las estadísticas pluviométricas con respecto a una estación patrón, ajustando los valores en caso de que sea necesario.

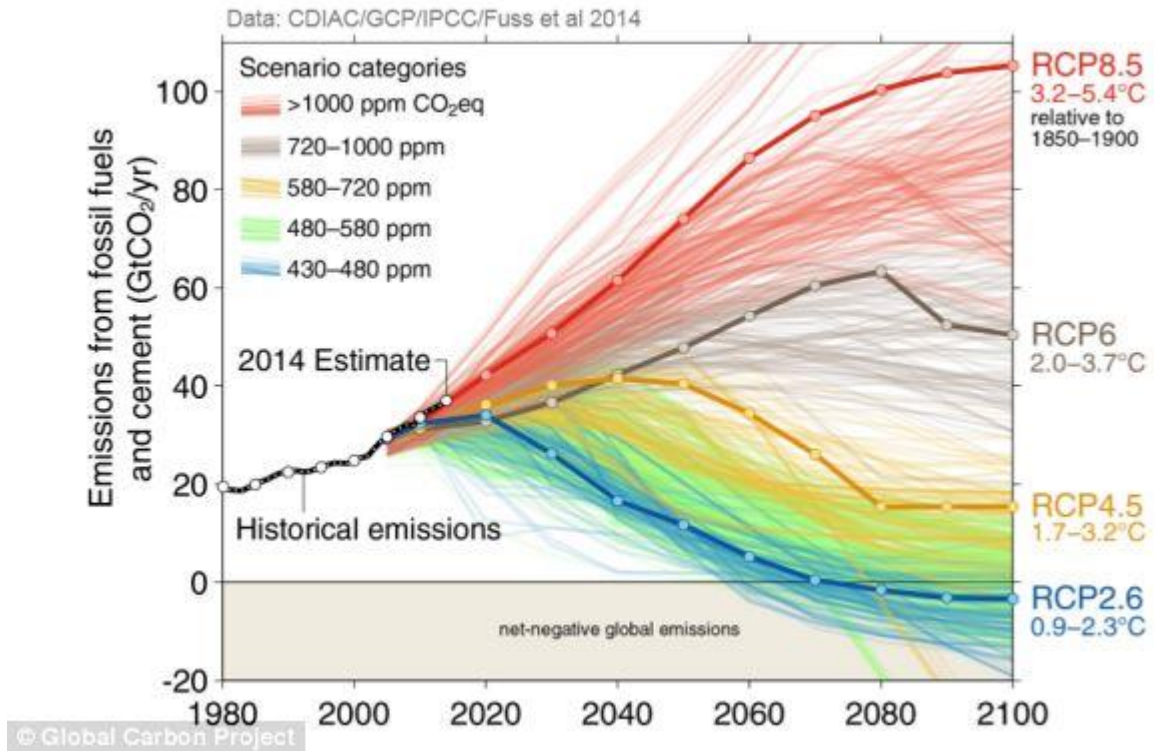
Luego de contar con series de tiempo completas, se procedió a la definición del escenario de trayectorias de concentración representativas. En este caso, se consideró el escenario de emisiones RCP8,5, debido a que representa una condición más conservadora, al corresponder al escenario de máximas emisiones de GEI y proyectar el mayor aumento en temperaturas, generando mayor estrés sobre el sistema, como se muestra en la Figura 4-158 .

Figura 4-157. Esquema metodología utilizada para generar proyecciones climáticas bajo escenarios de cambio climático.



Fuente: SQM, 2021.

Figura 4-158. Emisiones de CO2 para diferentes escenarios de trayectorias de concentración representativas



Fuente: Global Carbon Project, 2016.

Posteriormente, se procedió a generar una preselección de los GCM disponibles, tomando en cuenta los modelos recomendados en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017). Éstos fueron previamente sometidos a un análisis de correlación de las simulaciones históricas con las oscilaciones ENSO<sup>9</sup> y SAM<sup>10</sup>; a un análisis de sensibilidad climática, tomando en cuenta qué tan sensible es cada modelo con respecto a cambios en las concentraciones de CO<sub>2</sub>; y un análisis de deltas de temperatura y precipitación a escala regional<sup>11</sup>. En la Tabla 4-65 se muestran los 12 modelos preseleccionados para el análisis.

9 El Niño-Oscilación del Sur

10 Modo Anular del Sur u Oscilación antártica

11 Escala espacial considerada a nivel de Chile continental.

Tabla 4-65. Modelos climáticos preseleccionados. Fuente: Elaboración propia, con base en Fuente especificada no válida..

Modelo GCM Preseleccionado	Resolución espacial Latitud (°) x Longitud (°) <sup>12</sup>
ACCESS1-0	1,250 x 1,875
ACCESS1-3	1,250 x 1,875
BNU-ESM	2,791 x 2,813
CCSM4	0,942 x 1,250
CNRM-CM5	1,401 x 1,406
CSIRO-Mk3-6-0	1,865 x 1,875
IPSL-CM5A-LR	1,895 x 3,750
IPSL-CM5A-MR	1,268 x 2,500
IPSL-CM5B-LR	1,895 x 3,750
MIROC-ESM	2,791 x 2,813
MPI-ESM-LR	1,865 x 1,875
NorESM1-M	1,895 x 2,500

Fuente: Elaborado por SQM.

Luego, como los GCM presentan una resolución espacial que varía entre 100 y 420 kilómetros aproximadamente (Tabla 4-65), dependiendo del modelo a utilizar. Para pasar esta información de escala global<sup>13</sup> a una local<sup>14</sup>, se aplicó el escalamiento estadístico (Kotamarthi et al., 2021; Maraun & Widmann, 2018) que consta de dos partes. En primer lugar, se realizó un escalamiento espacial, el cual permitió llevar los datos de una grilla gruesa a la ubicación de las distintas estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis de precipitaciones y temperatura media. El escalamiento espacial se realiza aplicando dos métodos: inverso a la distancia y nodos más cercanos (4 nodos, cada uno por separado), obteniendo 5 series escaladas espacialmente por estación meteorológica. En segundo lugar, para ajustar la información modelada a las observaciones, se realizó una corrección de sesgo.

Para continuar con el proceso de selección de modelos se aplicaron 4 criterios:

- El primero corresponde a un análisis de tendencia anual, donde se evalúa la pendiente de las líneas de tendencia de la precipitación anual y la temperatura media anual, descartando a aquellos GCM en los cuales se tiene un comportamiento disímil (signo de pendiente diferentes) entre lo observado y lo presentado por el modelo para el período histórico.

<sup>12</sup> Considerar que 1 grado decimal equivale aproximadamente a 111,3 km.

<sup>13</sup> Se refiere a la resolución espacial original del GCM utilizado.

<sup>14</sup> Referente a la resolución espacial de las estaciones meteorológicas.



- El segundo criterio consiste en la evaluación de la correlación de las curvas de duración anual, las que se obtienen ordenando los registros de forma creciente y luego comparando los valores observados con los modelados, manteniendo a aquellos modelos que presentan un coeficiente de determinación sobre 0,6.
- El tercer criterio corresponde al análisis de la estacionalidad de las series observadas y las modeladas, en la cual se evalúa la similitud en el comportamiento estacional y se comparan los valores mínimos y máximos mensuales, verificando si existe concordancia entre el mes del año en el que se producen los casos extremos, lo cual se realiza principalmente de modo visual.
- El cuarto criterio es un análisis de variabilidad mensual, el cual es similar al segundo criterio, pero en este caso se generan curvas de duración mensual y se comparan los valores observados con los modelados, escogiendo aquellos modelos que superan cierto valor de coeficiente de determinación (0,5).

Una vez aplicado cada uno de los criterios indicados, se generaron matrices binarias para precipitación y temperatura media, evaluando para cada estación y tipo de escalamiento espacial si los distintos modelos seleccionados aprobaban los criterios o no. Con la aplicación de estas matrices, se escogieron los modelos que presentaban mejores resultados para la mayor cantidad de estaciones por tipo de escalamiento espacial, escogiendo aquellos GCM en los cuales 7 estaciones cumplían con la totalidad de los criterios en el caso de la precipitación, y 5 estaciones, en el caso de la temperatura (más detalle en capítulo XXX , Figura 4-182).

Después de obtener la nueva selección de modelos, se analizaron nuevamente las curvas de duración anual y estacional, pero en este caso se consideraron las series modeladas corregidas por sesgo. Por otra parte, y tal como se mencionó anteriormente, en cada estación se obtuvieron 5 series producto de los tipos de escalamiento espacial utilizados. Por lo tanto, para cada estación y modelo se escogió el escalamiento con mejor ajuste. Sin embargo, aún con esta clasificación, algunos modelos no cumplieron con el estándar, seleccionando finalmente aquellos GCM que para la mayoría de las estaciones mostraron mejores resultados. Del procedimiento anterior, se seleccionan los modelos CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, MIROC-ESM y NorESM1-M.

Los 4 modelos seleccionados permiten obtener series de tiempo mensuales de precipitaciones y temperaturas medias, con las cuales se analizaron las condiciones promedio para el período proyectado (2021-2100) mediante la distribución espacial de estas variables, obtenida a través de una interpolación de tipo Spline a escala de cuenca<sup>15</sup>. Con base en lo anterior, se estimaron las variaciones proyectadas para cada modelo, identificando que 1 muestra proyecciones extremadamente pesimistas al mediano y largo plazo con respecto a los otros. Por lo tanto, se decidió no utilizarlo al ser considerado *outlier*. Respecto a los 3 restantes, se visualizan resultados similares entre ellos, escogiendo finalmente el más conservador de los 3: MIROC-ESM. A partir de éste se generaron series de recarga con frecuencia mensual, replicando la metodología presentada en el Modelo Conceptual Hidrogeológico Regional (SQM, 2021a).

Finalmente, calculando las condiciones promedio para 3 períodos definidos para las simulaciones, se estimaron las entradas al sistema hidrogeológico utilizando la metodología de estimación de recarga antes mencionada. Además, se consideró una variación en las descargas del sistema estimada a partir de referencias bibliográficas que indican porcentajes de variación de la evaporación con base en la evaluación de la temperatura, estimando el balance hídrico para cada período.

---

<sup>15</sup> Integra la información recopilada en todas las estaciones meteorológicas existentes en la cuenca.



El detalle de la metodología empleada se presenta en los capítulos 4.3.8.4.1, 4.3.8.4.2 y 4.3.8.4.3.

#### 4.3.8.4.1 Modelos de circulación general

En el contexto de la elaboración los informes del Panel Intergubernamental sobre cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés), la comunidad internacional (alrededor de 40 grupos de investigación en todo el mundo) diseña y ejecuta de manera coordinada simulaciones climáticas globales. Dichos modelos se denominan Modelos de Circulación General o GCM y son representaciones numéricas de la física, química y dinámica de la atmósfera y del océano, la criósfera (nieve, hielo marino, glaciares), la vegetación terrestre y el ciclo de carbono (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2018), como se muestra en la Figura 4-159.

Los modelos GCM son forzados principalmente por emisiones o concentraciones de gases de efecto invernadero (antropogénicos y naturales), aerosoles provenientes de erupciones volcánicas, quema de biomasa, o contaminación. Otros factores que influyen en los GCM son cambios de uso de suelo y radiación solar. Según lo indicado anteriormente, para evaluar las trayectorias de concentración representativas (Representative Concentration Pathways o RCP) se combinan supuestos sobre el tamaño de la población, estilo de vida, actividad económica, uso de energía, patrones de uso de la tierra, tecnología y política climática (IPCC, 2014).

Cabe señalar que, los modelos climáticos acoplados se enmarcan en una plataforma de cooperación internacional, llamada CMIP (*Coupled Model Intercomparison Project*, Proyecto de intercomparación de modelos acoplados), donde para este caso particular se utiliza la Fase 5, que corresponde a la información más reciente que se tenía disponible a la fecha del desarrollo de este análisis. CMIP5 define un conjunto de 35 modelos climáticos (Tabla 4-66) diseñados para evaluar los mecanismos responsables de las diferencias del modelo en retroalimentaciones poco entendidas asociadas con el ciclo del carbono y con las nubes; examinar la "previsibilidad" del clima y explorar la capacidad de los modelos para predecir el clima en escalas de tiempo decenales y, de manera más general; determinar por qué los modelos igualmente forzados producen una variedad de respuestas (Taylor, Stouffer, & Meehl, 2012).

Tabla 4-66. Modelos climáticos CMIP5.

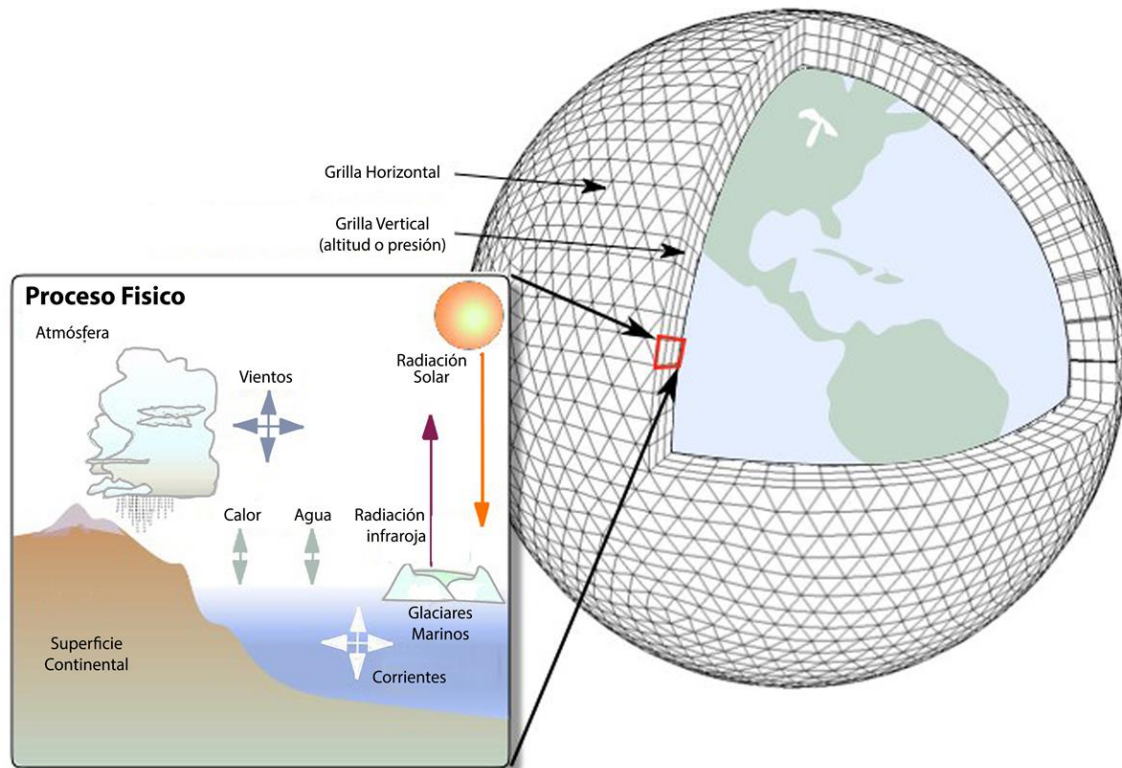
Modelo	Institución, País
ACCESS1-0	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO)/ Bureau of Meteorology, Australia
ACCESS1-3	
bcc-csm1-1 bcc-csm1-1-m	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration, China
BNU-ESM	College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, China
CanESM2	Centre for Climate Modeling and Analysis, Canadá
CCSM4	National Center for Atmospheric Research (NCAR), Estados Unidos
CESM1-BGC	
CESM1-CAM5	
CMCC-CM	Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici, Italia
CMCC-CMS	
CNRM-CM5	Centre National de Recherches Météorologiques, Francia

Tabla 4-66. Modelos climáticos CMIP5.

Modelo	Institución, País
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO Climate Change Centre of Excellence, Australia
EC-EARTH	European Earth System Model Consortium, Europa
FGOALS-g2	Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, China
FGOALS-s2	
GFDL-CM3	NOAA/Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, Estados Unidos
GFDL-ESM2G	
GFDL-ESM2M	
GISS-E2-H-CC	NASA Goddard Institute for Space Studies, Estados Unidos
GISS-E2-R	
GISS-E2-R-CC	
HadGEM2-CC	Met Office Hadley Centre, Reino Unido
HadGEM2-ES	
IPSL-CM5A-LR	L'Institute Pierre-Simon Laplace, Francia
IPSL-CM5A-MR	
IPSL-CM5B-LR	
MIROC5	Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, and National Institute for Environmental Studies, Japón
MIROC-ESM-CHEM	
MIROC-ESM	
MPI-ESM-LR	Max Planck Institute for Meteorology, Alemania
MPI-ESM-MR	
MRI-CGCM3	Meteorological Research Institute, Tsukuba, Japón
NorESM1-M	Norwegian Climate Centre, Noruega
NorESM1-ME	

Fuente: Liu, et al (2016).

Figura 4-159. Esquema de representación de sistema acoplado Atmósfera – Océano – Suelo en GCMs.



Fuente: Modificado de <https://climatesciences.jpl.nasa.gov/projects/cmda/index.html>

Es importante señalar que todos los modelos GCM que participan en CMIP5 debieron correr como mínimo una simulación llamada “histórica” que abarca los años 1850 - 2005, y que está forzada por gases de efecto invernadero, erupciones volcánicas, radiación solar, y otros fenómenos observados. Además, se realizaron simulaciones de escenarios futuros de emisiones para el periodo 2006 - 2100, siguiendo las trayectorias RCP carbono (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2018).

#### 4.3.8.4.2 Relleno de datos y análisis de consistencia

Para la caracterización de la precipitación se utilizó el análisis presentado en el informe del Modelo Conceptual Hidrogeológico Regional (SQM., 2021a), en el cual se realiza un inventario de las estaciones meteorológicas con registros de precipitación existentes en la zona de estudio (Tabla 4-67 y Figura 4-160) y posterior análisis de 12 estaciones consideradas como representativas de ésta, incluyendo el estudio hidrológico desarrollado por SRK Consulting (2020). En este último se hace una evaluación para el período 1986 - 2019, en el cual se realizó una comparación de los promedios anuales resultantes del relleno de datos con otros estudios realizados en la misma cuenca (que consideran las mismas estaciones), identificando diferencias en las estaciones Monturaqui, KCL y Chaxa (SRK Consulting, 2020). Por lo tanto, se hizo un análisis de consistencia

mediante el método de las Curvas Másicas o Doble Acumuladas sólo para estas 3 estaciones de las 12 examinadas, corrigiendo finalmente estas series.

Por otra parte, tal como se indicó en la sección 4.3.8.4.1 los modelos de circulación general utilizados consideran el periodo histórico hasta el año 2005. Por lo tanto, para realizar el ajuste entre lo simulado por los modelos y lo observado, se estimó conveniente trabajar con un periodo de línea base de 30 años mínimo, correspondiente a 1975 - 2005. Adicionalmente a esto y, si bien en el informe del Modelo Conceptual Hidrogeológico Regional (SQM., 2021a), se presenta el análisis para el periodo de largo plazo 1986 - 2019, el relleno para las 12 estaciones seleccionadas (ver Tabla 4-68) se realizó a partir del año 1974. Esto con el fin de considerar el registro total de datos en Monturaqui, ya que es la única estación representativa al sur de la cuenca.

Por lo anteriormente expuesto, el periodo considerado para realizar el relleno de datos mensuales de precipitación y el análisis de consistencia mediante el método de las Curvas Másicas o Doble Acumuladas corresponde al 1975 - 2019.

**Tabla 4-67. Estaciones Meteorológicas con registros de precipitación en la cuenca del Salar de Atacama.**

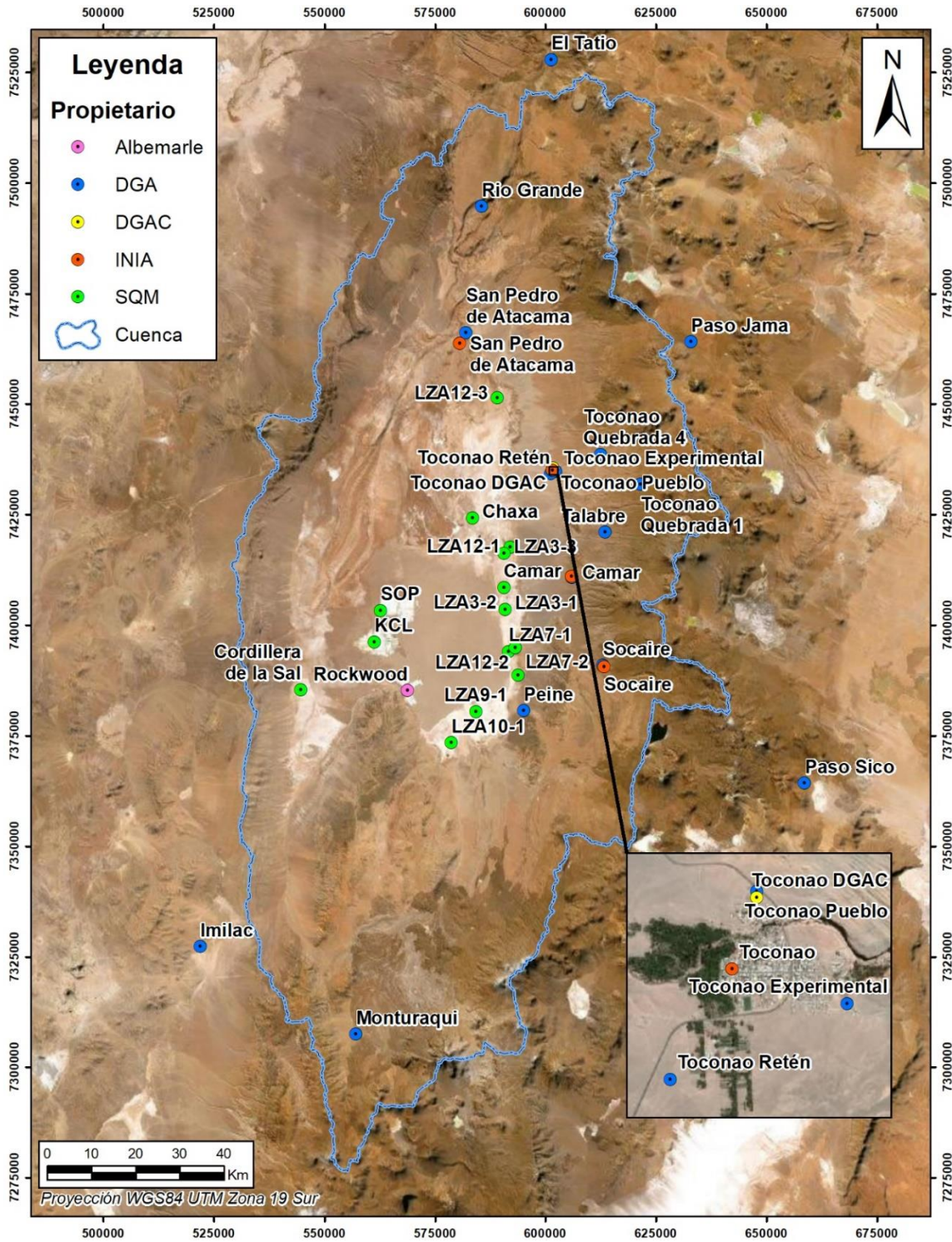
Estación	Coordenadas WGS84			Fuente	Periodo De Registro
	Este	Norte	Altura		
	(m)	(m)	(m s.n.m.)		
Camar	606.057	7.410.866	2.721	DGA	1979-2020
Imilac	521.881	7.327.295	3.000	DGA	1974-1977
El Tatio	601.295	7.527.990	4.329	DGA	1977-2020
Monturaqui	557.103	7.307.450	3.430	DGA	1974-1979
Peine	595.137	7.380.682	2.390	DGA	1974-2020
Rio Grande	585.548	7.494.766	3.217	DGA	1977-2020
San Pedro de Atacama	581.987	7.466.178	2.445	DGA	1959-2019
Socaire	613.092	7.390.963	3.248	DGA	1974-2019
Talabre	613.530	7.421.080	3.255	DGA	1995-2020
Toconao Experimental	602.388	7.434.809	2.500	DGA	1975-2007
Toconao Retén	601.191	7.434.294	2.460	DGA	1975-1991
Paso Jama	632.989	7.464.136	4.825	DGA	2016-2018
Paso Sico	658.720	7.364.239	4.323	DGA	2016-2020
Toconao Pueblo	601.777	7.435.573	2.492	DGA	2016-2020
Toconao Quebrada 1	621.564	7.431.858	3.990	DGA	2016-2020
Toconao Quebrada 4	612.592	7.438.698	3.437	DGA	2016-2020
Toconao DGAC	601.775	7.435.530	2.495	DGAC	2013-2018

Camar	605.881	7.411.033	2.694	INIA	2017-2020
San Pedro de Atacama	580.648	7.463.770	2.416	INIA	2010-2020
Socaire	613.252	7.390.661	3.357	INIA	2010-2020
Toconao	601.607	7.435.045	2.478	INIA	2010-2020
Chaxa	583.530	7.424.240	2.307	SQM	1999-2020
KCL	561.376	7.396.240	2.300	SQM	2005-2020
Cordillera de la Sal	544.617	7.335.860	2.363	SQM	2017-2020
SOP	562.717	7.403.324	2.300	SQM	2011-2020
<u>LZA10-1</u>	578.689	7.373.409	2.304	SQM	2015-2020
<u>LZA7-1</u>	591.697	7.394.060	2.301	SQM	2015-2020
<u>LZA7-2</u>	593.889	7.388.689	2.302	SQM	2015-2020
<u>LZA3-1</u>	590.919	7.403.563	2.300	SQM	2015-2020
<u>LZA3-2</u>	590.646	7.408.473	2.301	SQM	2015-2020
<u>LZA12-2</u>	593.220	7.394.904	2.306	SQM	2015-2020
<u>LZA12-3</u>	589.174	7.451.500	2.351	SQM	2015-2020
<u>LZA12-1</u>	592.021	7.417.657	2.309	SQM	2015-2020
<u>LZA3-3</u>	590.638	7.416.254	2.302	SQM	2015-2020
LZA9-1	584.312	7.380.450	2.301	SQM	2015-2020
Rockwood	568.771	7.385.238	2.300	Albemarle	1997-2020

Fuente: SQM., 2021a.



Figura 4-160. Localización de las Estaciones Meteorológicas consideradas para la evaluación de la precipitación



Fuente: SQM Fuente especificada no válida.

Como primer paso para el relleno de datos se llevó a cabo una correlación de Pearson entre las estaciones de análisis y las consideradas como apoyo para el relleno, posterior a la normalización de los datos, ya que el test de Kolmogorov-Smirnov con un 95% de confianza (Machiwal & Jha, 2012) mostró que los valores mensuales de precipitación no tienen una distribución normal. Las estaciones patrón utilizadas para el relleno presentan una correlación igual o superior a 0,7 (González *et al.*, 2002). Teniendo los resultados de esto, se procedió a completar los registros mensuales a través de dos métodos (dependiendo de la estación a rellenar): Combinación Lineal Ponderada (CLP) y Criterio de Correlación Lineal (CCL). El detalle de este proceso se encuentra en el Apéndice D del modelo hidrogeológico conceptual regional (SQM, 2021a).

Para el análisis de consistencia se seleccionaron las estaciones patrón de cada estación meteorológica a analizar considerando el índice de ubicación y altura (IUA) y la distribución de precipitaciones presentadas en el modelo hidrogeológico conceptual regional (SQM, 2021a). El IUA contempla la coordenada norte (N) y este (E), así como la altura (z) de la estación y las coordenadas norte ( $N^*$ ) y este ( $E^*$ ) de referencia, equivalentes a 7.000.000 y 350.000, respectivamente.

$$IUA = \frac{1}{1000} \cdot \left( \frac{N - N^*}{300} + \frac{E - E^*}{200} + z \right)$$

Dependiendo de la estación a evaluar, se utilizaron 2 o 3 estaciones patrón, las cuales se muestran en la Tabla 4-68. Luego se ordenaron las series anuales (desde el año más reciente al más antiguo) y se obtienen los valores acumulados año tras año hacia el pasado. En paralelo, se promedian las precipitaciones anuales de las estaciones patrón respectivas y al igual que para las estaciones individuales se acumulan los valores año a año, contrastando gráficamente ambas series (la serie a evaluar acumulada en el eje y, mientras que en el eje x la serie acumulada del promedio de las estaciones patrón).

**Tabla 4-68. Estaciones patrón asociada a cada estación pluviométrica. Fuente: Elaboración propia.**

Estación	Estaciones Patrón		
Camar - DGA	Chaxa	Socaire - DGA	Toconao Experimental - DGA
Chaxa	Peine - DGA	San Pedro de Atacama - DGA	Toconao Experimental - DGA
El Tatio - DGA	Rio Grande - DGA	Talabre - DGA	
KCL	Chaxa	Peine - DGA	SCL
Monturaqui - DGA	Camar - DGA	Socaire - DGA	
Peine - DGA	San Pedro de Atacama - DGA	SCL	Toconao Experimental - DGA
Rio Grande - DGA	El Tatio - DGA	Talabre - DGA	
San Pedro de Atacama - DGA	Camar - DGA	Rio Grande - DGA	Toconao Experimental - DGA
Socaire - DGA	Camar - DGA	Talabre - DGA	
SCL	Chaxa	KCL	Peine - DGA
Talabre - DGA	Socaire - DGA	Toconao Experimental - DGA	
Toconao Experimental - DGA	Camar - DGA	San Pedro de Atacama - DGA	

En la Figura 4-161 y Figura 4-162 se muestra la curva doble acumulada de la estación Camar (DGA) y Chaxa, en el primer caso no se observa un cambio en la pendiente, es decir, no presenta alguna falla en los registros. Por su parte, la estación Chaxa presenta un cambio en el comportamiento lineal que se observaba en los años más recientes, teniendo que ser corregida. En este último caso, se comparan los datos originales con los corregidos como se observa en la Figura 4-163. Es importante destacar que, las series evaluadas en esta etapa corresponden a las ya corregidas por SRK Consulting (2020).

En resumen, al analizar las figuras presentadas en el Anexo 4 se observa que las estaciones Camar (DGA), Monturaqui (DGA), Peine (DGA) y Rio Grande (DGA) no muestran un cambio en su pendiente, por lo tanto, no son corregidas. El resto de las estaciones muestran al menos un cambio en la pendiente, lo que se interpreta como un error en los datos rellenados y/u observados. Respecto a esto, se decidió aplicar en primer lugar una corrección sólo en los datos rellenados más antiguos, ya que se asume que la información más reciente es más confiable. Sin embargo, para aquellas estaciones que cuentan con registros mensuales completos para los años más antiguos, se corrige el valor observado (El Tatio, San Pedro de Atacama, Socaire y Toconao Experimental). En ambos casos, la corrección se realiza al multiplicar el valor mensual original por el factor de corrección, que corresponde al cociente entre las pendientes de los tramos respectivos.

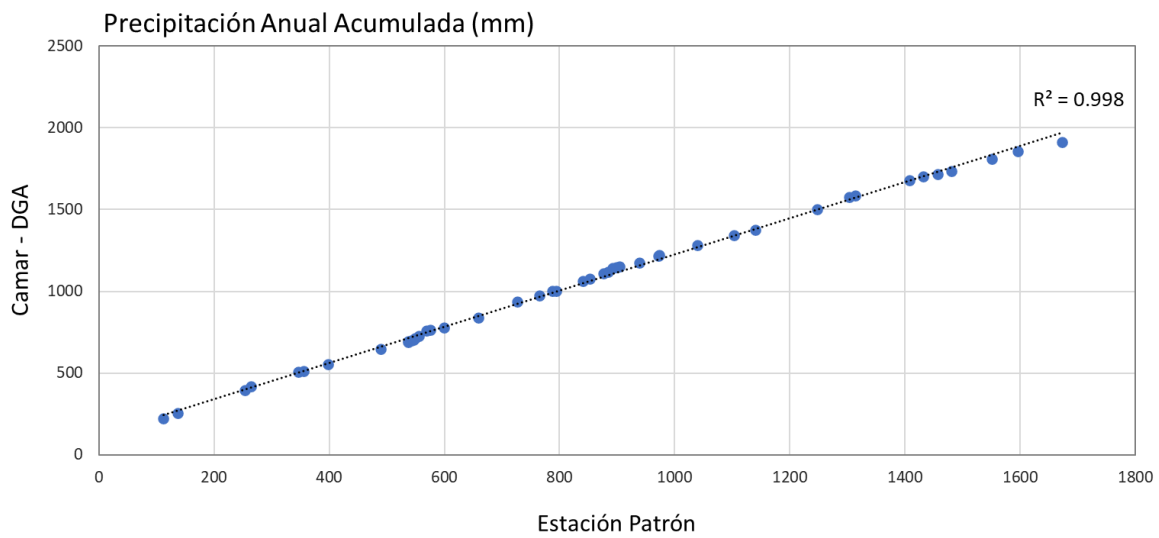
$$P_{p \text{ Corregida}} = \frac{M_{\text{Corregida}}}{M_{\text{Original}}} P_{p \text{ Original}}$$

Donde  $P_{p \text{ Corregida}}$  es la precipitación mensual corregida,  $M_{\text{Corregida}}$  es la pendiente del tramo que se considera sin falla (más reciente),  $M_{\text{Original}}$  es la pendiente del tramo que se debe corregir (más antiguo) y  $P_{p \text{ Original}}$  es la precipitación mensual a corregir.

En el caso de Chaxa y KCL, la corrección se aplicó en los meses rellenados y para los años no analizados por SRK Consulting (2020), es decir, previos a 1986. Puesto que, en dicho documento ya se había aplicado una corrección.

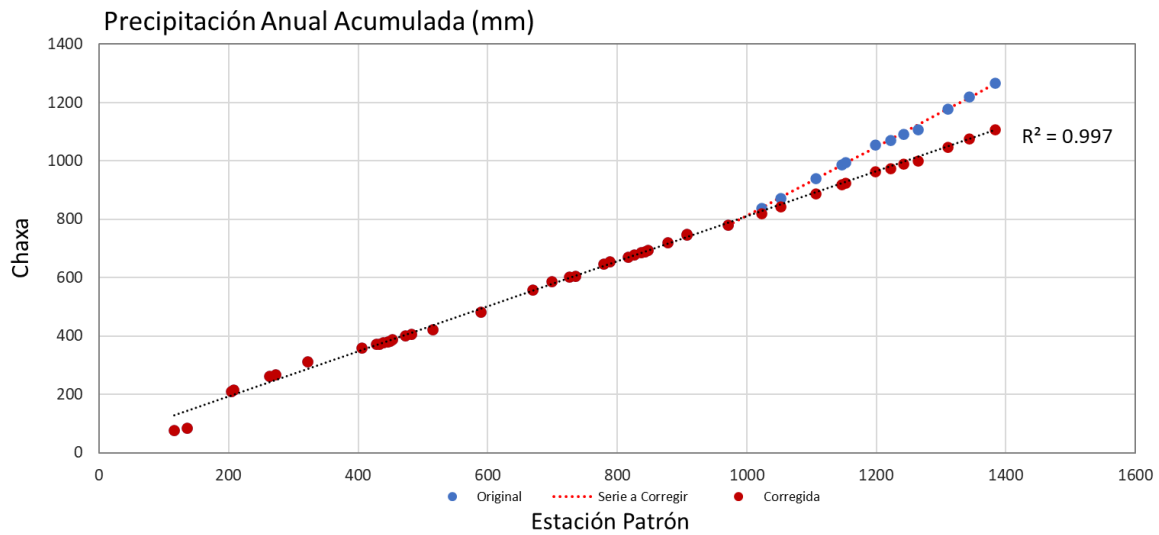
La comparación de los valores anuales originales y corregidos para todas las estaciones se presenta en el Anexo 4.

Figura 4-161. Curva doble acumulada en estación Camar (DGA), periodo 1975 – 2019.



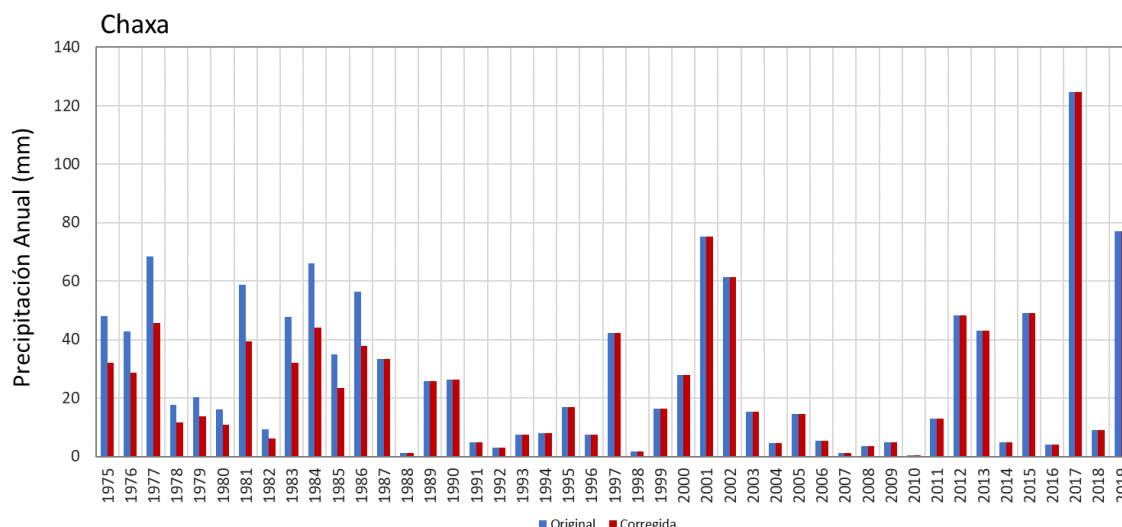
Fuente: Elaborado por SQM.

Figura 4-162. Curva doble acumulada en estación Chaxa, periodo 1975 – 2019.



Fuente: Elaborado por SQM.

Figura 4-163. Comparación entre precipitación anual original (rellenada) y corregida mediante curva doble acumulada en estación Chaxa, periodo 1975 - 2019.



Fuente: Elaborado por SQM.

Respecto a la temperatura media, se hace una recopilación de las estaciones meteorológicas que cuentan con esta información en el Salar (Tabla 4-69 y Figura 4-164). Posteriormente, se decidió analizar las estaciones que cuenten con al menos 5 años de información (de 16 estaciones recopiladas, 9 estaciones cumplen con este criterio) y evaluar los datos del CR2MET (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2020), producto grillado de resolución espacial 0,05° (5 km aproximadamente) para todo el territorio de Chile continental. Este último cuenta con temperaturas extremas (máximas y mínimas diurnas) durante el periodo 1979 - 2019, cuyos resultados se basan en la temperatura superficial mediante imágenes satelitales (MODIS LST) e información local (topografía y observaciones de temperatura) y de reanálisis atmosférico (ERA-Interim).

Tabla 4-69. Estaciones Meteorológicas con registros de temperatura media en la cuenca del Salar de Atacama.

Estación	Coordenadas WGS84			Fuente	Periodo De Registro
	Este	Norte	Altura		
	(m)	(m)	(m s.n.m.)		
Chaxa	583.530	7.424.240	2.307	SQM	1999-2020
Cordillera de la Sal	544.617	7.335.860	2.363	SQM	2017-2019
El Tatio	601.295	7.527.990	4.329	DGA	2012-2017
KCL	561.376	7.396.240	2.300	SQM	1999-2020
Monturaqui	557.103	7.307.450	3.430	DGA	1974-1980
Paso Jama	632.989	7.464.136	4.825	DGA	2016-2017

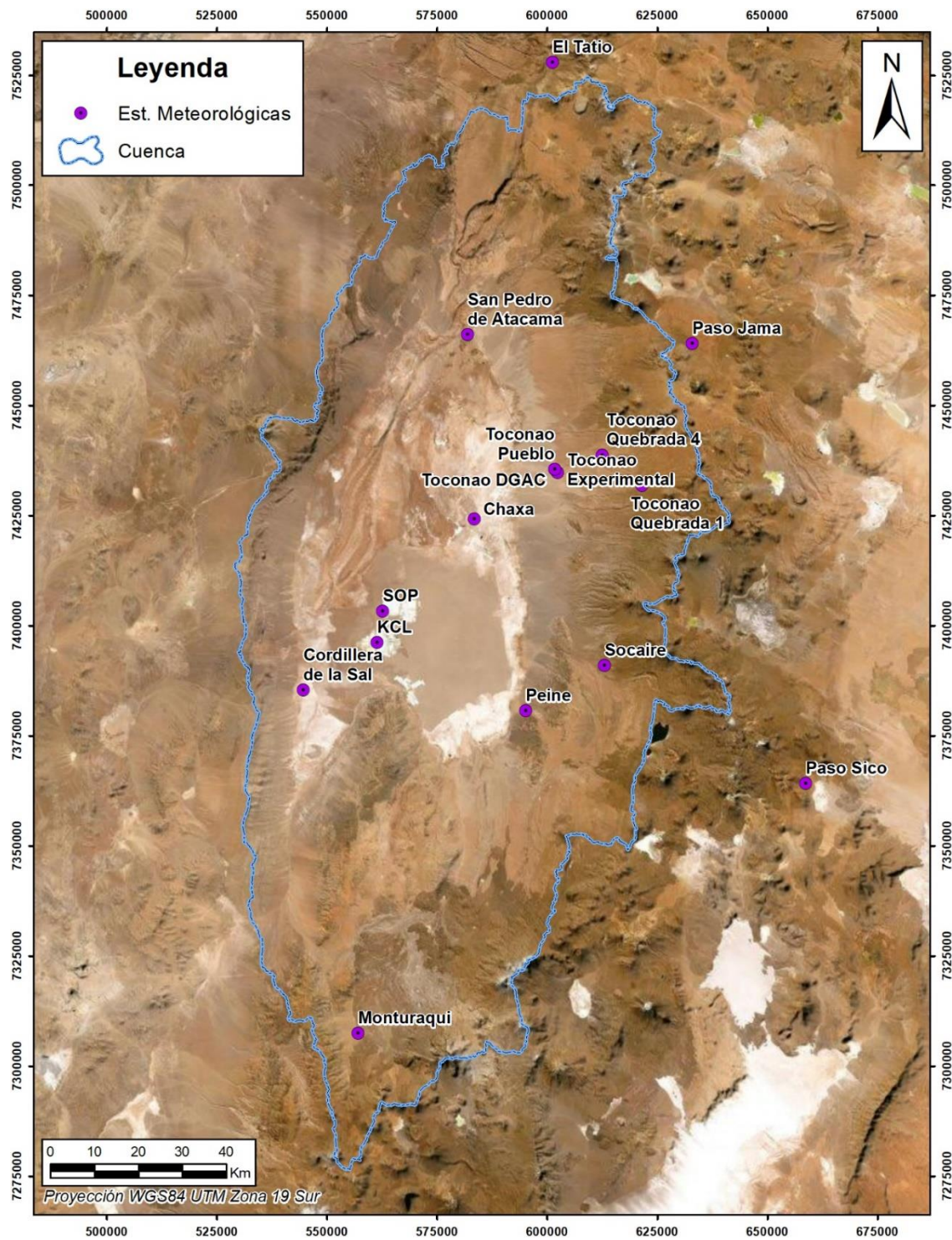


Tabla 4-69. Estaciones Meteorológicas con registros de temperatura media en la cuenca del Salar de Atacama.

Estación	Coordenadas WGS84			Fuente	Periodo De Registro
	Este	Norte	Altura		
	(m)	(m)	(m s.n.m.)		
Paso Sico	658.720	7.364.239	4.323	DGA	2016-2017
Peine	595.137	7.380.682	2.390	DGA	1974-1994
San Pedro de Atacama	581.987	7.466.178	2.445	DGA	1973-1989
Socaire	613.092	7.390.963	3.248	DGA	1974-1993
SOP	562.717	7.403.324	2.300	SQM	2011-2020
Toconao	601.607	7.435.045	2.478	DGAC	2013-2018
Toconao Experimental	602.388	7.434.809	2.500	DGA	1981-1995
Toconao Pueblo	601.777	7.435.573	2.492	DGA	2016-2017
Toconao Quebrada 1	621.564	7.431.858	3.990	DGA	2016-2017
Toconao Quebrada 4	612.592	7.438.698	3.437	DGA	2016-2017

Fuente: Elaborado por SQM

Figura 4-164. Localización de las Estaciones Meteorológicas consideradas para la evaluación de la temperatura.



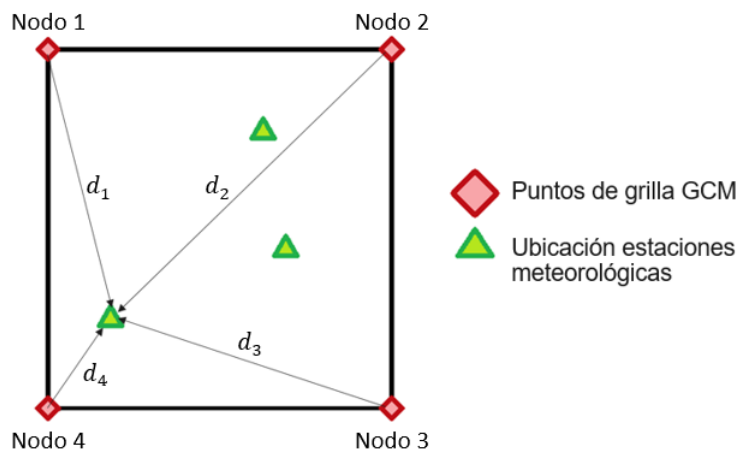
Fuente: Elaborado por SQM.

Para caracterizar la distribución de temperatura en la zona, se realiza un escalamiento espacial mediante el método de inverso a la distancia utilizando los 4 nodos con información del CR2MET más cercanos a cada estación meteorológica a analizar (Figura 4-165) según la siguiente ecuación.

$$T = \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{T_i}{d_i^f}}{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{d_i^f}}$$

Donde  $T$  es la temperatura media en la estación meteorológica de interés,  $T_i$  el promedio de las temperaturas extremas (máximas y mínimas diurnas) en el punto  $i$  de la grilla CR2MET,  $d_i$  la distancia entre el punto de interés y el nodo  $i$  de la grilla CR2MET y  $f$  es el factor de ponderación a la distancia, en este caso equivalente a 1,5.

Figura 4-165. Esquema método inverso a la distancia. Fuente: Elaboración propia.



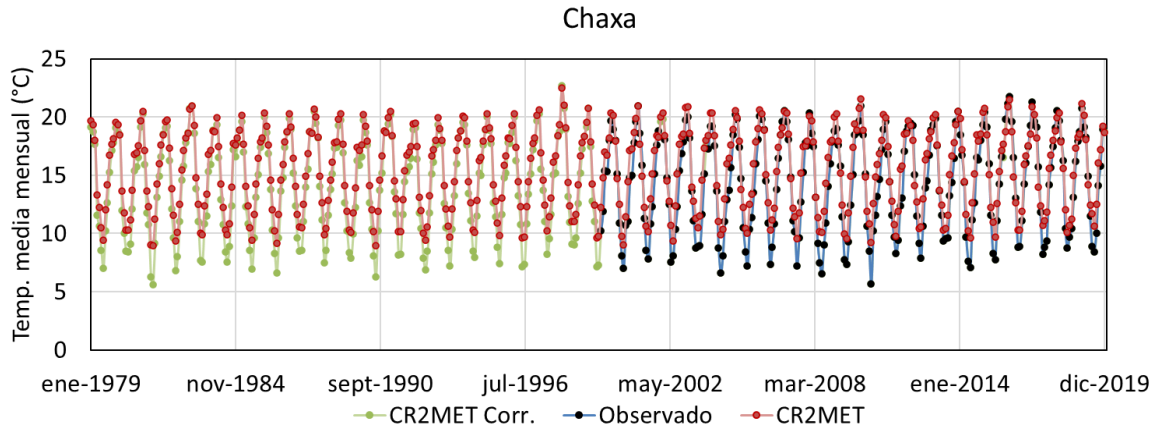
Fuente: Elaborado por SQM.

En el

Anexo 5 se presenta una comparación de la serie mensual escalada (puntos rojos) y los valores mensuales observados (puntos negros), donde la Figura 4-166 y Figura 4-167 corresponden a un ejemplo. Al observar las figuras se aprecia que el producto se ajusta bien a la información registrada en la mayoría de las estaciones, a excepción de El Tatio, la que además muestra un comportamiento errático respecto a las otras estaciones. Por lo tanto, se decidió no utilizarla para las proyecciones.

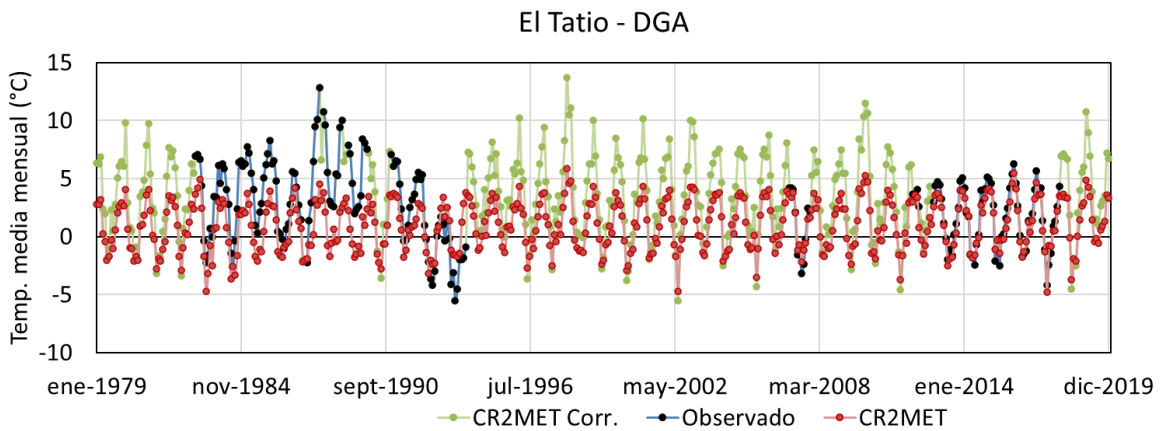
Para mejorar el ajuste de los valores CR2MET escalados con respecto a lo observado en cada estación se aplica la corrección de sesgo denominada *Quantile Delta Mapping* (Cannon et al., 2015), la cual será detallada en la sección 4.3.8.4.3. Los valores corregidos en aquellos meses con los cuales no se cuenta registro son los utilizados para rellenar las estaciones. Dado que, el producto CR2MET cuenta con información únicamente para el periodo 1979 – 2019, este es el periodo por rellenar.

Figura 4-166. Temperatura media mensual de valores observados (negro), datos escalados espacialmente desde CR2MET (rojo) y posteriormente corregidos a través de QDM (verde) en estación Chaxa, periodo 1979 - 2019.



Fuente: Elaborado por SQM.

Figura 4-167. Temperatura media mensual de valores observados (negro), datos escalados espacialmente desde CR2MET (rojo) y posteriormente corregidos a través de QDM (verde) en estación El Tatio, periodo 1979 - 2019.



Fuente: Elaborado por SQM.

4.3.8.4.3 Escalamiento estadístico

Debido a que los modelos de circulación general entregan información a nivel de cientos de kilómetros (100 - 420 km aproximadamente de acuerdo con Tabla 4-65), se debe realizar un escalamiento espacial para llevar los datos de la grilla de cada GCM a las estaciones meteorológicas seleccionadas en la sección



4.3.8.4.2. Además, dada la transferencia de información desde la escala global<sup>16</sup> a la escala local<sup>17</sup> se debe realizar una corrección de sesgo con el fin de ajustar las simulaciones de los modelos climáticos a las observaciones en las estaciones meteorológicas, y cuya relación es utilizada para corregir también las magnitudes de las proyecciones.

En este caso se realiza el escalamiento mediante el método inverso a la distancia, utilizando la información de los cuatro nodos más cercanos a las estaciones meteorológicas seleccionadas y, además, el escalamiento a cada uno de los cuatro píxeles más cercanos por separado. Lo anterior se justifica en otros estudios (Ricchetti, 2018 y Salazar, 2017), cuyo trabajo demuestra mejores ajustes en nodos que no necesariamente corresponden al de menor distancia espacial. El objetivo de esto consiste en escoger el tipo de escalamiento espacial que mejor se ajusta en cada estación meteorológica y GCM, al comparar los valores simulados y observados para un periodo en común (ver sección 4.3.8.4.4 para más detalle).

A modo de ejemplo, en la Figura 4-168 se muestran que, para la estación meteorológica ubicada más al norte (círculo rojo), el escalamiento espacial del primer nodo más cercano corresponde a la información en el píxel 1, en el caso del escalamiento espacial del segundo nodo más cercano corresponde a los datos extraídos del píxel 2 y así sucesivamente. Mientras que, el escalamiento del inverso a la distancia para esta estación utiliza la ponderación de esos 4 nodos más cercanos. En el Anexo 6 se presentan los píxeles que fueron utilizados en cada modelo para obtener la información necesaria (precipitación y temperatura media) en las estaciones meteorológicas seleccionadas, donde se puede apreciar además que la resolución espacial depende del modelo GCM con el que se esté trabajando.

La fórmula del método inverso a la distancia incluye la variable meteorológica en la estación de interés ( $X$ ), la variable meteorológica en el punto  $i$  de la grilla del GCM ( $X_i$ ) y la distancia entre la estación meteorológica de interés y el nodo  $i$  de la grilla del GCM ( $d_i$ ), como se observa a continuación:

$$X = \frac{\sum \frac{X_i}{d_i}}{\sum \frac{1}{d_i}}$$

Para la corrección de sesgo se aplicó el método *Quantile Delta Mapping* (QDM, Cannon et al., 2015) a nivel trimestral (enero – marzo, abril – junio, julio – septiembre, octubre – diciembre). Esto se realiza para respetar la estacionalidad observada en cada estación meteorológica.

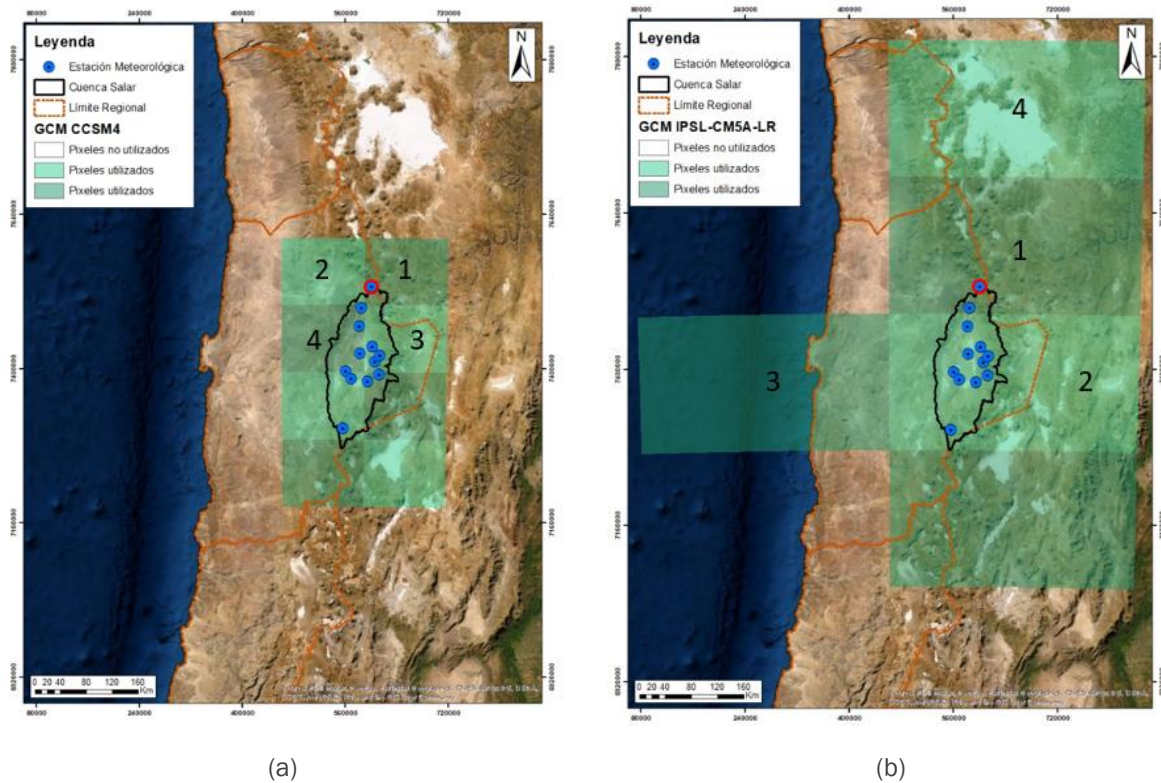
---

<sup>16</sup> Se refiere a la resolución espacial original del GCM utilizado.

<sup>17</sup> Referente a la resolución espacial de las estaciones meteorológicas.



Figura 4-168. Ejemplo de la resolución espacial y los pixeles considerados para el escalamiento en todas las estaciones meteorológicas. Modelos CCSM4 (a) y IPSL-CM5A-LR (b).



Fuente: Elaborado por SQM.

La utilización de esta metodología implicó, en primer lugar, obtener la curva de probabilidad acumulada de los valores mensuales observados ( $oh$ ) y simulados por los GCMs ( $mh$ ) durante el periodo histórico. Para el caso de las precipitaciones se consideró el periodo 1975 – 2005, mientras que para la temperatura media se utilizó el periodo 1979 – 2005. Cabe destacar que tal como se mencionó en la sección 4.3.8.4.2, la temperatura media no cuenta con datos en los años anteriores a 1979, sin embargo, 26 años de información permite representar de buena forma el comportamiento de esta variable en el largo plazo.

La corrección de los valores modelados históricos ( $mh$ ) se realiza usando las funciones de probabilidad inversa  $F^{-1}$  como se muestra en la siguiente ecuación, donde  $\hat{X}_{mh}$  representa el valor corregido de  $X_{mh}$ . Esto es equivalente a que para cada probabilidad  $p$  el valor  $X_{mh}$  obtenido mediante la función inversa  $F_{mh}^{-1}$  se corrija por el valor  $X_{oh}$ . Gráficamente, se debe hacer calzar la curva azul con la curva negra  $F_{oh}$  (Figura 4-169).

$$\hat{X}_{mh} = F_{oh}^{-1}(F_{mh}(X_{mh}))$$

Una vez corregido el tramo histórico, se divide el periodo futuro (2006 – 2100) en la misma cantidad de años consideradas en el periodo histórico respectivo. Para cada tramo futuro se obtiene la curva de probabilidad

acumulada ( $mp$ ). Luego, se corrige el intervalo futuro, cuyo procedimiento depende de la variable meteorológica a tratar. En el caso de la precipitación se mantiene la variación porcentual entre el valor histórico modelado y el simulado a futuro como se muestra en las siguientes fórmulas.

$$\hat{X}_{mp} = X_{oh} \cdot \frac{X_{mp}}{X_{mh}}$$

$$\hat{X}_{mp} = F_{oh}^{-1} \left( F_{mp}(X_{mp}) \right) \cdot \frac{X_{mp}}{F_{mh}^{-1} \left( F_{mp}(X_{mp}) \right)}$$

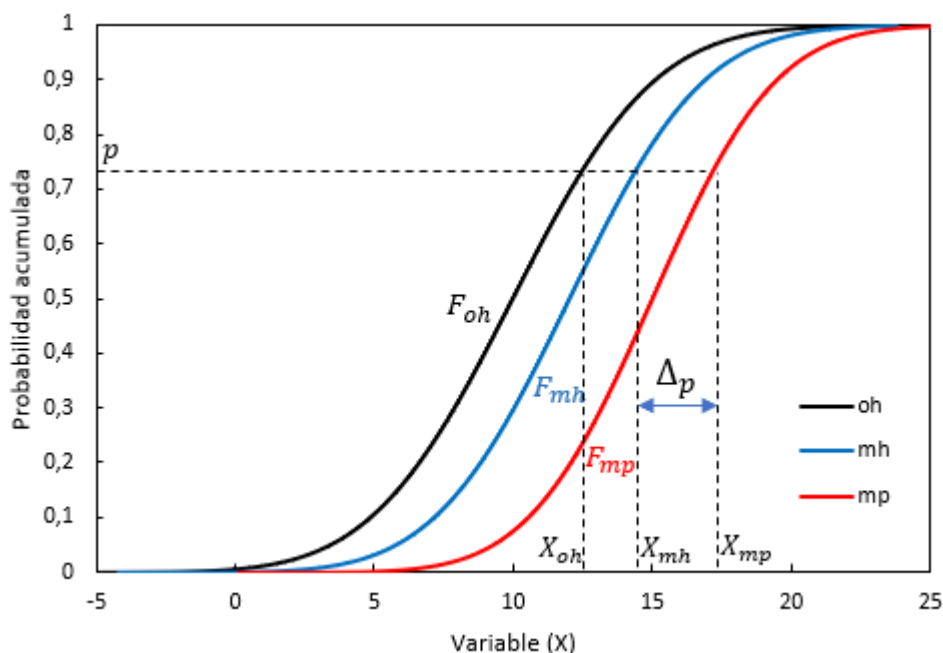
Por su parte, la temperatura media se corrige manteniendo la variación directa entre el periodo histórico y el proyectado ( $\Delta_p$ )

$$\hat{X}_{mp} = X_{oh} + \Delta_p$$

$$\hat{X}_{mp} = X_{oh} + X_{mp} - X_{mh}$$

$$\hat{X}_{mp} = F_{oh}^{-1} \left( F_{mp}(X_{mp}) \right) + X_{mp} - F_{mh}^{-1} \left( F_{mp}(X_{mp}) \right)$$

Figura 4-169: Representación del método QDM.



Fuente: Modificado de Cannon et al., 2015.

#### 4.3.8.4.4 Selección de los modelos de circulación general

Dado que no todos los modelos de circulación general (GCMs) representan la climatología termo-pluviométrica del área de estudio, se realiza la selección de éstos para reducir, en parte, la incertidumbre asociada a las proyecciones de los modelos climáticos. Para ello, se comparan los datos observados y los estimados por cada uno de los 12 GCMs en estudio (luego del escalamiento espacial y previo a la corrección de sesgo), para el periodo histórico, mediante la aplicación de varios criterios: análisis de tendencia anual, correlación anual, estacionalidad y variación mensual (Ricchetti, 2018; Salazar, 2017; Huichaquelén, 2017; Eridanus, 2016). El resultado consistió en la preselección de 8 modelos.

Posteriormente, se realiza la selección de 4 modelos al analizar aquellos GCMs que mejor se ajustan a la información observada luego de aplicar la corrección de sesgo. Lo anterior se lleva a cabo comparando las curvas de duración y curvas de variación estacional (CVE).

##### 4.3.8.4.4.1 Criterios de selección de GCMs

A continuación, se muestran los criterios utilizados para elegir el modelo de circulación general, en los cuales se utilizaron las series de precipitación y temperatura a nivel mensual y anual (dependiendo del caso). Cabe destacar que estos análisis se realizaron considerando las series obtenidas de los diferentes tipos de escalamiento mencionados en la sección 4.3.8.4.3.

##### 4.3.8.4.4.1.1 Criterio A: Tendencia Anual

Se obtiene la información anual para cada modelo climático en cada estación seleccionada y se compara con los datos anuales observados en dichas estaciones. El modelo aprueba este criterio si tanto los valores

anuales simulados como observados cuentan con la misma pendiente, ya sea positiva o negativa (Salazar, 2017).

En la Figura 4-170 se muestra un ejemplo de la precipitación anual conseguida en cada modelo climático mediante escalamiento espacial del primer nodo más cercano en la estación KCL (sin corrección de sesgo), valores anuales observados en dicha estación y sus respectivas tendencias. También es posible observar que los modelos presentados en la Tabla 4-70 tienen la misma pendiente negativa observada en la estación; por lo tanto, dichos modelos aprueban este criterio. Es relevante mencionar que este resultado dependerá del tipo de escalamiento espacial estudiado.

**Tabla 4-70. Ejemplo de modelos climáticos que aprueban criterio de tendencia anual para la variable precipitación en estación KCL, asociado a tipo de escalamiento espacial del primer nodo más cercano.**

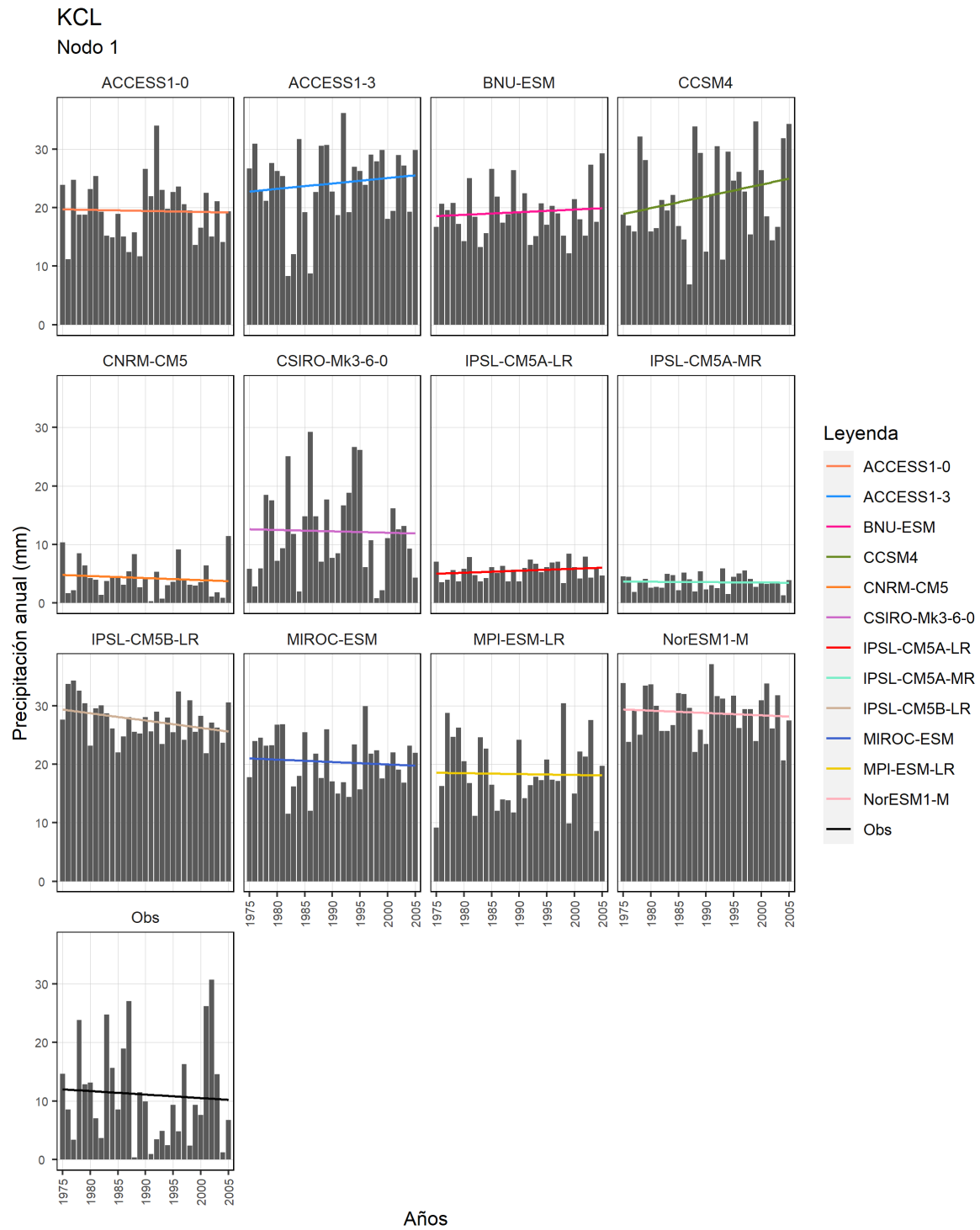
GCMs			
ACCESS1-0	CSIRO-Mk3-6-0	IPSL-CM5B-LR	MPI-ESM-LR
CNRM-CM5	IPSL-CM5A-MR	MIROC-ESM	NorESM1-M

*Fuente: Elaborado por SQM.*

En la Figura 4-171, por su parte, se aprecia la temperatura media anual obtenida en cada modelo a través del escalamiento espacial del primer nodo más cercano en la estación KCL (sin corrección de sesgo), valores anuales observados en dicha estación y sus respectivas tendencias. En este caso, todos los modelos muestran la misma pendiente positiva, como se visualiza en la estación.

En el Anexo 7 se presentan las precipitaciones anuales y temperaturas medias anuales con sus respectivas tendencias para cada modelo, registro observado en cada estación y tipo de escalamiento espacial.

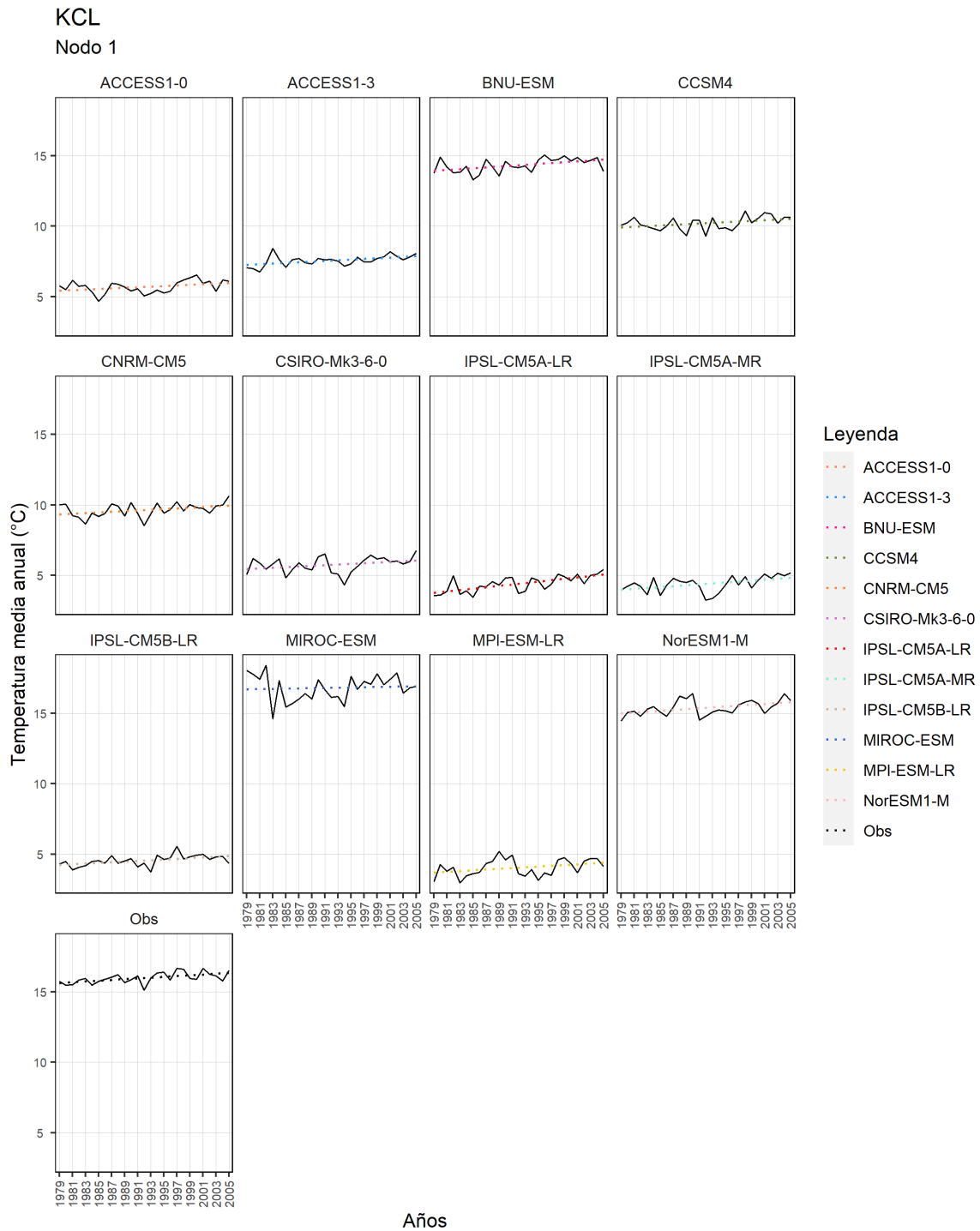
Figura 4-170. Ejemplo de precipitación anual y tendencia de GCMs (utilizando escalamiento espacial de primer nodo más cercano) y datos observados en estación KCL. Periodo 1975 - 2005.



Fuente: Elaborado por SQM..



Figura 4-171. Ejemplo de temperatura media anual y tendencia de GCMs (utilizando escalamiento espacial de primer nodo más cercano) y datos observados en estación KCL. Periodo 1979 - 2005



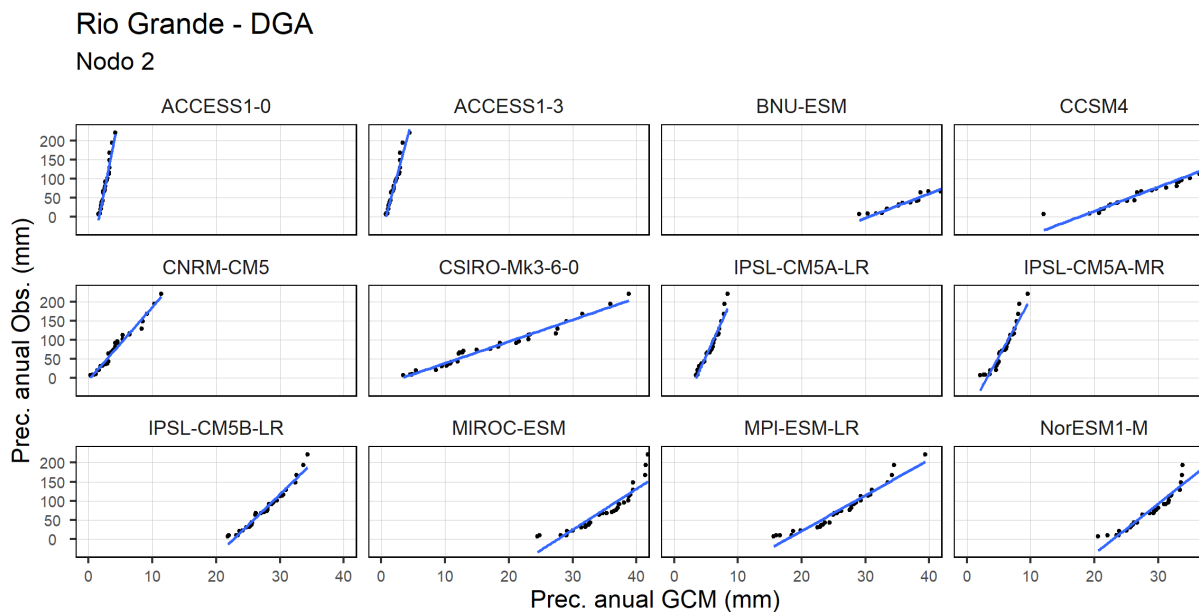
Fuente: Elaborado por SQM..

4.3.8.4.4.1.2 Criterio B: Correlación Anual

Este criterio consiste en la correlación que existe entre la curva de duración anual<sup>18</sup> de las variables simuladas por cada GCM en cada estación meteorológica seleccionada y la información observada en dichas estaciones, obteniendo el coeficiente de correlación R<sup>2</sup>. El menor valor de este coeficiente para la precipitación (considerando todas las estaciones seleccionadas, GCMs y tipos de escalamientos) es igual a 0,61. Por su parte, en el caso de la temperatura media, el mínimo R<sup>2</sup> es 0,65. Dado que, estos coeficientes presentan valores aceptables, todos los modelos son aprobados según este criterio.

En la Figura 4-172 y Figura 4-173 se muestra un ejemplo de cada variable estudiada, cuyo escalamiento espacial corresponde al segundo nodo más cercano. Mientras que, en el Anexo 6, se presentan las tablas con los valores de R<sup>2</sup> y figuras respectivas para cada estación y tipo de escalamiento espacial.

Figura 4-172. Ejemplo de relación entre precipitación anual observada y modelada por GCMs (utilizando escalamiento espacial de segundo nodo más cercano) en estación Rio Grande (DGA). Periodo 1975 - 2005

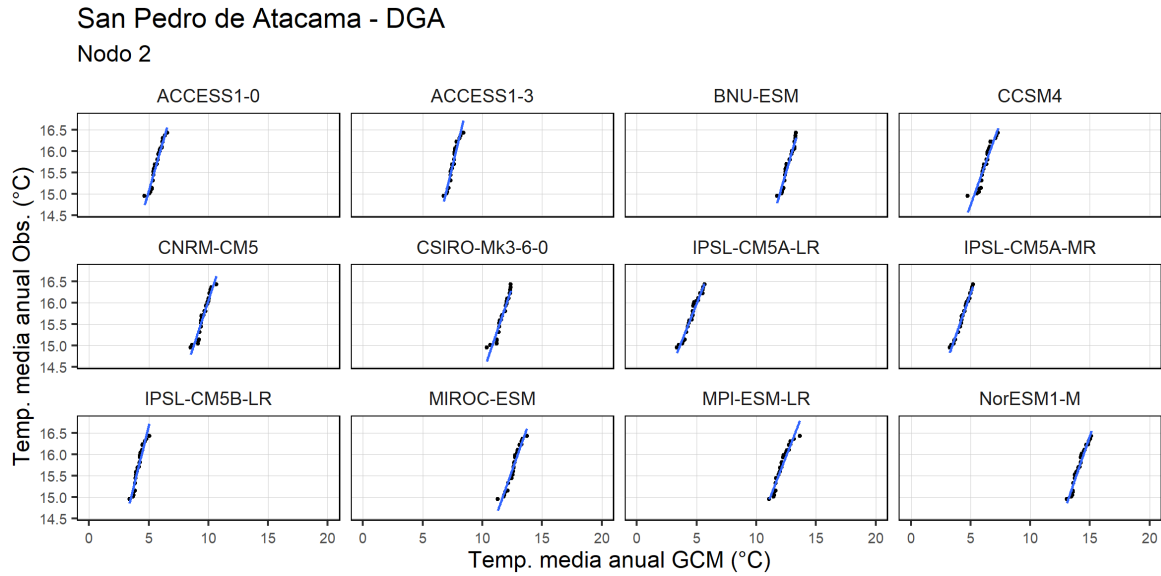


Fuente: Elaborado por SQM.

<sup>18</sup> La estimación de la curva de duración anual consiste en ordenar las magnitudes anuales de menor a mayor, asociándoles una probabilidad de excedencia de 0 a 1. El término de probabilidad de excedencia consiste en la probabilidad que tiene cierto evento (en este caso cierta magnitud de precipitación o temperatura media) de ser igualado o excedido.

Figura 4-173. Ejemplo de relación entre temperatura media anual observada y modelada por GCMs (utilizando escalamiento espacial de segundo nodo más cercano) en estación San Pedro de Atacama (DGA).

Periodo 1979 - 2005



Fuente: Elaborado por SQM.

4.3.8.4.4.1.3 Criterio C: Estacionalidad

La representatividad estacional que los modelos presentan en las estaciones seleccionadas se evalúa al comparar los coeficientes de Pardé simulados y observados, los cuales son adimensionales y, por tanto, permiten la visualización más rigurosa de la forma de la curva estacional.

El coeficiente de Pardé asociado a la precipitación ( $R_i$ ) corresponde a la proporción de precipitación promedio mensual ( $PP_i$ ), respecto a la precipitación promedio anual ( $PP_{anual}$ ), como se observa en la siguiente expresión.

$$R_i = \frac{PP_i}{PP_{anual}}$$

Donde  $PP_i$  es la precipitación promedio mensual del mes  $i$  y  $PP_{anual}$  es la precipitación promedio anual observada. Por su parte, el coeficiente de Pardé asociado a la temperatura media ( $D_i$ ) se obtuvo al estimar el cociente entre la desviación de temperatura media mensual promedio ( $T_i$ ), respecto a la temperatura media anual promedio ( $T_{anual}$ ), y la temperatura media anual promedio ( $T_{anual}$ ).

$$D_i = \frac{(T_i - T_{anual})}{T_{anual}}$$

Donde  $T_i$  es la temperatura media mensual promedio del mes  $i$  y  $T_{anual}$  la temperatura media anual promedio.

Con lo anterior, se obtienen 12 valores para cada GCM y 12 para las variables observadas en las estaciones elegidas, los cuales son contrastados (como se muestra a modo de ejemplo en la Figura 4-174 y Figura 4-175).

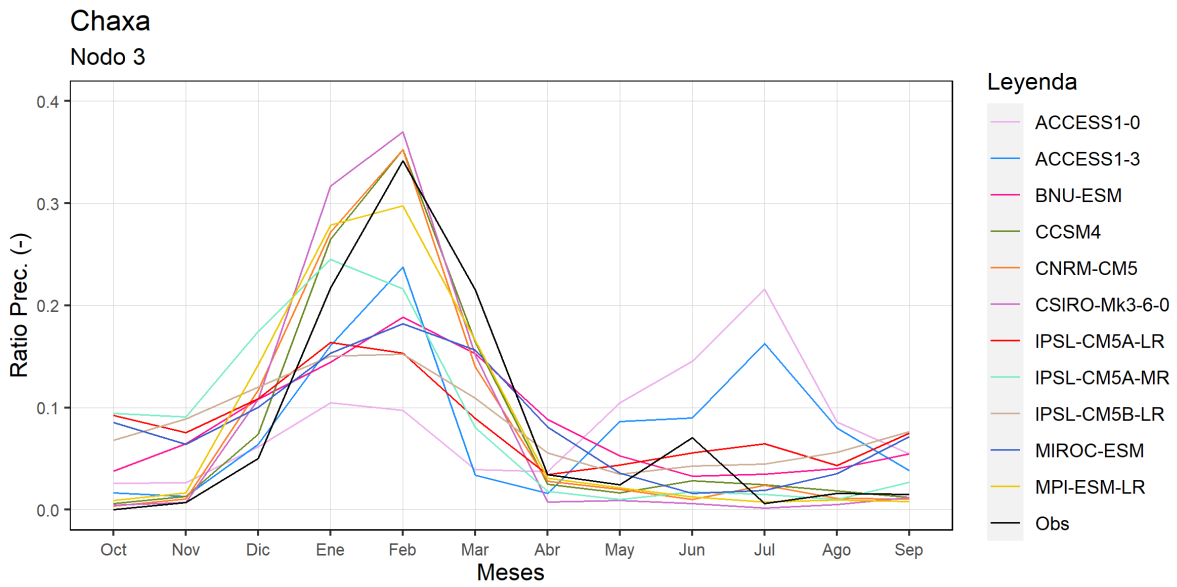
Los modelos pasan este criterio si presentan un comportamiento estacional similar. En particular, un modelo pasa el criterio si alguno de los dos meses con máximos valores coincide con el máximo mensual observado en la estación correspondiente, en el caso de la precipitación. Para la temperatura media se debe cumplir tanto que alguno de los dos meses con máximos valores coincida con el máximo mensual observado en la estación, y si alguno de los dos meses con mínimos valores coincide con el mínimo mensual observado. Este criterio es levemente más flexible para las precipitaciones debido a que la representatividad de los modelos para esta variable es más compleja.

En la Figura 4-174, se puede apreciar por ejemplo que el modelo ACCESS1-0 (línea rosada) indica que, para la estación Chaxa los meses con máxima precipitación corresponden a junio y julio, a diferencia de lo observado en dicha estación (línea negra), cuyos máximos ocurren en enero y febrero. Por lo tanto, en este caso el modelo ACCESS1-0 no es aceptado por este criterio.

En el caso de la Figura 4-175, es evidente que el modelo CNRM-CM5 (línea anaranjada) tiene un comportamiento diferente a lo que se visualiza en la estación Chaxa (línea negra). Por otra parte, la información registrada en esta estación indica que los valores máximos ocurren en enero y febrero mientras el modelo MPI-ESM-LR señala que los meses con valores máximos se presentan en noviembre y diciembre.

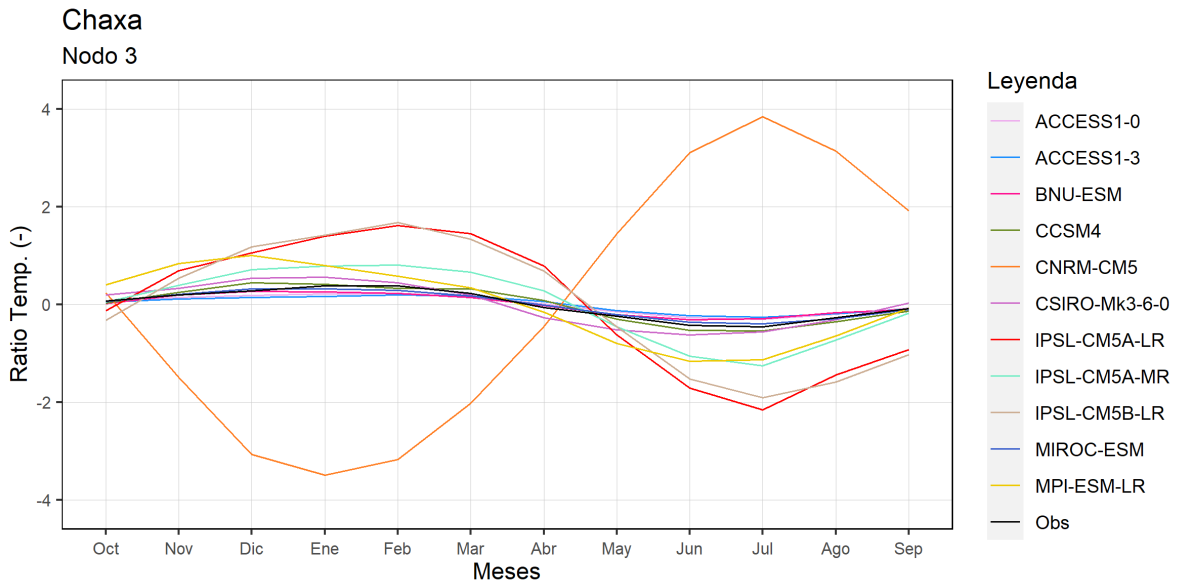
En el Anexo 9 se muestran las curvas de variación estacional para todas las estaciones, modelos climáticos y tipos de escalamiento espacial.

Figura 4-174. Ejemplo de coeficientes de Pardé de GCMs (utilizando escalamiento espacial de tercer nodo más cercano) y datos observados de precipitación en estación Chaxa. Periodo 1975 - 2005



Fuente: Elaborado por SQM.

Figura 4-175. Ejemplo de coeficientes de Pardé de GCMs (utilizando escalamiento espacial de tercer nodo más cercano) y datos observados de temperatura media en estación Chaxa. Periodo 1979 - 2005.



Fuente: Elaborado por SQM.

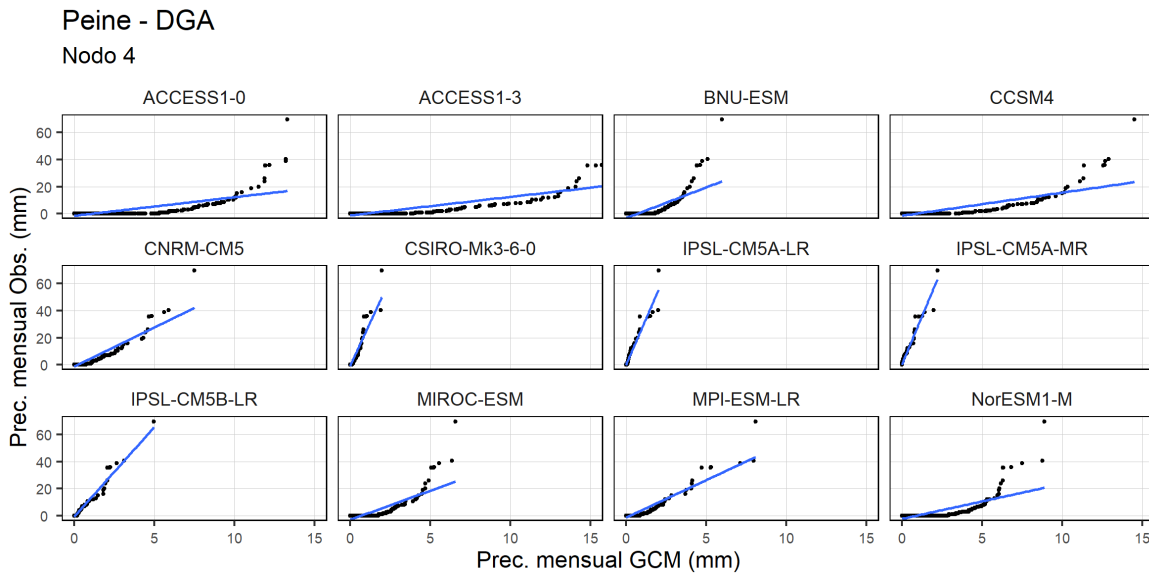


4.3.8.4.4.1.4 Criterio D: Variabilidad

En este análisis se observa la correlación existente entre la curva de duración a nivel mensual<sup>19</sup> entre cada modelo de circulación general y los datos observados en las estaciones escogidas. En cada caso se estima el coeficiente R<sup>2</sup> y se aprueban aquellos modelos cuyo valor es mayor a 0,5.

En la Figura 4-176 y Figura 4-177 se muestra un ejemplo de dicha relación para ambas variables analizadas en estación Peine, incluyendo los 12 modelos en estudio. En ambas figuras es evidente que la temperatura media presenta una mejor relación de variabilidad mensual entre valores simulados y observados que la precipitación.

Figura 4-176. Ejemplo de correlación de las curvas de duración de las precipitaciones mensuales observadas en estación Peine (DGA) y escaladas por cada GCM en la misma estación (utilizando escalamiento espacial de cuarto nodo más cercano). Periodo 1975 - 2005



Al considerar todas las estaciones, modelos climáticos, y tipos de escalamiento espacial en estudio se estima que para el caso de la precipitación el R<sup>2</sup> oscila entre 0,33 y 0,99. Por su parte, la temperatura media muestra que el mínimo valor de este coeficiente es 0,92. En conclusión, algunos modelos no pasan este criterio debido a las estimaciones realizadas en la variable precipitación.

Todos los resultados del coeficiente R<sup>2</sup> y figuras se presentan en el Anexo 10.

<sup>19</sup> La estimación de la curva de duración mensual consiste en ordenar las magnitudes mensuales de menor a mayor, asociándoles una probabilidad de excedencia de 0 a 1. El término de probabilidad de excedencia consiste en la probabilidad que tiene cierto evento (en este caso cierta magnitud de precipitación o temperatura media) de ser igualado o excedido.

Figura 4-176. Ejemplo de correlación de las curvas de duración de las precipitaciones mensuales observadas en estación Peine (DGA) y escaladas por cada GCM en la misma estación (utilizando escalamiento espacial de cuarto nodo más cercano). Periodo 1975 - 2005

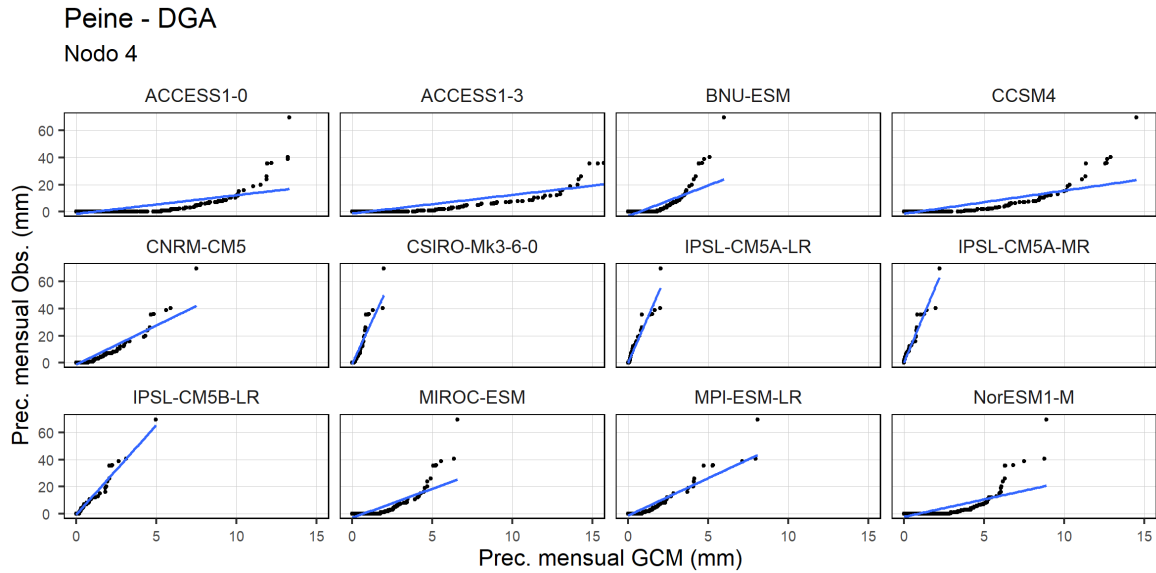
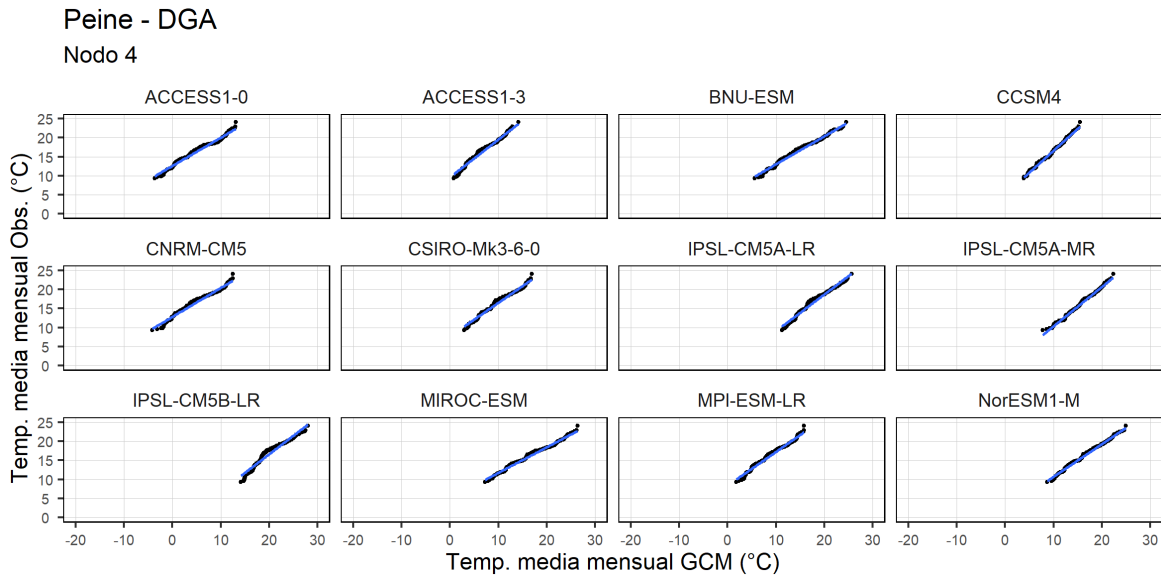


Figura 4-177. Ejemplo de correlación de las curvas de duración de las temperaturas medias mensuales observadas en estación Peine (DGA) y escaladas por cada GCM en la misma estación (utilizando escalamiento espacial de cuarto nodo más cercano). Periodo 1979 - 2005



4.3.8.4.5 Selección GCMs

Como se mencionó al principio de este capítulo, las comparaciones para el periodo histórico entre los valores simulados por cada GCM y observados en cada estación seleccionada considera las series obtenidas de cada escalamiento espacial, previo a la corrección de sesgo.

Para cada escalamiento espacial (inverso a la distancia, primer nodo más cercano, segundo nodo más cercano, tercer nodo más cercano y cuarto nodo más cercano) se generó una matriz binaria tanto para la variable precipitación como para la temperatura media, considerando cada criterio (tendencia anual, correlación anual, estacionalidad y variabilidad), tal como se muestra de ejemplo en la Tabla 4-71. En dicha tabla el valor 0 indica que el modelo en esa estación no aprueba el criterio, mientras que el valor 1 significa que si lo pasa.

Tabla 4-71. Ejemplo de matriz binaria resultante del criterio A para la variable precipitación (utilizando escalamiento espacial inverso a la distancia).

Estación Meteorológica	ACCESS1-0	ACCESS1-3	BNU-ESM	CCSM4	CNRM-CM5	CSIRO-Mk3-6-0	IPSL-CM5A-LR	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR	MIROC-ESM	MPI-ESM-LR	NorESM1-M
Camar - DGA	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
Chaxa	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1
El Tatio - DGA	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1
KCL	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1
Monturaqui - DGA	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1
Peine - DGA	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
Rio Grande - DGA	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
San Pedro de Atacama - DGA	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1
SCL	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0
Socaire - DGA	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
Talabre - DGA	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1
Toconao Experimental - DGA	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0

Fuente: Elaborado por SQM.

Posteriormente, se generó una matriz binaria resultante de los cuatro criterios explicados con anterioridad para cada variable y cada tipo de escalamiento espacial. En este caso, el valor 0 representa que dicho modelo en una estación particular no cumple alguno de los cuatro criterios.

Finalmente, el modelo queda seleccionado si cumple con todos los requisitos para el 50% + 1 de las estaciones en ambas variables, es decir, 7 estaciones en el caso de la precipitación y 5 en el caso de la temperatura. La Tabla

4-72 muestra un ejemplo de esto, donde según lo señalado anteriormente los modelos seleccionados, asociados al escalamiento de primer nodo más cercano, para la precipitación corresponden a ACCESS1-0, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, MIROC-ESM y MPI-ESM-LR. En el caso de la temperatura media (Tabla 4-73), todos los modelos son seleccionados para el escalamiento espacial de tercer nodo más cercano. Es importante destacar que, cada resultado depende del tipo de escalamiento espacial utilizado, cuyo detalle se muestra en la Tabla 4-74.

Tabla 4-72. Ejemplo de matriz binaria resultante de los 4 criterios para la variable precipitación (utilizando escalamiento espacial de primer nodo más cercano)

Estación Meteorológica	ACCESS1-0	ACCESS1-3	BNU-ESM	CCSM4	CNRM-CM5	CSIRO-Mk3-6-0	IPSL-CM5A-LR	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR	MIROC-ESM	MPI-ESM-LR	NorESM1-M
Camar - DGA	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
Chaxa	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1
El Tatio - DGA	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1
KCL	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
Monturaqui - DGA	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
Peine - DGA	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Rio Grande - DGA	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0
San Pedro de Atacama - DGA	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
SCL	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
Socaire - DGA	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1
Talabre - DGA	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1
Toconao Experimental - DGA	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
N° Seleccionados	7	4	3	4	8	7	4	5	2	8	7	6

Fuente: Elaborado por SQM.

Tabla 4-73. Ejemplo de matriz binaria resultante de los 4 criterios para la variable temperatura media (utilizando escalamiento espacial de tercer nodo más cercano).

Estación Meteorológica	ACCESS1-0	ACCESS1-3	BNU-ESM	CCSM4	CNRM-CM5	CSIRO-Mk3-6-0	IPSL-CM5A-LR	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR	MIROC-ESM	MPI-ESM-LR	NorESM1-M
Chaxa	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
KCL	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Monturaqui - DGA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Peine - DGA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0



Tabla 4-73. Ejemplo de matriz binaria resultante de los 4 criterios para la variable temperatura media (utilizando escalamiento espacial de tercer nodo más cercano).

Estación Meteorológica	ACCESS1-0	ACCESS1-3	BNU-ESM	CCSM4	CNRM-CM5	CSIRO-Mk3-6-0	IPSL-CM5A-LR	IPSL-CM5A-MR	IPSL-CM5B-LR	MIROC-ESM	MPI-ESM-LR	NorESM1-M
San Pedro de Atacama - DGA	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
Socaire - DGA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
SOP	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Toconao - DGAC	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
N° Seleccionados	8	8	8	8	5	8	8	8	8	8	5	5

Fuente: Elaborado por SQM.

Producto del análisis detallado anteriormente se seleccionan 8 modelos de 12 estudiados inicialmente: ACCESS1-0, ACCESS1-3, CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, IPSL-CM5A-MR, MIROC-ESM, MPI-ESM-LR y NorESM1-M, los que, a su vez, se asocian a un tipo de escalamiento espacial (Tabla 4-74).

Tabla 4-74. Resumen de modelos seleccionados asociados al tipo de escalamiento espacial. Fuente: Elaboración propia.

Modelo	Inv. a la distancia	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4
ACCESS1-0		X			
ACCESS1-3					X
CNRM-CM5	X			X	
CSIRO-Mk3-6-0	X	X			X
IPSL-CM5A-MR	X		X		
MIROC-ESM	X	X	X		X
MPI-ESM-LR		X		X	
NorESM1-M				X	X

Fuente: Elaborado por SQM.

El Anexo 11 muestra las matrices binarias generadas por cada criterio estudiado y el resultado de éstos.

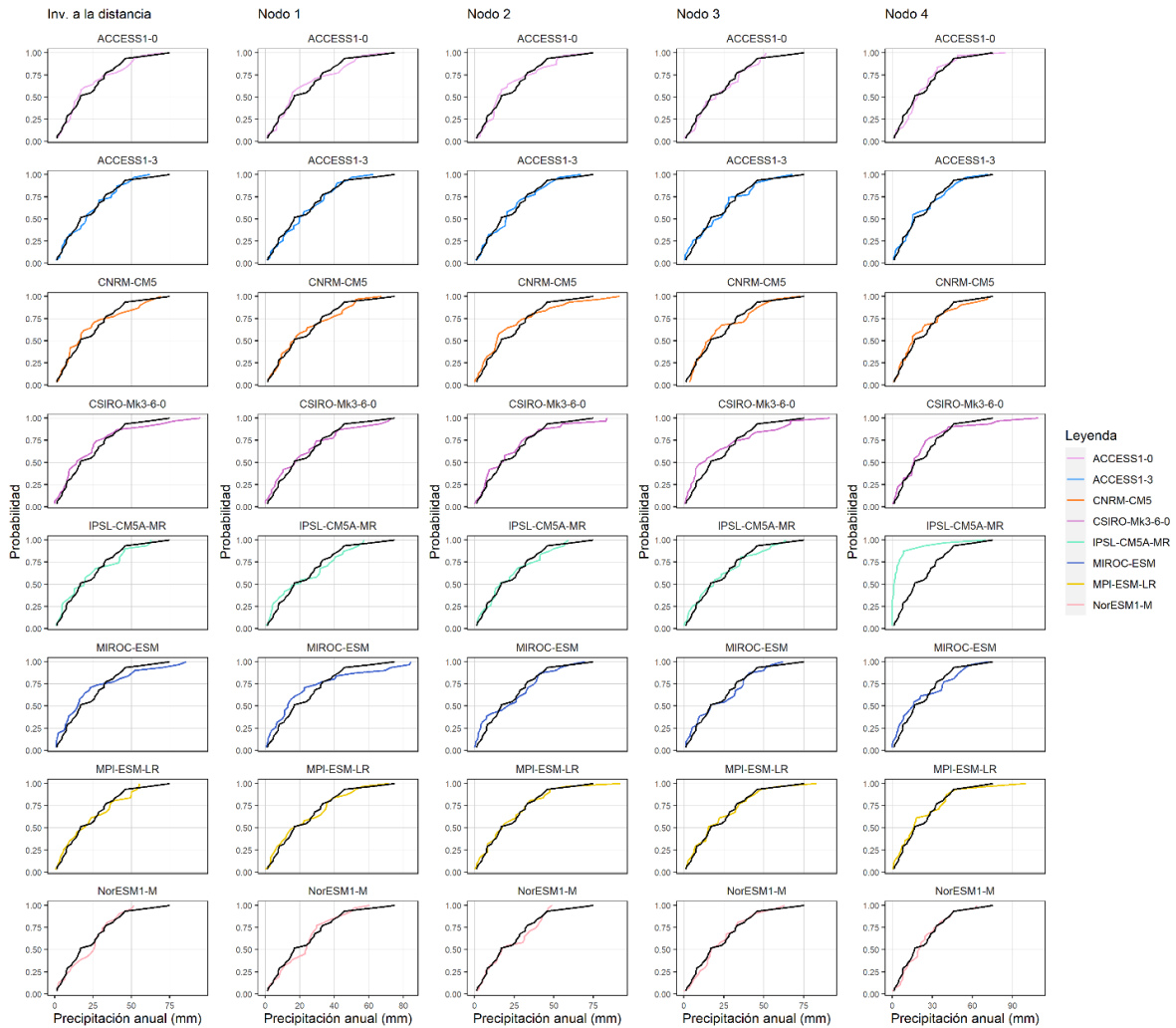
#### 4.3.8.4.6 Selección final de GCMs

Una vez realizada la selección, se aplica una corrección de sesgo a cada tipo de escalamiento espacial, estación y variable meteorológica, considerando los 8 modelos climáticos.

A modo de ejemplo, en la Figura 4-178, Figura 4-179, Figura 4-180 y Figura 4-181 se muestran las curvas de duración anual y variación estacional en la estación Chaxa. En ellas se observa que, a pesar de aplicar la misma metodología para corregir el sesgo entre lo estimado por el modelo climático y lo observado, las curvas de duración anual presentan en algunos casos una gran subestimación o sobrestimación de los valores mínimos y máximos anuales (Figura 4-178 y Figura 4-180). Por su parte, en la Figura 4-179 y Figura 4-181 se ve que para algunos modelos hay diferencias en el comportamiento estacional al comparar las curvas con lo observado.

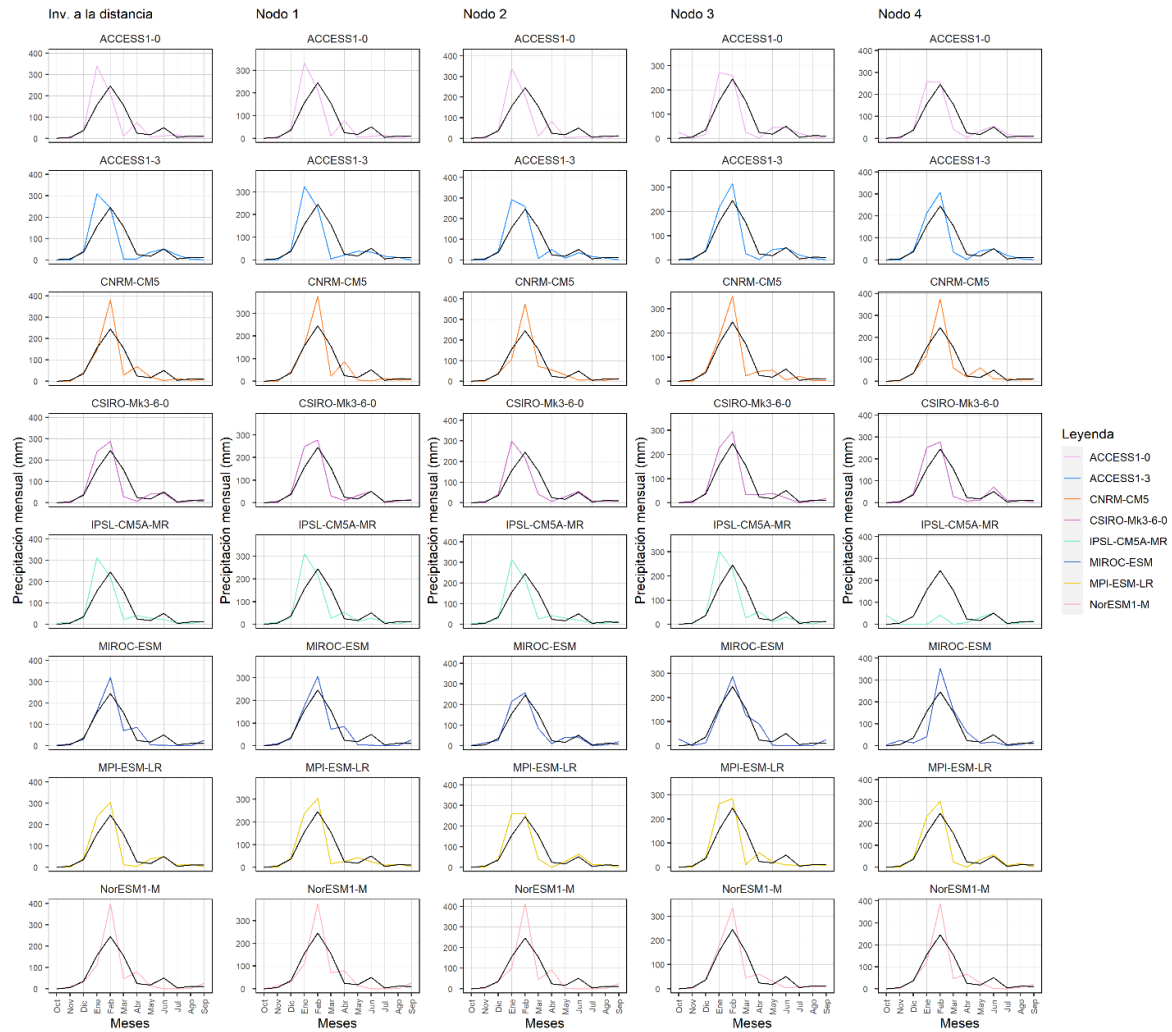
Por lo anterior, para cada tipo de escalamiento espacial seleccionado (Tabla 4-74) asociado a los GCMs seleccionados para cada estación meteorológica elegida se realiza: (i) la comparación de las curvas de duración anual, considerando los valores corregidos y lo observado en el periodo histórico; y (ii) la comparación de las curvas de variación estacional, considerando los valores corregidos y lo observado en el periodo histórico. Este análisis se realiza a nivel visual y utilizando los coeficientes R2 tanto de las curvas de duración anual como de las curvas de variación estacional.

Figura 4-178. Ejemplo de comparación entre la curva de duración anual de precipitación observada (línea negra) y valor corregido mediante QDM para cada GCM en estación Chaxa. Periodo 1975 – 2005



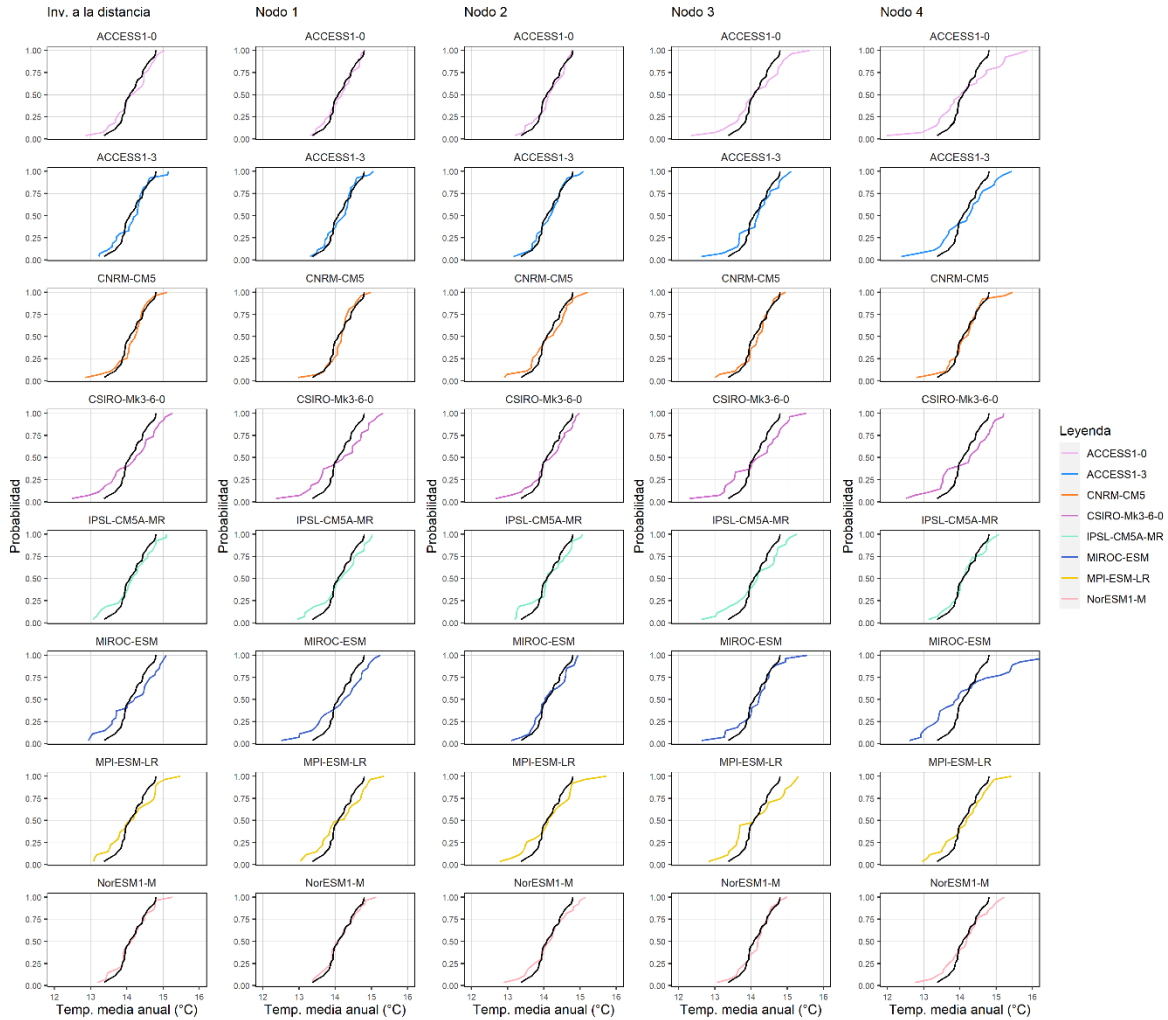
Fuente: Elaborado por SQM.

Figura 4-179. Ejemplo de comparación entre la curva de variación estacional de precipitación observada (línea negra) y valor corregido mediante QDM para cada GCM en estación Chaxa. Periodo 1975 – 2005



Fuente: Elaborado por SQM.

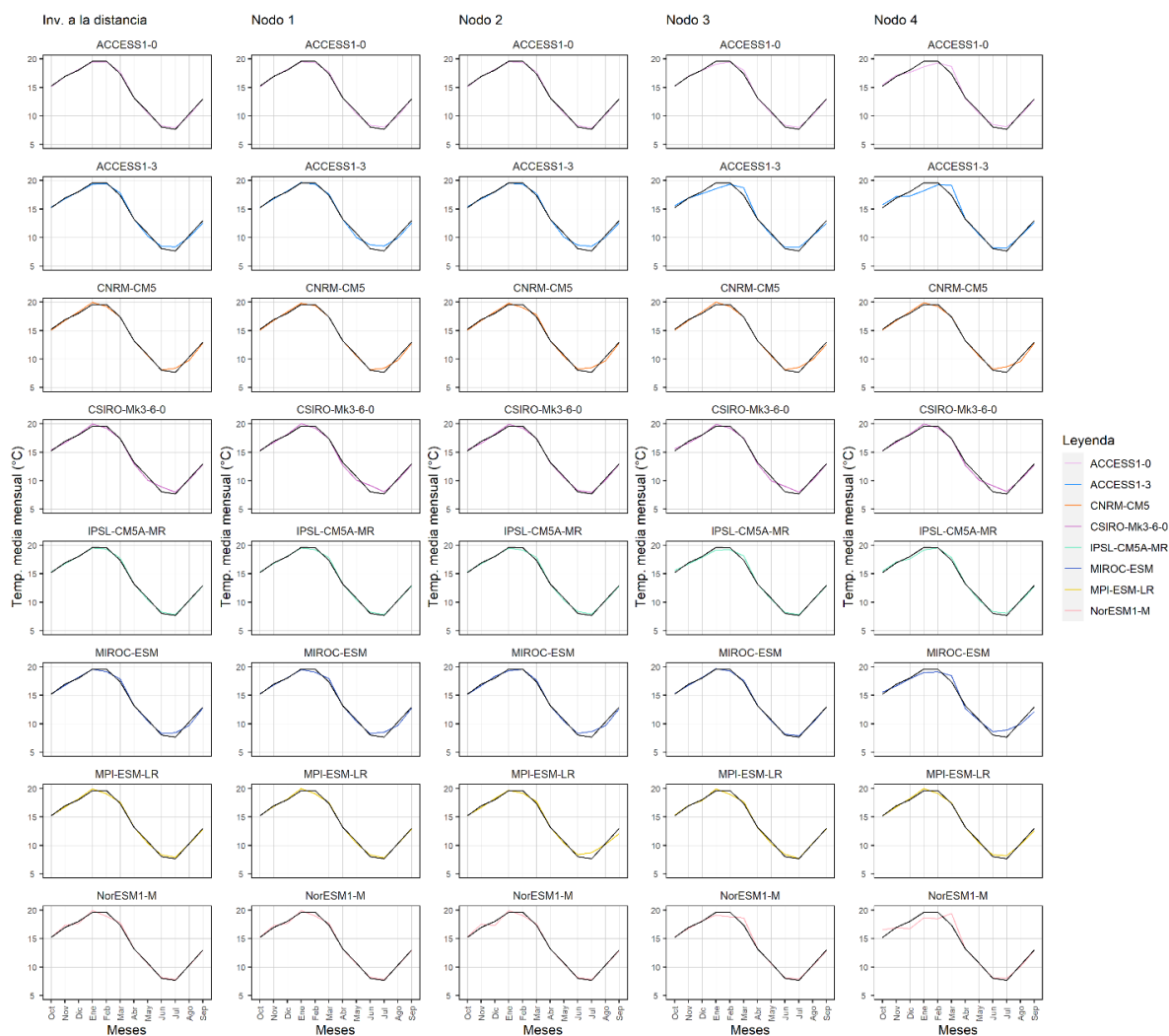
Figura 4-180. Ejemplo de comparación entre la curva de duración anual de temperatura media observada (línea negra) y valor corregido mediante QDM para cada GCM en estación Chaxa. Periodo 1979 – 2005



Fuente: Elaborado por SQM.



Figura 4-181. Ejemplo de comparación entre la curva de variación estacional de temperatura media observada (línea negra) y valor corregido mediante QDM para cada GCM en estación Chaxa. Periodo 1979 – 2005



Fuente: Elaborado por SQM.

En los casos donde los modelos cuentan con más de una opción de escalamiento espacial (mayoría de GCMs, excepto ACCESS1-0 y ACCESS1-3), se escoge el tipo de escalamiento espacial que mejor represente a los datos observados en cada estación estudiada. La prioridad para tomar esta decisión corresponde a la mayor precisión del mínimo y máximo valor anual, posteriormente el valor R<sup>2</sup> de la curva de duración anual y, finalmente, al coeficiente R<sup>2</sup> de la curva de variación estacional.

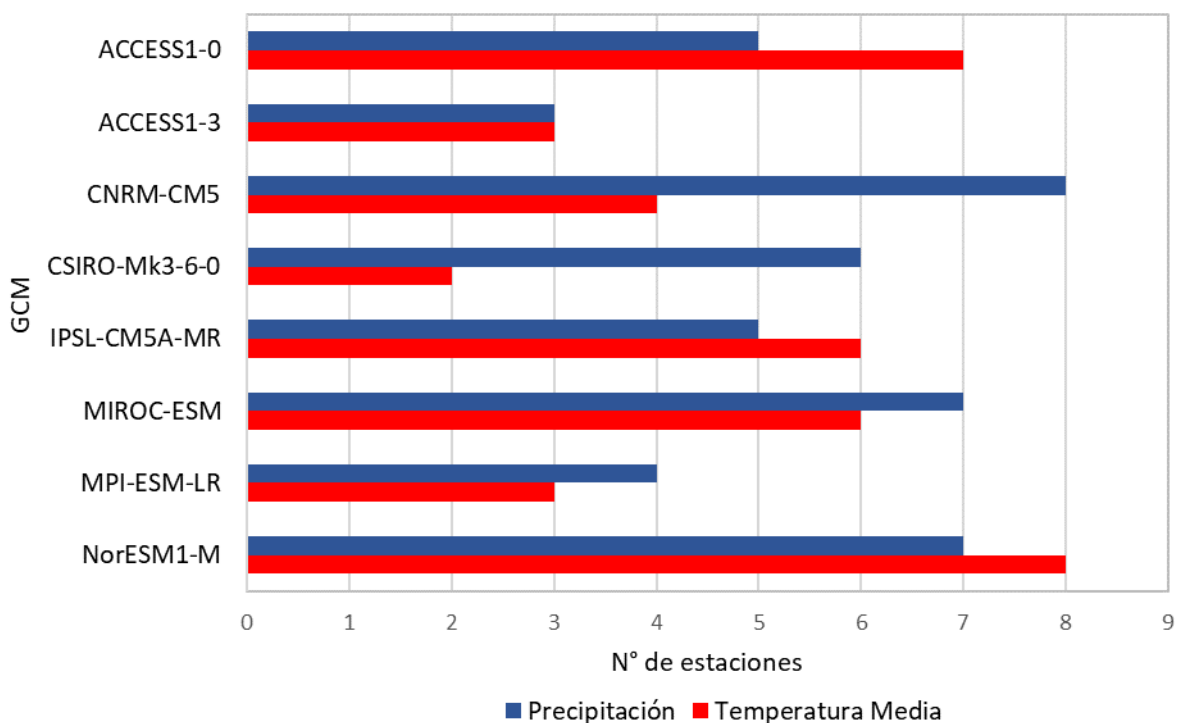
Sumado a lo anterior, la selección final considera aceptables aquellos modelos que presentan un R<sup>2</sup> superior a 0,5 para la curva de duración anual y curva de variación estacional, así como un buen ajuste o leve

subestimación/sobrestimación de los valores máximos y mínimos anuales. Esto se hizo para la variable precipitación y temperatura media.

En la Figura 4-182 se ve para cada modelo el número de estaciones que cumplieron con el criterio antes descrito. En el caso de la precipitación, el máximo número de estaciones por modelo aceptado es 8 de un total de 12 estaciones, correspondientes a CNRM-CM5, seguido del modelo MIROC-ESM y NorESM1-M (con 7 de 12 estaciones admitidas), seguido de CSIRO-Mk3-6-0 con 6 de 12 estaciones aprobadas.

Al observar los resultados asociados a la temperatura media, el máximo número de estaciones por modelo aceptado es 8 de un total de 8 estaciones, correspondientes a NorESM1-M; seguido de 7 de 8 estaciones en el caso de ACCESS1-0, continuando con 6 de 8 estaciones para los modelos IPSL-CM5A-LR y MIROC-ESM. Es importante destacar que, si bien la Figura 4-182 muestra que la mitad de los modelos no cuenta con un ajuste aceptable para la mayoría de las estaciones, los valores  $R^2$  de ambas curvas evaluadas para la temperatura media son superiores a 0,8 (Figura 4-180 y Figura 4-181).

Figura 4-182. Resumen de cantidad de estaciones para cada modelo que cumplen con un ajuste aceptable respecto a lo observado en el periodo histórico



Fuente Elaborado por SQM.

Como la precipitación es la variable más compleja de ser representada por los modelos de circulación general, la selección de los GCM radica principalmente en el ajuste que presentan los modelos con respecto a esta variable. Para posteriormente, evaluar el comportamiento de la temperatura. Por lo tanto, los GCMs

seleccionados corresponden a CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, MIROC-ESM y NorESM1-M, cuyo tipo de escalamiento espacial asociado se muestra en la Tabla 4-75 y Tabla 4-76.

Por otra parte, la Tabla 4-77 y Tabla 4-78 muestran los coeficientes R2 resultantes de la comparación entre los valores observados y simulados en los respectivos periodos históricos para la curva de duración anual y curvas de variación estacional. Los estadísticos son superiores a 0,9 en el caso de la curva de duración y mayores que 0,6 en la mayoría de las estaciones para las curvas de variación estacional, presentando un peor ajuste en algunos casos puntuales. Sin embargo, a nivel general, se tiene un buen desempeño.

Tabla 4-75. Resumen de tipo de escalamiento espacial escogido para cada estación pluviométrica y GCM seleccionado

Estación Meteorológica	CNRM-CM5	CSIRO-Mk3-6-0	MIROC-ESM	NorESM1-M
Camar - DGA	Nodo 3	Nodo 1	Nodo 4	Nodo 4
Chaxa	Nodo 3	Nodo 1	Nodo 4	Nodo 4
El Tatio - DGA	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 2	Nodo 4
KCL	Nodo 3	Nodo 1	Nodo 4	Nodo 4
Monturaqui - DGA	Nodo 3	Nodo 1	Inv. a la distancia	Nodo 4
Peine - DGA	Inv. a la distancia	Nodo 1	Nodo 4	Nodo 4
Rio Grande - DGA	Nodo 3	Nodo 1	Nodo 4	Nodo 4
San Pedro de Atacama - DGA	Inv. a la distancia	Nodo 1	Nodo 4	Nodo 3
SCL	Nodo 3	Nodo 1	Nodo 4	Nodo 3
Socaire - DGA	Inv. a la distancia	Nodo 1	Nodo 4	Nodo 4
Talabre - DGA	Inv. a la distancia	Nodo 1	Inv. a la distancia	Nodo 3
Toconao Experimental - DGA	Nodo 3	Inv. a la distancia	Nodo 2	Nodo 4

Fuente: Elaborado por SQM.

Tabla 4-76. Resumen de tipo de escalamiento espacial escogido para cada estación de temperatura media y GCM seleccionado

Estación Meteorológica	CNRM-CM5	CSIRO-Mk3-6-0	MIROC-ESM	NorESM1-M
Chaxa	Nodo 3	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3
KCL	Inv. a la distancia	Nodo 4	Nodo 2	Nodo 3
Monturaqui - DGA	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 2	Nodo 3
Peine - DGA	Nodo 3	Inv. a la distancia	Nodo 1	Nodo 3
San Pedro de Atacama - DGA	Nodo 3	Inv. a la distancia	Inv. a la distancia	Nodo 3
Socaire - DGA	Inv. a la distancia	Nodo 4	Nodo 4	Nodo 4

SOP	Inv. a la distancia	Nodo 4	Nodo 2	Nodo 4
Toconao - DGAC	Nodo 3	Inv. a la distancia	Nodo 1	Nodo 3

Fuente: Elaborado por SQM

Tabla 4-77. Coeficientes R<sup>2</sup> de las curvas de duración anual (CD) y curvas de variación estacional (CVE), asociado al tipo de escalamiento espacial escogido para cada estación pluviométrica y GCM seleccionado

Estación Meteorológica	CNRM-CM5		CSIRO-Mk3-6-0		MIROC-ESM		NorESM1-M	
	R <sup>2</sup> CD	R <sup>2</sup> CVE	R <sup>2</sup> CD	R <sup>2</sup> CVE	R <sup>2</sup> CD	R <sup>2</sup> CVE	R <sup>2</sup> CD	R <sup>2</sup> CVE
Camar - DGA	0,96	0,66	0,92	0,75	0,97	0,76	0,98	0,67
Chaxa	0,96	0,73	0,95	0,75	0,96	0,76	0,98	0,73
El Tatio - DGA	0,99	0,76	0,98	0,91	0,95	0,90	0,93	0,86
KCL	0,96	0,50	0,98	0,47	0,98	0,52	0,98	0,52
Monturaqui - DGA	0,97	0,55	0,93	0,81	0,94	0,77	0,96	0,83
Peine - DGA	0,96	0,42	0,96	0,40	0,98	0,39	0,99	0,57
Rio Grande - DGA	0,98	0,77	0,97	0,86	0,98	0,66	0,98	0,80
San Pedro de Atacama - DGA	0,97	0,68	0,98	0,77	0,96	0,79	0,97	0,78
SCL	0,98	0,16	0,97	0,14	0,98	0,17	0,94	0,11
Socaire - DGA	0,97	0,59	0,98	0,82	0,99	0,89	0,96	0,74
Talabre - DGA	0,98	0,66	0,98	0,85	0,96	0,80	0,98	0,76
Toconao Experimental - DGA	0,96	0,63	0,92	0,63	0,98	0,84	0,95	0,74

Fuente: Elaborado por SQM.

Tabla 4-78. Coeficientes R<sup>2</sup> de las curvas de duración anual (CD) y curvas de variación estacional (CVE), asociado al tipo de escalamiento espacial escogido para cada estación de temperatura media y GCM seleccionado

Estación Meteorológica	CNRM-CM5		CSIRO-Mk3-6-0		MIROC-ESM		NorESM1-M	
	R <sup>2</sup> CD	R <sup>2</sup> CVE	R <sup>2</sup> CD	R <sup>2</sup> CVE	R <sup>2</sup> CD	R <sup>2</sup> CVE	R <sup>2</sup> CD	R <sup>2</sup> CVE
Chaxa	0,93	0,99	0,96	0,99	0,99	0,99	0,95	0,99
KCL	0,93	0,99	0,87	1,00	0,97	0,99	0,97	1,00
Monturaqui - DGA	0,96	0,99	0,96	0,99	0,98	0,99	0,96	0,99
Peine - DGA	0,93	0,98	0,97	0,99	0,96	0,99	0,98	0,99
San Pedro de Atacama - DGA	0,89	0,99	0,93	0,99	0,97	0,99	0,92	0,99
Socaire - DGA	0,92	0,99	0,93	0,98	0,95	0,99	0,95	0,99
SOP	0,92	0,99	0,90	1,00	0,98	0,99	0,95	1,00
Toconao - DGAC	0,92	0,99	0,97	0,99	0,97	0,99	0,94	0,99

Fuente: Elaborado por SQM.



Adicionalmente, como se menciona en el estudio de Clark *et al.* (2016), es importante realizar un análisis de la incertidumbre asociada a cada etapa de estos trabajos (ver Figura 4-183), cuyo objetivo sea entregar un aporte íntegro y herramientas para quienes deben tomar decisiones informadas.

En primer lugar, la elección de un escenario de emisión (RCP8.5) se sustenta en que éste es más conservador al asociarse al mayor aumento de emisiones de gases efecto invernadero. Por otra parte, tal como se observa en la Figura 4-158 es el único escenario que sigue la tendencia histórica observada. Además de haber sido solicitado por la Autoridad en otros estudios similares.

Según la cascada de incertidumbre (Figura 4-183), la elección de los modelos climáticos, así como las condiciones iniciales incluidas en cada simulación tiene repercusiones en las proyecciones. Respecto a esto, la preselección de los 12 GCMs se basa en la buena representación de los fenómenos climáticos en Chile (DGA, 2017), como se mencionó en la sección 4.3.8.4. Por su parte, las fases de selección tienen por objetivo reproducir de mejor manera la climatología de la zona de estudio.

En relación con el tipo de escalamiento utilizado (estadístico), es necesario contar con una buena precisión en la reproducción de datos históricos (Her, *et al.*, 2019), lo que no es fácil de conseguir cuando no se cuenta con una red meteorológica robusta. Es por ello que, en este estudio se realizó un análisis robusto con el fin de escoger la metodología más adecuada en el relleno de datos. La serie de precipitación se completa utilizando 2 métodos, comparación con otros estudios y análisis de consistencia. En el caso de la temperatura media, la metodología utiliza el producto CR2MET, la cual fue desarrollada por expertos y es empleado en documentos oficiales (Vargas & Muñoz, 2020; Arriagada, 2019; DGA, 2017). Por otro lado, tal como se visualiza en los resultados (capítulo 4.3.8.4.2), en general, existe una buena correlación con los valores observados.

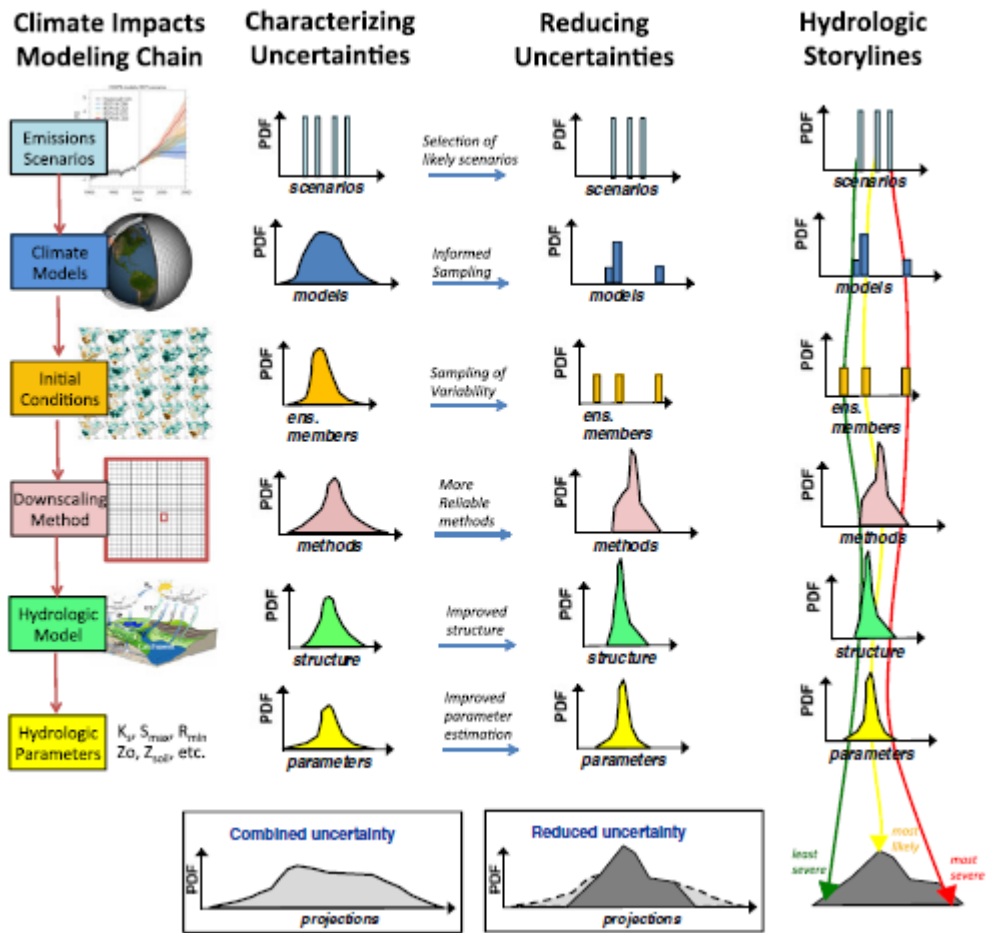
Agregado a lo anterior, se debe considerar que la ventaja de este tipo de escalamiento consiste en respetar los datos registrados en las estaciones meteorológicas disponibles, así como permitir la evaluación de varios GCMs, ya que otras metodologías requieren largos intervalos de tiempo para la obtención de la información de cada modelo en el área estudiada. Por otra parte, su desventaja radica en no incluir la topografía de la zona de estudio. No obstante, y considerando que el tipo de escalamiento espacial es parte de la incertidumbre de los resultados, se decidió evaluar más de una metodología con el fin de trabajar para cada caso aquella que obtenía los mejores ajustes durante el periodo histórico.

La elección del método para corregir el sesgo de los datos escalados espacialmente (provenientes de los GCMs) también influye en los valores proyectados. En este caso se decide utilizar el método QDM, ya que según Cannon *et al.* (2015) es la mejor forma de corregir las magnitudes, además corresponde a la misma técnica utilizada en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017). Complementando lo anterior, es fundamental comprender que la aplicación de QDM a nivel trimestral responde a una preocupación en representar la estacionalidad en la cuenca. Por otra parte, el seguimiento de los valores simulados posterior a esta corrección, indican que en la mayoría de las estaciones presenta un buen ajuste.

Finalmente, se debe tener en cuenta que según la investigación realizada por Her *et al.* (2019), el impacto de la incertidumbre en las proyecciones de precipitación y temperatura, en conjunto con el análisis hidrológico del cambio climático será mayor en una pequeña cuenca local, cuyas respuestas hidrológicas tienden a estar dominadas por la escorrentía directa. Por lo anterior, y en vista que el área trabajada corresponde a una amplia cuenca, además de no estar predominada por la escorrentía directa, se deduce que la incertidumbre asociada será menor.

En conclusión, todo proceso de modelación se asocia a un nivel de incertidumbre, el cual depende de las decisiones tomadas en cada etapa. Por lo tanto, la selección de GCMs y metodología utilizada en cada fase tuvo por objetivo la disminución de dicha incertidumbre.

Figura 4-183. Esquema sobre los enfoques para caracterizar de forma explícita y reducir la multitud de incertidumbres en las evaluaciones de los impactos hidrológicos del cambio climático y el desarrollo de historias hidrológicas cuantitativas representativas para aplicaciones específicas



Fuente: Clark et al., 2016.

#### 4.3.8.5 Resultados

Posterior a la selección de los cuatro modelos de circulación general para la zona de estudio y a la elección del tipo de escalamiento para cada estación meteorológica con base en los ajustes de las magnitudes anuales y estacionalidad, se realiza la corrección de sesgo por temporada para obtener las proyecciones de precipitación y temperatura a nivel mensual hasta el año 2100.

Para la estimación de la recarga proyectada se realiza un análisis con el fin de escoger entre los modelos con resultados similares, el más conservador, dejando fuera los *outliers*.

Finalmente, se estiman tanto las entradas como salidas al sistema hidrogeológico, considerando las condiciones promedio para cada década evaluada en el período futuro, como se detalla a continuación.

##### 4.3.8.5.1 Series de tiempo de precipitaciones y temperatura media

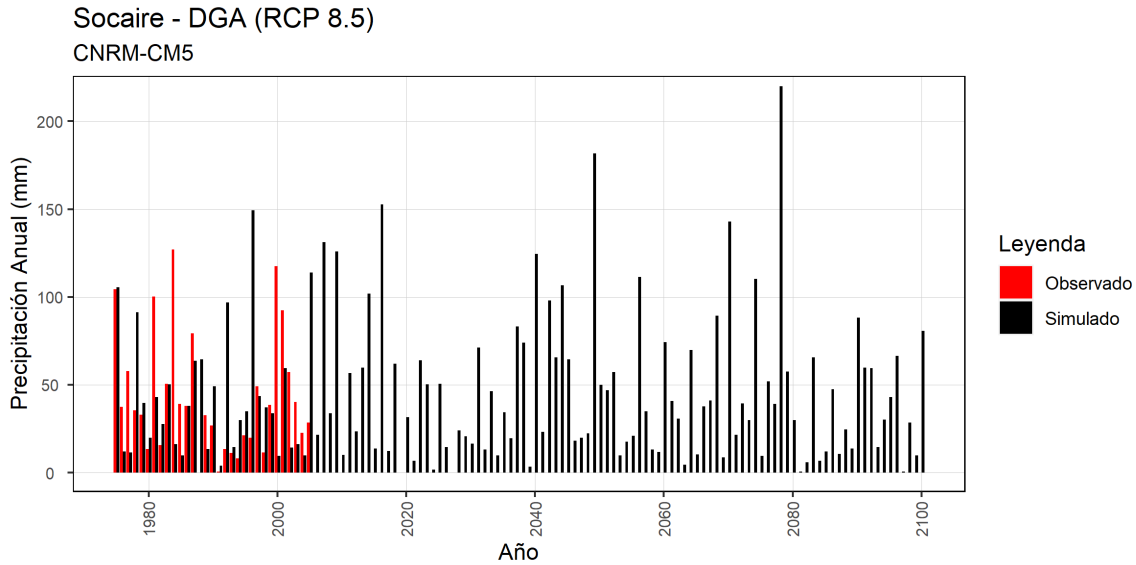
Se obtuvieron las series de precipitación y temperatura media. En general, las primeras muestran magnitudes dentro del rango histórico observado para la mayoría de los modelos, a excepción del CSIRO-Mk3-6-0 (Anexo 12). Mientras que las series de temperatura muestran respuestas muy similares, todas tendiendo al ascenso (Anexo 13).

A modo de ejemplo, en la Figura 4-184 y Figura 4-185 se muestran las series de precipitación anual en la estación Socaire, considerando los modelos climáticos CNRM-CM5 y MIROC-ESM. Es posible observar que, en el periodo histórico analizado (1975 – 2005), las magnitudes son similares entre lo observado y simulado, además de mostrar magnitudes máximas y mínimas similares entre las proyecciones (periodo 2021 – 2100) y los registros en dicha estación, con algunas excepciones. Como se ve en la Figura 4-184, el modelo CNRM-CM5 para la estación Socaire en el periodo 2021 - 2100 estima algunos valores anuales por sobre los máximos registrados históricamente, comportamiento que se homologa en las otras estaciones (Anexo 12).

Por su parte, al observar la temperatura media anual en la misma estación para los mismos modelos (Figura 4-186 y Figura 4-187), es posible apreciar que, para el periodo histórico (1979 – 2005), la temperatura media anual simulada es similar a lo registrado en dicho periodo (al igual que para las precipitaciones). Sin embargo, los valores proyectados indican una clara tendencia al alza, la cual se aplana en las últimas décadas. Este comportamiento se repite mayormente para las estaciones analizadas y modelos seleccionados, con algunas particularidades.

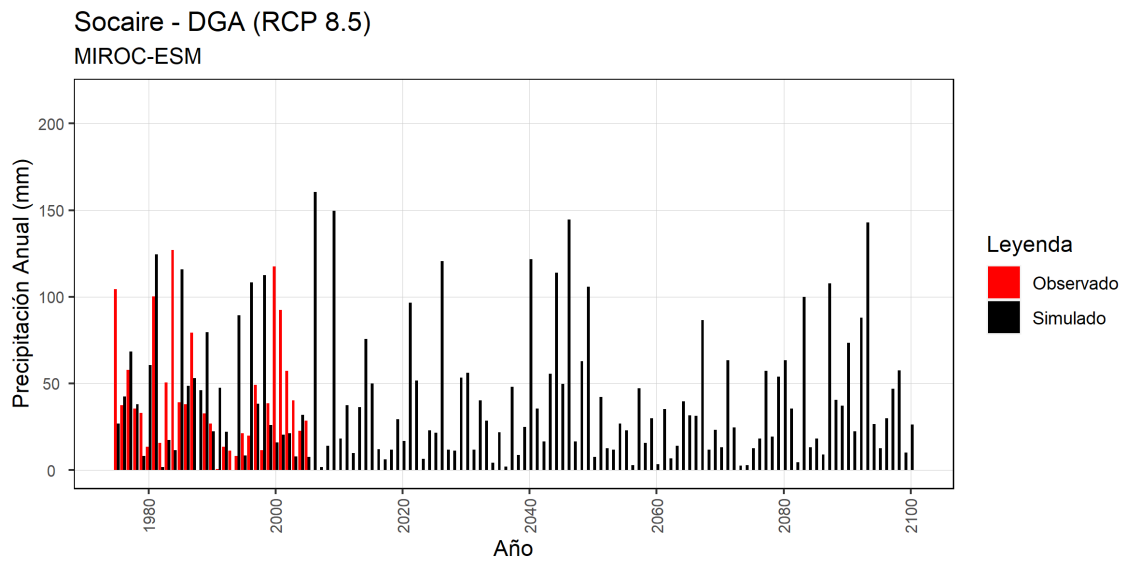
Es importante destacar que, las figuras generadas muestran los datos observados de cada estación hasta el año 2005, pues como se mencionó en el capítulo 4.3.8.4.1 los modelos cuentan con simulaciones para el periodo histórico, el cual abarca los años 1850 – 2005. Adicionalmente en el capítulo 4.3.8.4.3 se indica que el periodo para realizar las correcciones de sesgo comprende 1975 – 2005 para el caso de las precipitaciones y 1979 – 2005 para el caso de la temperatura. Por otra parte, las simulaciones corresponden a proyecciones y no predicciones, es por esta razón que los análisis realizados se asocian principalmente a magnitudes.

Figura 4-184. Ejemplo de precipitación anual de valores simulados corregidos según modelo CNRM-CM5 en estación Socaire (DGA) para el periodo 1975 – 2100 y valores observados en dicha estación durante el intervalo de tiempo 1975 – 2005



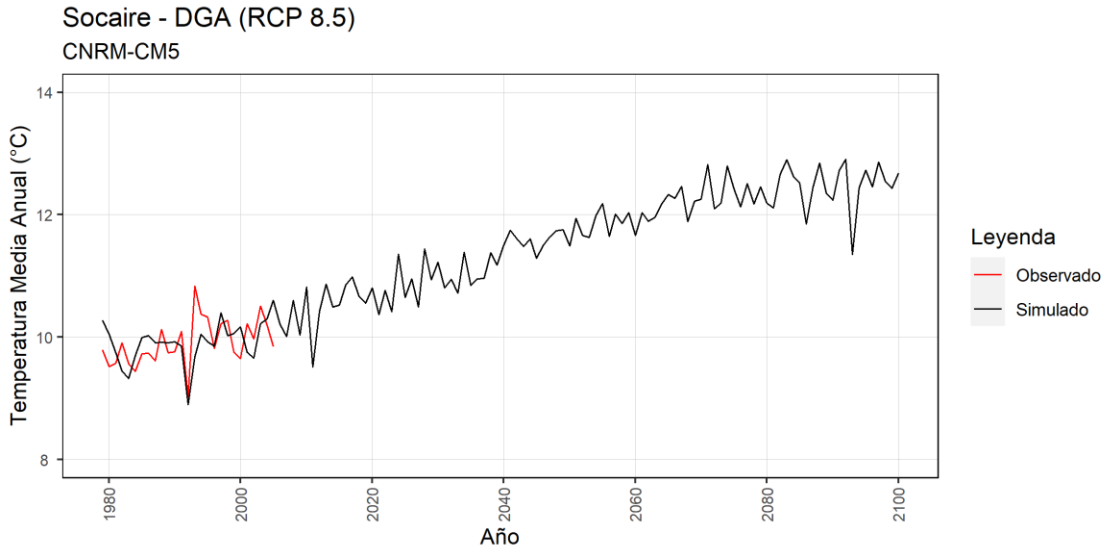
Fuente: Elaborado por SQM.

Figura 4-185. Ejemplo de precipitación anual de valores simulados corregidos según modelo MIROC-ESM en estación Socaire (DGA) para el periodo 1975 – 2100 y valores observados en dicha estación durante el intervalo de tiempo 1975 – 2005



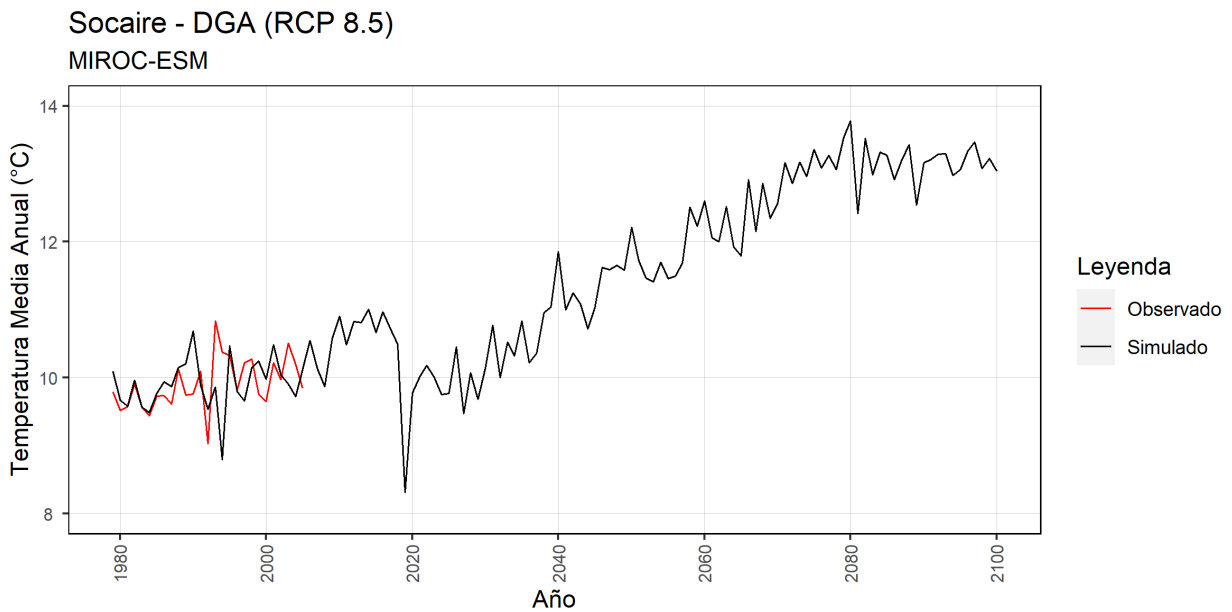
Fuente: Elaborado por SQM.

Figura 4-186. Ejemplo de temperatura media anual de valores simulados corregidos según modelo CNRM-CM5 en estación Socaire (DGA) para el periodo 1979 – 2100 y valores observados en dicha estación durante el intervalo de tiempo 1979 – 2005



Fuente: Elaborado por SQM.

Figura 4-187. Ejemplo de temperatura media anual de valores simulados corregidos según modelo MIROC-ESM en estación Socaire (DGA) para el periodo 1979 – 2100 y valores observados en dicha estación durante el intervalo de tiempo 1979 – 2005



Fuente: Elaborado por SQM..



#### 4.3.8.5.2 Selección de modelo de circulación general para estimación de recarga

Para generar las series de recarga para los modelos se eligió un GCM entre los 4 escogidos en la última selección. La definición de este modelo se basa en diferentes criterios, tanto en los resultados de los análisis presentados en los capítulos 4.3.8.4.3 y 4.3.8.4.4, como en referencias bibliográficas y de recomendaciones realizadas por la autoridad ambiental a otros proyectos que se encuentran en tramitación en el SEIA y se emplazan en las inmediaciones del área de estudio.

En la Tabla 4-79 se muestra un resumen de la información presentada en la Figura 4-182, ordenada según el modelo que presenta una mayor cantidad de estaciones con un ajuste aceptable entre la información de precipitaciones observada y la modelada previa aplicación de corrección de sesgo. Se observa que el GCM que muestra mejor desempeño corresponde al CNRM-CM5, pero presenta un ajuste deficiente con respecto a las temperaturas, con solo la mitad de los puntos de monitoreo superando el umbral establecido. Luego, se encuentra NorESM1-M y MIROC-ESM, en los cuales la mayoría de las estaciones presentan un buen ajuste tanto con respecto a las precipitaciones como a la temperatura; sin embargo, el modelo NorESM1-M muestra una sobreestimación en las magnitudes de la precipitación para los meses más lluviosos, por lo que no representaría una condición más conservadora, siendo descartado para fines de evaluación de los potenciales efectos que podría generar el proyecto sobre los sistemas ambientalmente sensibles. En el caso del modelo CSIRO-Mk3-6-0, éste no se considera puesto que no es capaz de representar correctamente a las temperaturas, con un ajuste aceptable en solo 2 estaciones.

**Tabla 4-79. Clasificación de GCM según cantidad de estaciones que presentan ajuste aceptable con respecto a las precipitaciones**

MODELO	Pp	T
CNRM-CM5	8	4
NorESM1-M	7	8
MIROC-ESM	7	6
CSIRO-Mk3-6-0	6	2
ACCESS1-0	5	7
IPSL-CM5A-MR	5	6
MPI-ESM-LR	4	3
ACCESS1-3	3	3

Fuente: Elaborado por SQM.

Por otro lado, según lo indicado en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017), en el cual se realizó una evaluación de las sensibilidades, la relación con procesos geofísicos de gran escala<sup>20</sup> y la opinión de expertos, sobre cada GCM, se seleccionaron 4 modelos: CSIRO-Mk3-6-0, CCSM4, MIROC-ESM e IPSL-CMSA.

<sup>20</sup> Resolución espacial aproximada de 200 km x 200 km.

De éstos, dos coinciden con los modelos obtenidos mediante los análisis comparativos con respecto a las observaciones locales: CSIRO-Mk3-6-0 y MIROC-ESM.

Adicionalmente, en el marco del proceso de tramitación del EIA Continuidad Operacional Compañía Minera Zaldivar, en el ICSARA N°3 se indica que para esta zona se recomienda el uso de los modelos CSIRO-Mk3-6-0 y MIROC-ESM, los cuales forman parte de la selección realizada aplicando la metodología propuesta en este informe. Sin embargo, al realizar un análisis de las variaciones porcentuales de precipitación media anual y variaciones de temperatura media anual para el corto, mediano y largo plazo (Figura 4-188 y Figura 4-189), es posible concluir que el modelo CSIRO-Mk3-6-0 muestra resultados mucho más extremos que los otros modelos seleccionados principalmente para la precipitación (comportándose como un *outlier*), siendo considerado poco realista (ver Tabla 4-80 y Tabla 4-81).

**Tabla 4-80. Valor promedio de variación porcentual de precipitación media anual en cuenca del Salar de Atacama**

Modelos Seleccionados	Corto Plazo	Mediano Plazo	Largo Plazo
	1995 - 2005 vs 2020 - 2030	1975 - 2005 vs 2020 - 2050	1925 - 2005 vs 2020 - 2100
CNRM-CM5	-35%	13%	-1%
CSIRO-Mk3-6-0	31%	-27%	-32%
MIROC-ESM	25%	10%	-1%
NorESM1-M	23%	-2%	5%

Fuente: Elaborado por SQM.

**Tabla 4-81. Valor promedio de variación de temperatura media anual en cuenca del Salar de Atacama.**

Fuente:

Modelos Seleccionados	Corto Plazo	Mediano Plazo	Largo Plazo
	1995 - 2005 vs 2020 - 2030	1975 - 2005 vs 2020 - 2050	1925 - 2005 vs 2020 - 2100
CNRM-CM5	0,7°C	1,4°C	2,9°C
CSIRO-Mk3-6-0	1,0°C	1,9°C	3,9°C
MIROC-ESM	1,1°C	1,8°C	3,6°C
NorESM1-M	0,7°C	1,4°C	2,6°C

Fuente: Elaborado por SQM.

Por lo anteriormente expuesto, se escoge el GCM MIROC-ESM, puesto que forma parte de las recomendaciones indicadas en la Actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017), en EIAs en tramitación y presenta un buen ajuste con respecto a la información observada.

Figura 4-188. Variación porcentual de precipitación media anual distribuida en la cuenca Salar de Atacama para el corto (1995 – 2005 vs 2020 – 2030), mediano (1975 – 2005 vs 2020 – 2050) y largo plazo (1925 – 2005 vs 2020 – 2100) en modelos CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, MIROC-ESM y NorESM1-M.

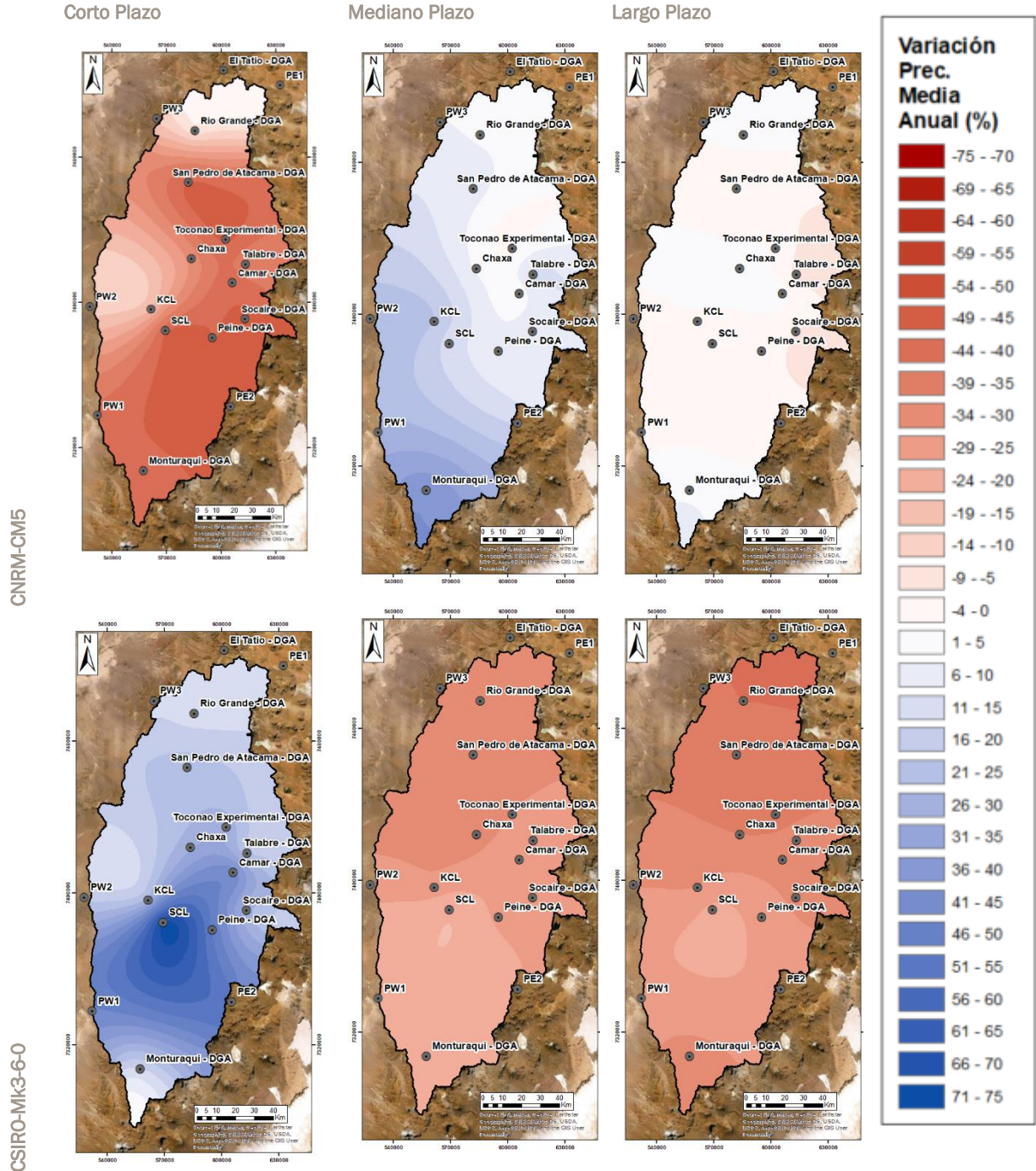
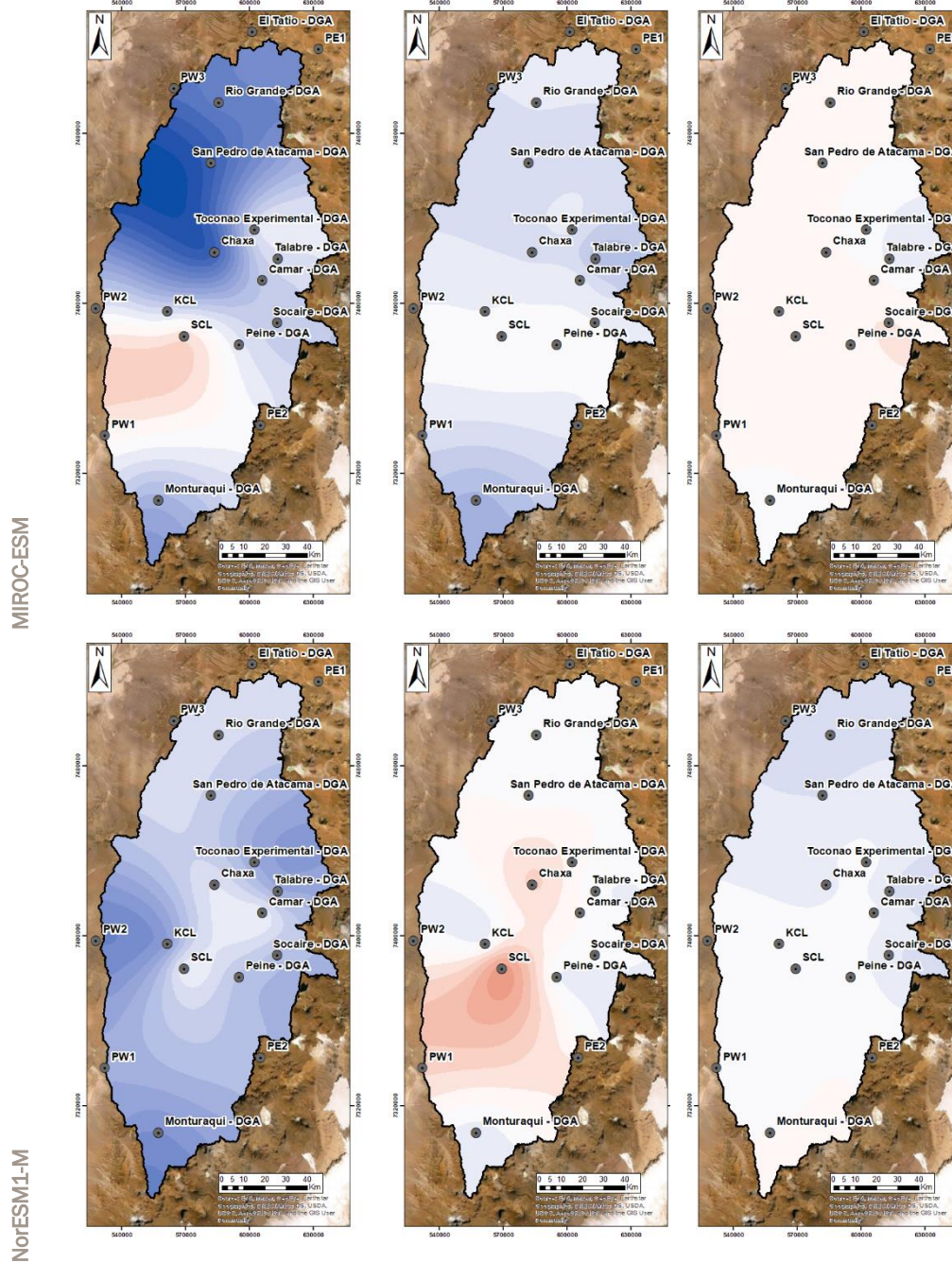


Figura 4-188. Variación porcentual de precipitación media anual distribuida en la cuenca Salar de Atacama para el corto (1995 – 2005 vs 2020 – 2030), mediano (1975 – 2005 vs 2020 – 2050) y largo plazo (1925 – 2005 vs 2020 – 2100) en modelos CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, MIROC-ESM y NorESM1-M.



Fuente: Elaborado por SQM.



Figura 4-189. Variación de temperatura media anual distribuida en la cuenca Salar de Atacama para el corto (1995 - 2005 vs 2020 - 2030), mediano (1975 - 2005 vs 2020 - 2050) y largo plazo (1925 - 2005 vs 2020 - 2100) en modelos CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, MIROC-ESM y NorESM1-M.

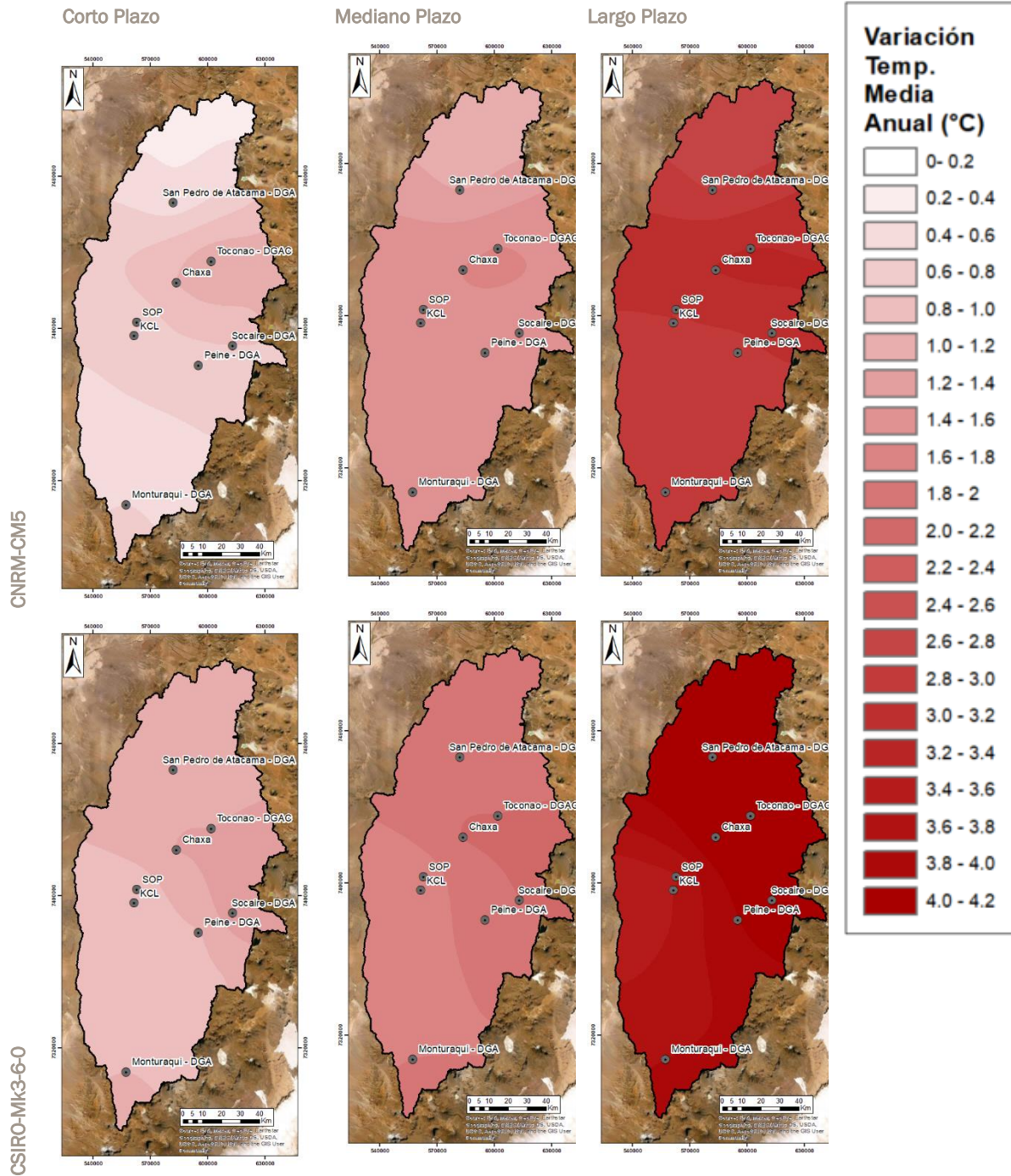
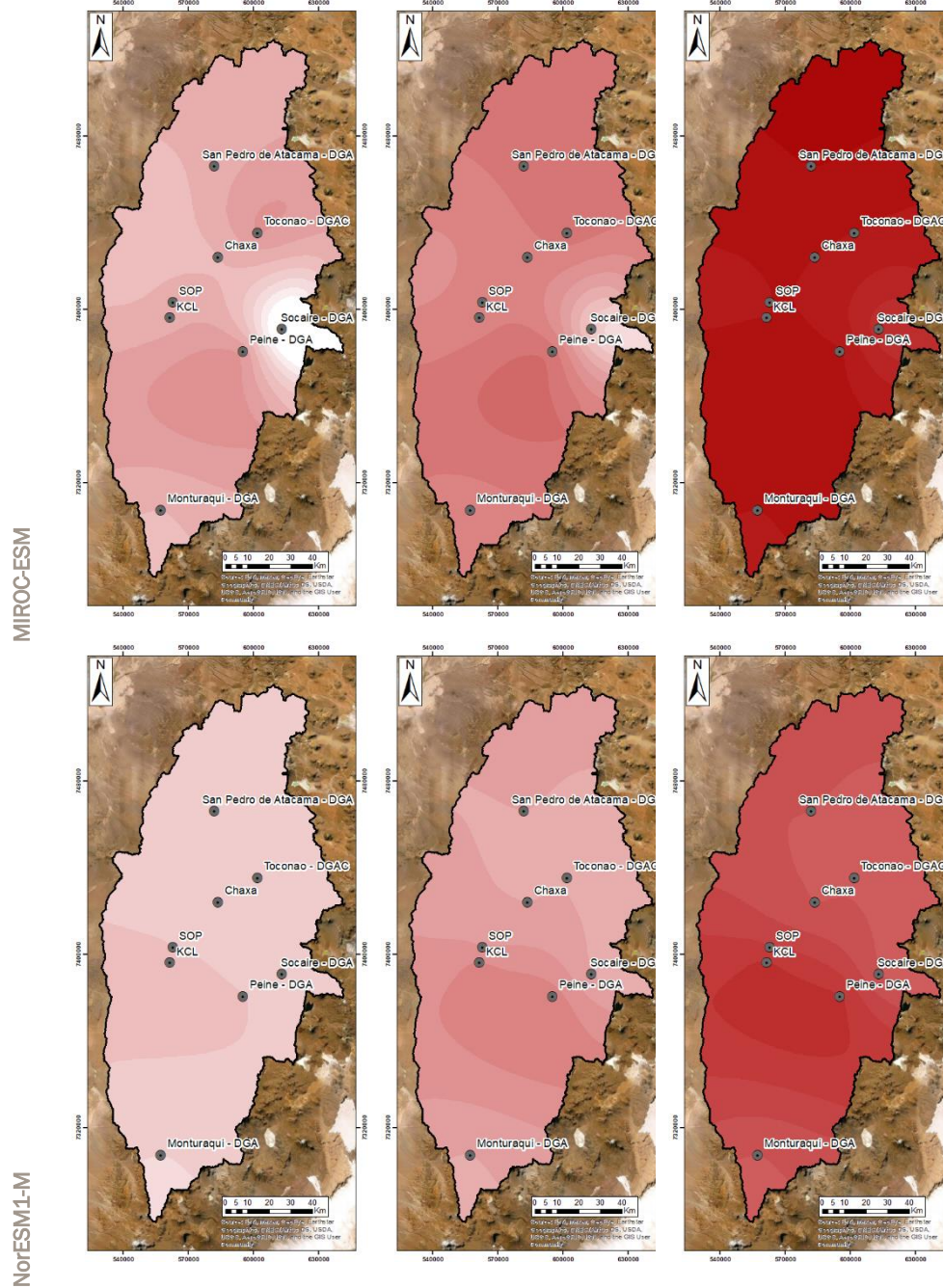




Figura 4-189. Variación de temperatura media anual distribuida en la cuenca Salar de Atacama para el corto (1995 – 2005 vs 2020 – 2030), mediano (1975 – 2005 vs 2020 – 2050) y largo plazo (1925 – 2005 vs 2020 – 2100) en modelos CNRM-CM5, CSIRO-Mk3-6-0, MIROC-ESM y NorESM1-M.



Fuente: Elaborado por SQM..

#### 4.3.8.5.3 Series de tiempo de recarga

Para poder incluir las proyecciones de las precipitaciones en los modelos numéricos, se aplicó la metodología de estimación de recarga presentada en el informe del Modelo Conceptual Hidrogeológico Regional (SQM, 2021a), la cual se basa en el método DGA –DIHA PUC (DGA; Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 2009). Este consiste en estimar la recarga media anual, en el largo plazo, por medio de balances de masa y de coeficientes de infiltración y escorrentía, que ponderan las características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas presentes en la cuenca analizada.

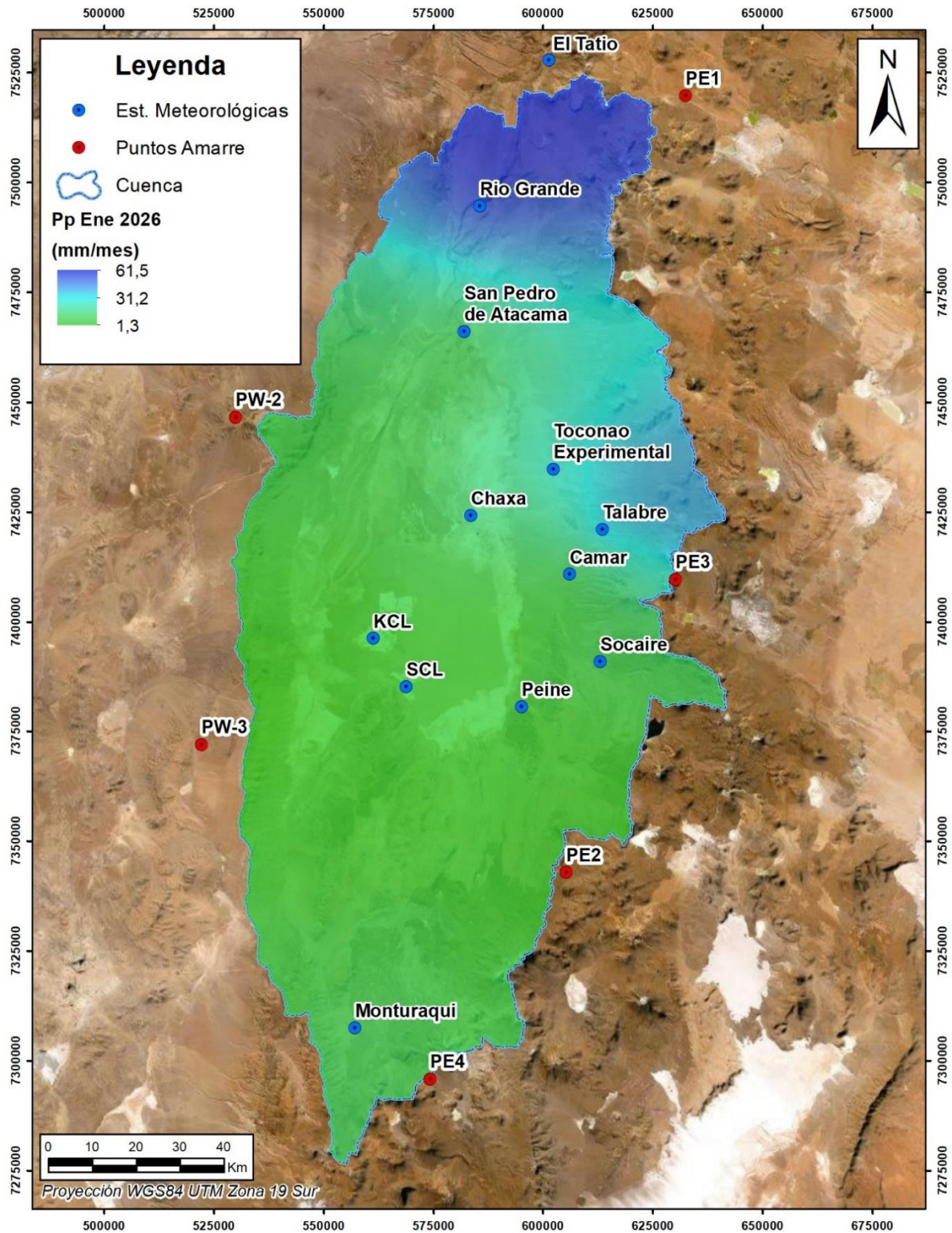
Si bien se utilizaron los resultados del GCM MIROC-ESM en los modelos numéricos, de acuerdo con lo señalado en la sección 4.3.8.5.2, se generan las series de recarga para los modelos CNRM-CM5, MIROC-ESM y NorESM1-M (GCM CSIRO-Mk3-6-0 no se considera al comportarse como *outlier*) con el fin de realizar un análisis de sensibilidad como lo señala el SEA (2012). Dado que el método utilizado emplea como información de entrada a las precipitaciones y su distribución espacial, para poder estimar valores de recarga mensual se generaron interpolaciones para cada mes en el que se estimó una lluvia en al menos una estación, utilizando el método de interpolación Spline en ArcMap 10.4.1. De manera similar a lo indicado en el informe del Modelo Conceptual Hidrogeológico Regional (SQM, 2021<sup>a</sup>), para interpolar se utilizaron puntos de amarre y se estimaron los valores de precipitación en tales puntos, con el fin de mejorar la caracterización de las precipitaciones en los límites de la cuenca. En la Figura 4-190 se muestra un ejemplo de las precipitaciones proyectadas con el modelo MIROC-ESM para enero de 2026.

Dado que las series de recarga se utilizan solo para fines del modelo numérico, y con el fin de estimar cómo se distribuye esta variable en los distintos dominios de los modelos, se definieron zonas de recarga delimitadas con base en la distribución de precipitaciones sobre la cuenca estimada para el período 1986-2019 y los coeficientes de infiltración, los cuales dependen del grado de permeabilidad y consolidación de las unidades litológicas existentes en la zona analizada. La zonificación utilizada se presenta en la Figura 4-191.

Para aplicar el método de estimación de recarga se calculó la precipitación media mensual para los centroides de cada uno de los polígonos presentados en la Figura 4-191, obtenida a partir de las interpolaciones indicadas anteriormente. Posterior a esto, se aplicaron los respectivos coeficientes de infiltración y de escorrentía, estimando las distintas componentes de las entradas al sistema, como la recarga directa, recarga lateral (según el método DGA –DIHA PUC) y la escorrentía.

En la Figura 4-192 se presenta la serie de recarga obtenida para el centroide 32 indicado en la Figura 4-191. Las series de recarga para los otros centroides del modelo MIROC-ESM se presentan en el Anexo 14.

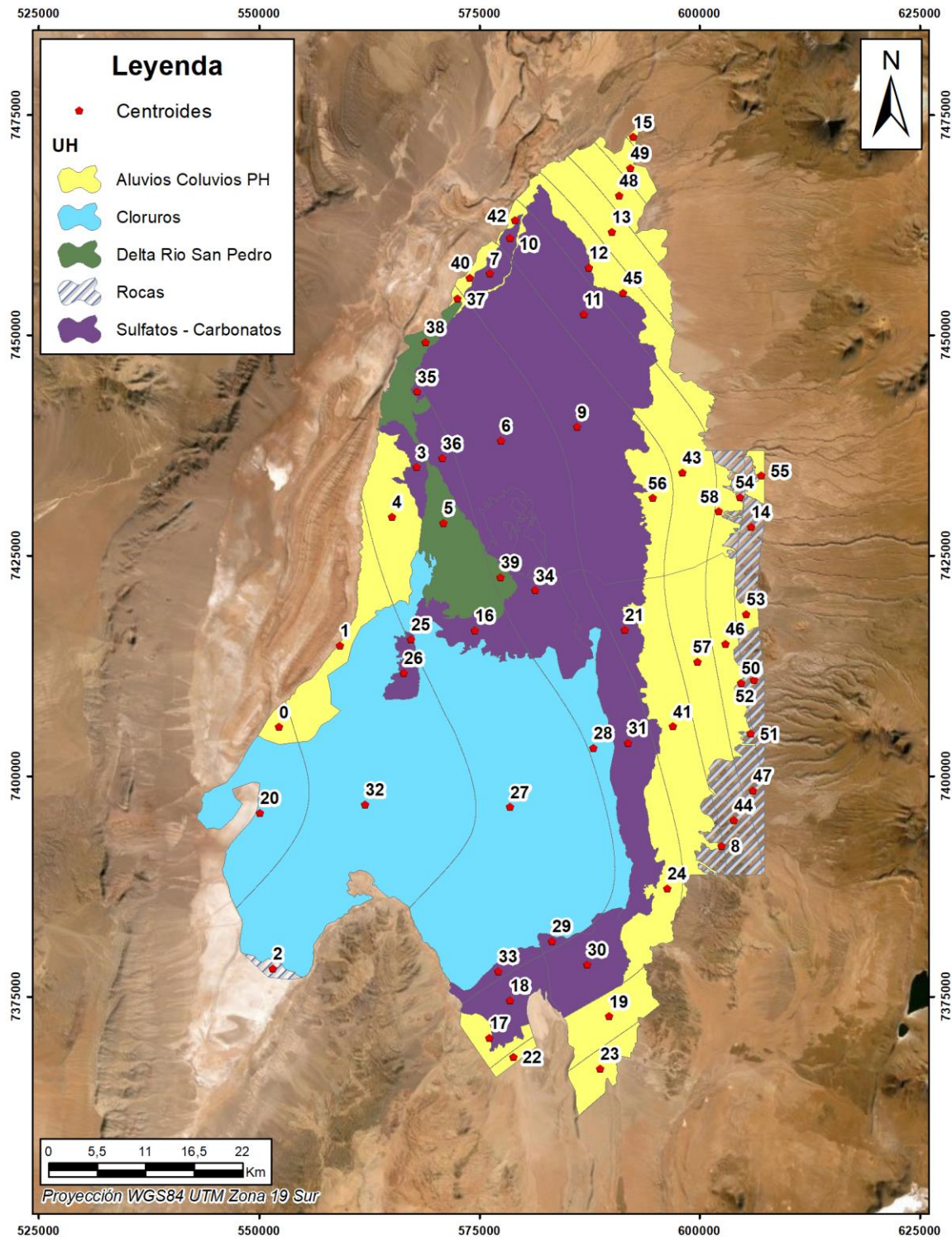
Figura 4-190. Distribución espacial de precipitaciones proyectadas por modelo MIROC-ESM, Enero 2026



Fuente: Elaborado por SQM.

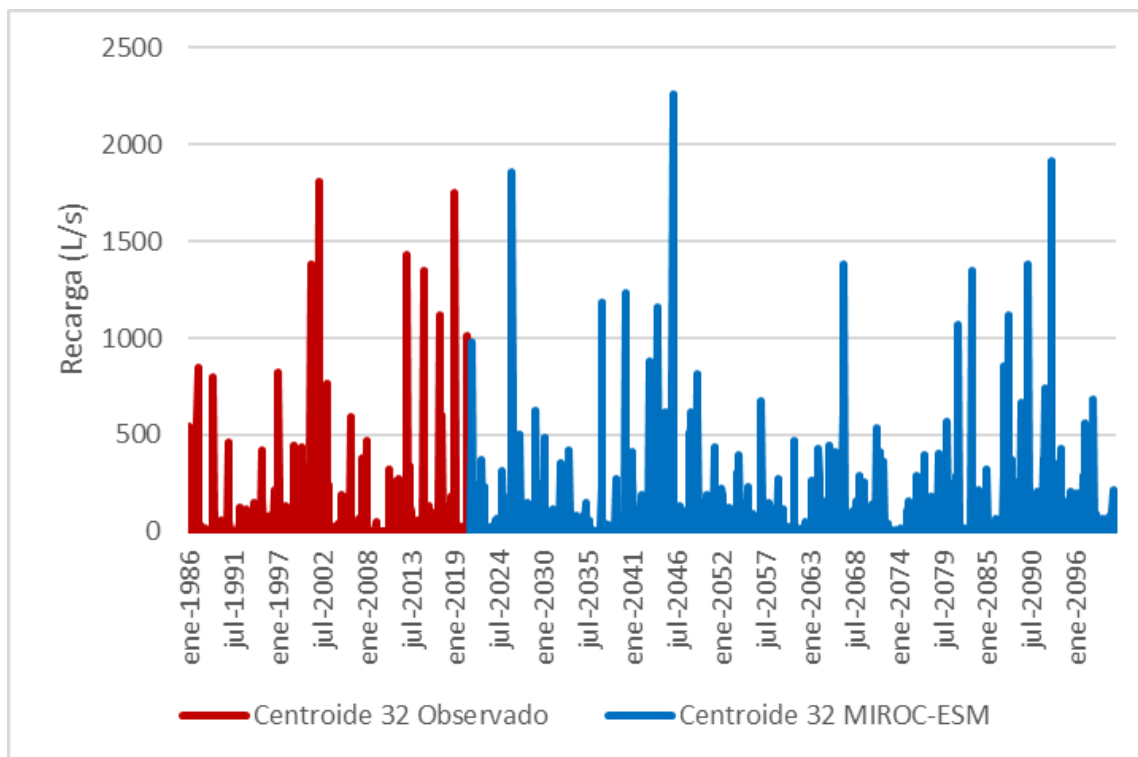


Figura 4-191. Distribución espacial de zonas de recarga



Fuente: Elaborado por SQM

Figura 4-192. Ejemplo de serie de recarga período 1986-2100 Centroide 32 para GCM MIROC-ESM



Fuente: Elaborado por SQM

#### 4.3.8.5.4 Balances hídricos proyectados y análisis de sensibilidad

Para determinar la variación del balance hídrico bajo un escenario (RCP8.5) considerando los efectos del cambio climático, se utilizó la metodología de estimación de la recarga indicada en la sección 4.3.8.5.3 y la zonificación presentada en el informe del Modelo Conceptual Hidrogeológico Regional (SQM, 2021a), ver Figura 4-193. Si bien el escenario seleccionado corresponde al modelo MIROC-ESM (por las razones detalladas en el capítulo 4.3.8.5.2, se integran además los modelos CNRM-CM5 y NorESM1-M con el fin de contar con un análisis de sensibilidad de los resultados.

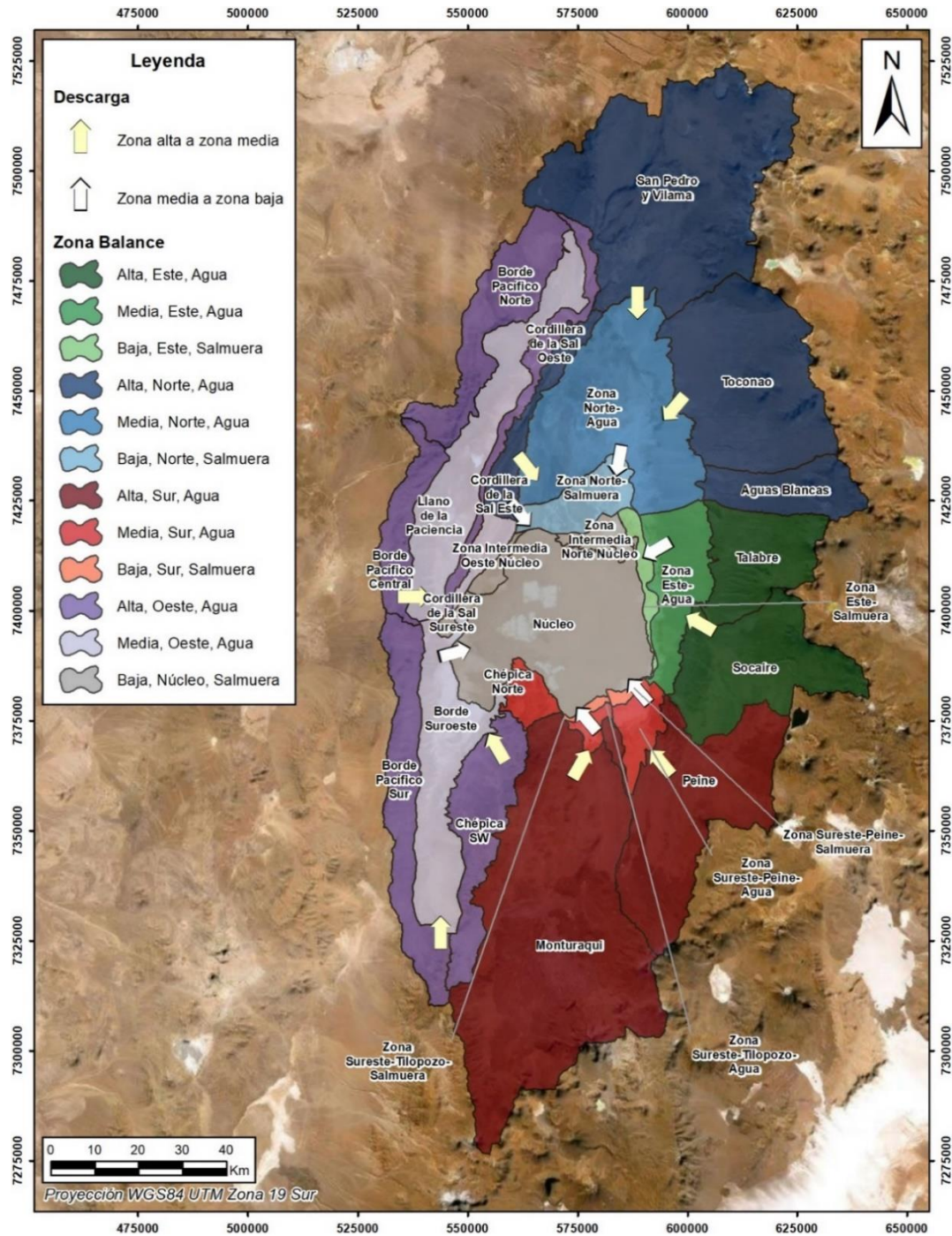
Es importante señalar que estas estimaciones de balance conceptual proyectado representan una condición conservadora, puesto que no considera la reducción de la evaporación desde el suelo debido a las extracciones. Sin embargo, este efecto sí es incorporado en el balance estimado por el modelo numérico. Por otro lado, tampoco incluye la disminución en la evapotranspiración de la vegetación al estar sometidas a condiciones de estrés y la consiguiente reducción en el coeficiente de cultivo (dada por la disminución del coeficiente de estrés hídrico), lo que afecta directamente a la estimación de la evapotranspiración. Como estos dos componentes de las descargas naturales del sistema corresponden a la mayor parte de las salidas (más del 70%), una sobreestimación en ellas genera una variación significativa en el balance calculado, por lo que los resultados presentados en la Tabla 4-86, Tabla 4-87 y Tabla 4-88 deben ser considerados solo a modo de referencia.



El análisis realizado consistió en estimar el balance hídrico para 3 períodos entre los años 2021-2100: (i) 2021-2030, que define el período de duración del Proyecto; (ii) 2031-2065, la primera mitad del período luego del cese de las extracciones por parte de SQM; y (iii) 2066-2100 que corresponde a la segunda mitad de dicho período. Adicionalmente, como la metodología utilizada para la generación de series proyectadas permitió estimar la variación estimada para las precipitaciones y la temperatura, se realizó una revisión bibliográfica con el objeto de encontrar una relación entre el cambio de la temperatura y su consiguiente cambio en la evaporación.

El estudio desarrollado por Kidron & Kronenfeld plantea que según las mediciones realizadas en tanques evaporímetros ubicados en una zona árida (desierto de Negev, Israel), el aumento de 1 °C en la temperatura del suelo generaría un incremento de 10% en la evaporación.

Figura 4-193. Zonas de balance cuenca del Salar de Atacama



Fuente: Elaborado por SQM

Para estimar las variaciones de los tres períodos antes mencionados en la recarga, se consideró la precipitación media anual para cada período, estimando las entradas para cada zona de balance, con base en los valores presentados en la Tabla 4-80. Debido a que el comportamiento de la variación en las precipitaciones y la temperatura depende de la estación que se evalúe, el balance estimado puede ver modificada su distribución de los flujos, ya que los cambios no son lineales.

La Tabla 4-82, Tabla 4-83 y Tabla 4-84 presenta los rangos estimados considerando los modelos CNRM-CM5, MIROC-ESM y NorESM1-M para cada variable y periodo analizado según lo señalado anteriormente.

Tabla 4-82. Rango precipitación media anual por cada período de análisis

Estación	Prom. Pp Anual (mm)		
	2021 - 2030	2031 - 2065	2066 - 2100
Camar - DGA	20,8 - 46,9	32,4 - 42,7	36,5 - 46,5
Chaxa	14,1 - 25,8	20,0 - 26,4	21,8 - 27,8
El Tatio - DGA	44,8 - 62,4	53,0 - 73,9	57,9 - 66,5
KCL	8,7 - 14,7	9,3 - 14,0	10,7 - 12,3
Monturaqui - DGA	28,6 - 54,7	35,1 - 59,6	39,1 - 49,1
Peine - DGA	13,0 - 28,8	18,0 - 24,2	20,6 - 24,0
Rio Grande - DGA	74,1 - 88,1	69,7 - 81,7	69,7 - 85,7
San Pedro de Atacama - DGA	13,1 - 25,3	19,0 - 23,6	19,2 - 23,3
SCL	12,6 - 16,7	14,8 - 22,0	16,9 - 19,0
Socaire - DGA	24,9 - 52,4	36,1 - 48,1	39,6 - 48,8
Talabre - DGA	57,0 - 100,5	77,6 - 92,1	84,3 - 95,1
Toconao Experimental - DGA	15,3 - 36,8	26,5 - 32,0	28,2 - 33,3

Fuente: Elaborado por SQM

Tabla 4-83. Rango aumento de temperatura por cada período de análisis

Estación	Aumento de T (°C)		
	2021 - 2030	2031 - 2065	2066 - 2100
Chaxa	0,1 - 0,6	1,4 - 2,1	2,1 - 3,6
KCL	0,1 - 0,5	1,4 - 2,0	2,0 - 3,4
Monturaqui - DGA	0,2 - 0,8	1,4 - 2,1	2,4 - 4,0
Peine - DGA	0,2 - 1,0	1,4 - 2,2	2,2 - 2,7
San Pedro de Atacama - DGA	0,4 - 1,0	1,4 - 2,3	1,9 - 3,0

Tabla 4-83. Rango aumento de temperatura por cada período de análisis

Estación	Aumento de T (°C)		
	2021 - 2030	2031 - 2065	2066 - 2100
Socaire - DGA	0,0 - 0,4	1,3 - 2,6	1,8 - 2,6
SOP	0,0 - 0,5	1,4 - 2,0	1,7 - 3,3
Toconao - DGAC	0,0 - 0,9	1,3 - 2,1	1,8 - 2,4

Fuente: Elaborado por SQM

Tabla 4-84. Rango evaporación de bandeja por cada período de análisis

Estación	Evaporación de Bandeja (mm/día)		
	2021 - 2030	2031 - 2065	2066 - 2100
Chaxa	0,1 - 0,3	0,9 - 1,5	2,4 - 3,6
KCL	0,1 - 0,3	0,9 - 1,5	2,1 - 3,4
Monturaqui - DGA	0,1 - 0,4	1,0 - 1,7	2,5 - 4,0
Peine - DGA	0,1 - 0,6	0,9 - 1,9	2,2 - 3,4
San Pedro de Atacama - DGA	0,2 - 0,6	1,1 - 2,0	2,2 - 3,7
Socaire - DGA	0,0 - 0,2	0,9 - 1,6	2,0 - 3,1
SOP	0,0 - 0,3	0,9 - 1,5	1,9 - 3,4
Toconao - DGAC	0,0 - 0,5	0,9 - 1,7	2,0 - 3,1

Fuente: Elaborado por SQM

Es importante destacar que los valores obtenidos a partir de los GCM corresponden a una proyección y no a una predicción, por lo tanto, su ocurrencia puede desarrollarse en cualquier intervalo del período analizado. Por esta razón, los balances estimados solo representan a un escenario probable.

En la Tabla 4-85 se presenta el resultado del balance operacional para el período histórico, en el cual se estima que existe un caudal disponible para ingresar al núcleo en las zonas Norte, Sureste Peine, Sureste Tilopozo y Oeste. En el caso de la zona este, se produce un desbalance negativo, puesto que las descargas del sistema superan a las entradas, lo que se acentúa por el efecto de las extracciones.

Tabla 4-85. Balance hídrico sistema agua – escenario operacional (1994- 2019), período histórico

SECTOR	ZONAS DE BALANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
N	Alta-Norte-Agua	297	150	1.750		0	8	294	0	1.895	0
	Media-Norte-Agua	282	0	105	1.895	259	321	1.402	0	299	0
E	Alta-Este-Agua	84	46	644		0	0	191	0	583	0
	Media-Este-Agua	111	0	56	583	674	40	127	0	0	-92
S	Alta-Sur Peine-Agua	39	14	184		0	34	33	0	169	0
	Media-Sur Peine-Agua	38	0	15	169	84	40	62	0	36	0
	Alta-Sur Tilopozo-Agua	227	27	498		3	20	11	0	719	0
	Media-Sur Tilopozo-Agua	11	0	8	719	407	42	35	5	250	0
O	Alta-Oeste-Agua	63	3	55		0	0	0	0	122	0
	Media-Oeste-Agua	125	1	31	122	104	28	1	0	146	0
<b>TOTAL</b>		<b>1.278</b>	<b>242</b>	<b>3.345</b>		<b>1.531</b>	<b>534</b>	<b>2.157</b>	<b>5</b>	<b>4.219</b>	<b>-92</b>

Fuente: Elaborado por SQM



En la Tabla 4-86 se muestra los rangos de balance obtenido considerando los modelos mencionados al principio de este capítulo para el período de simulación que contempla hasta el fin de las actividades de SQM, correspondiente al año 2030. En este caso, las entradas hacia el núcleo indicadas anteriormente se mantienen en general dentro de los rangos estimados, exceptuando la zona Sureste Peine, donde el caudal disponible para ingresar al núcleo para dicho período sería menor o nulo (dependiendo del modelo evaluado). Por otro lado, en el sector Oeste se observa un aumento en los caudales disponibles para entrar al núcleo, lo que se explica por el aumento en las precipitaciones proyectadas para el 2021-2030.

En la Tabla 4-87 y Tabla 4-88 se entregan los resultados obtenidos para los períodos posteriores al fin de la operación de SQM, por lo que en este caso, no se consideran extracciones para la zona de balance Este. Para el período 2031 – 2065 (Tabla 4-87) se observa que en la mayoría de los sectores los valores históricos se encuentran dentro de los rangos proyectados. Por su parte, en la zona Sureste Peine se obtiene que las salidas del sistema superan a las entradas para los 3 casos analizados, implicando que no existiese un caudal disponible hacia el núcleo desde este sector. Caso contrario ocurre en la zona de balance Oeste, donde las descargas naturales serían de menor magnitud.

Durante el periodo 2066 – 2100 (Tabla 4-88) se aprecia que en la mayoría de las zonas los flujos de salida proyectados serían menores a las entradas, excepto en el sector Oeste. Este resultado se ve incrementado porque se proyecta un aumento en la evaporación para el período evaluado, por efecto del aumento de las temperaturas, además que se estima una reducción en las precipitaciones, disminuyendo la recarga.

Por lo anterior, es posible concluir que en el corto y mediano plazo los cambios no son significativos respecto al largo plazo (2066 – 2100).

Tabla 4-86. Balance hídrico sistema agua – escenario operacional, 2021-2030

SEC-TOR	ZONAS DE BALANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
		Recarga Directa	Recarga Lateral	Esorrentía	Recarga desde otras zonas	Evaporación desde el acuífero	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Disponible para descarga hacia otras zonas	Variación de almacenamiento
N	Alta-Norte-Agua	644 - 927	131 - 194	1.252 - 1.813		0	8 - 9	297 - 308	0	1.722 - 2.624	0
	Media-Norte-Agua	96 - 206	10 - 21	37 - 78	1.722 - 2.624	262 - 271	325 - 337	1.416 - 1.468	0	0 - 896	-137 - 0
E	Alta-Este-Agua	138 - 275	34 - 67	311 - 621		0	0	193 - 200	0	291 - 767	0
	Media-Este-Agua	58 - 129	8 - 18	29 - 64	291 - 767	681 - 706	41 - 42	128 - 133	124	0	-588 - -9
S	Alta-Sur Peine-Agua	59 - 119	6 - 11	55 - 107		0	35 - 36	34 - 35	0	51 - 167	0
	Media-Sur Peine-Agua	18 - 37	2 - 4	7 - 13	51 - 167	85 - 88	41 - 42	63 - 65	0	0 - 30	-110 - 0
	Alta-Sur Tilopozo-Agua	222 - 404	31 - 56	256 - 469		2,8 - 2,9	20 - 21	11,0 - 11,4	0	475 - 894	0
	Media-Sur Tilopozo-Agua	10 - 15	0,7 - 1,0	6 - 9	475 - 894	411 - 426	42 - 44	36 - 37	51	0 - 372	-47 - 0
O	Alta-Oeste-Agua	114 - 184	5 - 7	44 - 71		0	0	0	0	163 - 262	0
	Media-Oeste-Agua	104 - 172	4 - 7	24 - 39	163 - 262	105 - 108	28 - 29	1	0	162 - 343	0
TOTAL		1.464 - 2.468	231 - 386	2.022 - 3.285		1.546 - 1.602	540 - 559	2.178 - 2.258	175	2.863 - 6.357	-883 - -9

Fuente: Elaborado por SQM..

Tabla 4-87. Balance hídrico sistema agua – escenario operacional, 2031-2065

SECTOR	ZONAS DE BALANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
		Recarga Directa	Recarga Lateral	Escorrentía	Recarga desde otras zonas	Evaporación desde el acuífero	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Disponible para descarga hacia otras zonas	Variación de almacenamiento
N	Alta-Norte-Agua	729 - 838	152 - 175	1.423 - 1.634		0	9 - 10	328 - 353	0	1.964 - 2.310	0
	Media-Norte-Agua	161 - 206	16 - 20	60 - 74	1.964 - 2.310	289 - 311	359 - 385	1.564 - 1.681	0	0 - 397	-108 - 0
E	Alta-Este-Agua	203 - 250	49 - 61	458 - 564		0	0	213 - 229	0	482 - 662	0
	Media-Este-Agua	90 - 121	13 - 17	45 - 60	482 - 662	752 - 808	45 - 48	142 - 153	0	0	-381 - -80
S	Alta-Sur Peine-Agua	80 - 114	7 - 11	73 - 106		0	38 - 41	37 - 40	0	79 - 155	0
	Media-Sur Peine-Agua	24 - 34	2 - 3	9 - 12	79 - 155	94 - 101	45 - 48	69 - 75	0	0	-109 - -3
	Alta-Sur Tilopozo-Agua	270 - 447	37 - 62	313 - 518		3,1 - 3,3	22 - 24	12 - 13	0	582 - 990	0
	Media-Sur Tilopozo-Agua	12 - 18	0,8 - 1,2	7 - 11	582 - 990	454 - 488	47 - 50	39 - 42	51	10 - 429	0
O	Alta-Oeste-Agua	135 - 195	5 - 8	52 - 75		0	0	0	0	193 - 278	0
	Media-Oeste-Agua	126 - 186	5 - 7	28 - 42	193 - 278	116 - 124	31 - 33	1,0 - 1,1	0	199 - 365	0
TOTAL		1.830 - 2.408	288 - 365	2.468 - 3.097		1.708 - 1.835	596 - 641	2.407 - 2.586	51	3.509 - 5.585	-597 - -83

Fuente: Elaborado por SQM.

Tabla 4-88. Balance hídrico sistema agua – escenario operacional, 2066-2100

SECTOR	ZONAS DE BALANCE DE AGUA	RECARGA (L/s)				DESCARGA (L/s)				BALANCE (L/s)	
		Recarga Directa	Recarga Lateral	Esorrentía	Recarga desde otras zonas	Evaporación desde el acuífero	Evaporación Lámina Libre	Evapotranspiración	Extracciones	Disponible para descarga hacia otras zonas	Variación de almacenamiento
N	Alta-Norte-Agua	740 - 875	155 - 182	1.444 - 1.708		0	11 - 12	371 - 417	0	1.910 - 2.384	0
	Media-Norte-Agua	170 - 207	17 - 20	62 - 74	1.910 - 2.384	326 - 367	405 - 456	1.767 - 1.987	0	0 - 168	-651 - 0
E	Alta-Este-Agua	216 - 252	52 - 61	487 - 571		0	0	240 - 270	0	485 - 644	0
	Media-Este-Agua	101 - 131	14 - 18	50 - 65	485 - 644	850 - 955	51 - 57	160 - 180	0	0	-542 - -236
S	Alta-Sur Peine-Agua	88 - 102	8 - 10	80 - 93		0	43 - 49	42 - 47	0	80 - 117	0
	Media-Sur Peine-Agua	28 - 32	2,8 - 3,2	10 - 12	80 - 117	106 - 119	51 - 57	78 - 88	0	0	-143 - -76
	Alta-Sur Tilopozo-Agua	304 - 369	42 - 51	352 - 428		3 - 4	25 - 28	14 - 15	0	651 - 805	0
	Media-Sur Tilopozo-Agua	14 - 15	0,9 - 1,0	8-9	651 - 805	513 - 576	53 - 59	44 - 50	51	0 - 157	-63 - 0
O	Alta-Oeste-Agua	144 - 166	6 - 7	56 - 64		0	0	0	0	206 - 237	0
	Media-Oeste-Agua	135 - 159	5 - 6	30 - 35	206 - 237	130 - 147	35 - 39	1,1 - 1,2	0	189 - 268	0
<b>TOTAL</b>		<b>1.940 - 2.308</b>	<b>303 - 359</b>	<b>2.580 - 3.059</b>	<b>3.331 - 4.187</b>	<b>1.929 - 2.169</b>	<b>673 - 757</b>	<b>2.717 - 3.056</b>	<b>51</b>	<b>3.520 - 4.779</b>	<b>-1.398 - -312</b>

Fuente: Elaborado por SQM.

#### 4.3.8.6 BIBLIOGRAFÍA

- Albemarle. (2021). *Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual N° 3. Período Enero – Diciembre 2020.*
- Albemarle. (2021). *Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual N° 3. Período Enero – Diciembre 2020.*
- Amphos 21. (2018). *Estudio de modelos hidrogeológicos conceptuales integrados para el Salar de Atacama. Preparado para el Comité de Minería no Metálica de CORFO.*
- Arriagada et al. (2006). Salar de Atacama basin: A record of compressional tectonics in the central Andes since the mid-Cretaceous. Arriagada, C.; Cobbold, P. R.; Roperch, P. *Tectonics*, 25(1).
- Basso, M., & Mpodozis, C. (2012). *Carta Cerro Químal, Región de Antofagasta*. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.
- Becerra M., J., Henríquez, S., S., & Arriagada O., C. (2014). *Geología del área Salar de Atacama, Región de Antofagasta*. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Bevacqua, P. (1988). *Descripción de las unidades geológicas de superficie del Salar de Atacama. Tomo I. Informe MT-03-88. MINSAL Ltda.*
- CORFO - Centro UC Cambio Global. (2021). *Modelo Integrado de Gestión Hídrica de la Cuenca del Salar de Atacama, Informe Proyecto Consolidado.*
- Cortés, J. (2012). *Carta Sierra Mariposa, Región de Antofagasta*. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Davie, T. (2008). *Fundamentals of hydrology*. Routledge.
- DGA. (1986). *Informe hidrogeológico: evaluación de la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, cuenca Salar de Atacama, II región. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.*
- DGA. (1987). *Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.*
- DGA. (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. Informe Final Parte I: Hidrografía Regional del Altiplano de Chile. (S.I.T N° 157). Ministerio de Obras Públicas. Realizado por DICTUC.*
- DGA. (2010). *Actualización de la evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos para construir derechos de aprovechamiento en las subcuencas afluentes al salar de Atacama. S.I.T. 210, pp 277). Ministerio de Obras Públicas. realizado por GCF.*
- DGA. (2012). *Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero del Salar de Atacama: informe técnico. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.*
- DGA. (2013). *Análisis de la oferta hídrica del salar de Atacama. Santiago, Chile. Ministerio de Obras Públicas. Departamento de Estudios y Planificación.*
- DGA. (2014). *Análisis de los Mecanismos de Evaporación y Evaluación de los Recursos Hídricos del Salar de Atacama. Informe Final S.I.T N° 357. Ministerio de Obras Públicas. Realizado por ICASS.*
- DGA. (2014). *Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel nacional (Informe Final) (SDT N°356). Santiago: Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN).*



- DGA; Pontificia Universidad Católica de Chile. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental. (2009). *Levantamiento Hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la Zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III : etapa 2*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DGA-DIHA PUC. (2009). *Levantamiento Hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la Zona Norte de Chile, regiones XV, I, II y III : etapa 2*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- DGA-U de Chile-PUC. (2019). *Actualización de Balance Hídrico Nacional de Chile, SIT N° 417*. Santiago.
- DICTUC. (2000). *Estimación de Aportes Superficiales y Subterráneas del Salar de Atacama, Mediante el Modelo Estacional SEAMOD*. Informe para SQM.
- DICTUC. (2009). *PSAH. Proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. Informe N° 5*. Santiago de Chile.
- Espíldora, B., Brown, E., Cabrera, G., & Isensee, P. (1975). *Elementos de Hidrología*. Santiago: Centro de Recursos Hidráulicos, departamento de Obras Civiles, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.
- Gardeweg, M., Pino, H., Ramírez, C., & Davidson, J. (1994). *Mapa Geológico del área de Imilac y Sierra Almeida. Región de Antofagasta*. Documetos de Trabajo, N° 7, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- GCF Ingenieros Consultores. (2010). *Anexo 7, Adenda 2 Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama*. Antofagasta: Sociedad Chilena del Litio LTDA.
- Henríquez G., S., Becerra M., J., & Arriagada G., C. (2014). *Geología del área San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta*. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Houston, J. (2006). *Variability of precipitation in the Atacama Desert: Its causes and hydrological impact*. *Int. J. Climatol.* 26, 2181–2198. <https://doi.org/10.1002/joc.1359>.
- IDAEA-CSIC. (2017). *Cuarta Actualización del Modelo de Flujo del Salar de Atacama*. Santiago.
- Ide, F. (1978). *Cubicación del yacimiento salar de Atacam. Memoria de título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Minas, 144 p*. Santiago.
- Jordan et al. (2007). Cenozoic subsurface stratigraphy and structure of the Salar de Atacama Basin, northern Chile. Jordan, T.; Mpodozis, C.; Muñoz, N.; Blanco, N.; Pananont, P. *Journal of South American Earth Sciences*, 23(2), 122-146.
- Jordan, T., Muñoz, N., Hein, M., Lowenstein, T., Godfrey, L., & Yu, J. (2002). Active faulting and folding without topographic expression in an evaporite basin, Chile. *Geological Society of America. Bulletin* 114, 1406-1421.
- Kuhn, D. (2002). Fold and thrust belt structures and strike-slip faulting at the SE margin of the Salar de Atacama basin, Chilean Andes. *Tectonics*, 21(4).
- Marinovic, N., & Lahsen, A. (1984). *Hoja Calama : Region de Antofagasta, escala 1:250.000*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, N° 58, 140 pág.
- MEL. (2019). *Plan de Alerta Temprana para Acuífero Monturaqui-Negrillar- Tilopozo. Datos Monitoreo, Informe N° 18: Revisión hasta fines de 2018*.
- Mpodozis et al. (2005). Late Mesozoic to Paleogene stratigraphy of the Salar de Atacama Basin, Antofagasta, Northern Chile: implications for the tectonic evolution of the Central Andes. *Tectonophysics*, 399(1), 125-154.

- Niemeyer, H. (2013). *Geología del área Cerro Lila-Peine, Región de Antofagasta*. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Orphanopoulos, D. (1988). *Informe Hidrogeológico: Evaluación de la disponibilidad de las aguas superficiales y subterráneas. Cuenca Salar de Atacama, II Región. DGA*.
- Perez, J. (2020). *Ejemplo de referencia bibliográfica*. Santiago: Hidroestudio.
- Ramírez, C., & Gardeweg, M. (1982). *Hoja Toconao, Región de Antofagasta*. Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile N° 58 (1:250.000), 121 pág.
- Ramírez, C., Gardeweg, M., Davidson, J., & Pino, H. (1991). *Mapa Geológico del área de los volcanes Socompa y Pular, Región de Antofagasta*. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Risacher, F., Alonso, H., & Salazar, C. (1999). *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III regiones, Chile. Síntesis*.
- Rubilar, C., & Sebastián, J. F. (2015). *Arquitectura interna y desarrollo oligoceno-neógeno de la cuenca del Salar de Atacama, Andes Centrales del Norte de Chile*. Tesis de la Universidad de Chile.
- SGA. (2015). *Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama (Anexo 1). Para Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones del Sistema de Pozas de Evaporación solar en el Salar de Atacama de Rockwood Lithium*. Santiago, Chile.
- Solari, M., Venegas, C., Montecino, D., Astudillo, N., Cortés, J., Bahamondes, B., . . . Espinoza, F. (2017). *Geología del área Imilac-Quebrada Guanaqueros, Región de Antofagasta*. Carta Geológica de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería .
- SQM. (2020). *Actualización Plan de Alerta Temprana y Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama*.
- SQM. (2020). *Proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental. Apéndice 4.1. Línea de Base de Geología. .*
- SQM. (2020b). *Proyecto actualización plan de alerta temprana y seguimiento ambiental, Salar de Atacama. Estudio de Impacto Ambiental. Apéndice 4.4. Línea de Base de Hidrogeología.*
- SQM Salar. (2021b). *Informe N° 28 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico del Proyecto "Cambios y Mejoras de la Operación Minera en el Salar de Atacama"*.
- SRK Consulting. (2020). *Estudio Hidrológico Salar de Atacama*.
- SRK Consulting. (2020). *Estudio Hidrológico Salar de Atacama*.
- Urrutia, J., Herrera, C., Custodio, E., Jódar, J., & Medina, A. (2019). Groundwater recharge and hydrodynamics of complex volcanic aquifers with a shallow saline lake: Laguna Tuyajto, Andean Cordillera of northern Chile. *Science of the Total Environment*.

## 4.3.9 Calidad de Agua

### 4.3.9.1 Introducción

La presente sección da cuenta de los antecedentes que caracterizan la línea de base de la componente calidad de las aguas superficiales y subterráneas del Proyecto “Plan de Reducción de Extracciones en el Salar de Atacama” (en adelante el Proyecto).

Este documento de línea de base expone la revisión y análisis de los antecedentes disponibles que permiten caracterizar el comportamiento de esta componente en el sector en donde se llevará a cabo el Proyecto. La calidad de agua de la zona se presenta a dos escalas distintas: Regional (contexto general) y Local (de cada uno de los sistemas de interés ambiental: Soncor, Aguas de Quelana, Peine y Tilopozo), y se describe en base a parámetros fisicoquímicos, elementos mayoritarios e isótopos estables registrados en el sector. Cabe destacar, además, que se describen en términos generales todos los fluidos existentes en la zona en estudio, es decir: aguas, aguas salobres y salmueras.

La caracterización de la componente Calidad de agua se realiza con el fin de establecer una línea de base o estado actual del sistema hidrogeoquímico, en el marco del objetivo del Proyecto, que consiste básicamente en disminuir el caudal de extracción de salmuera y agua.

### 4.3.9.2 Objetivos

#### 4.3.9.2.1 Objetivo general

El objetivo general de esta línea de base es caracterizar la calidad fisicoquímica de las aguas superficiales y subterráneas en la zona de emplazamiento del Proyecto en miras de identificar y comprender aquellas variables que inciden en el comportamiento hidrogeológico de la cuenca del Salar de Atacama y que pudiesen verse afectadas por la ejecución del Proyecto.

#### 4.3.9.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos se señalan los siguientes:

- Caracterizar la calidad de aguas por unidad geomorfológica con base a sus parámetros fisicoquímicos, elementos mayoritarios e isótopos estables.
- Caracterizar la calidad de aguas en base a los parámetros fisicoquímicos, elementos mayoritarios e isótopos estables de los sistemas ambientales:
  - Soncor,
  - Aguas de Quelana,
  - Peine y
  - Tilopozo.

#### 4.3.9.3 Contexto General

El Salar de Atacama se localiza en la Región de Antofagasta, a 55 km al sur de San Pedro de Atacama y 316 km al noreste de Antofagasta (capital regional). La cuenca del Salar de Atacama comprende un área total de 16.998 km<sup>2</sup>, y está delimitada por la Cordillera de los Andes en sus márgenes norte, este y sur, y la Cordillera de Domeyko por su margen oeste.

La parte más baja de la cuenca, conformada por Núcleo, Zona de Transición Este y Zona Marginal, se encuentra a una altura aproximada de 2.300 m.s.n.m., y se extiende en un área aproximada de 3.100 km<sup>2</sup>, con 100 km de largo y 80 km de ancho aproximadamente. El Núcleo del Salar donde se ubican las faenas extractivas de salmuera, posee una superficie aproximada de 1.100 km<sup>2</sup>, y colinda al este y al sur con la Zona Marginal y al norte con la Zona de Transición Este (ver Figura 4-194).

La acción asociada a la ejecución del Proyecto que podría tener relación con la componente calidad de agua es la extracción de caudal de bombeo de salmuera y de agua, bombeadas desde el Núcleo del Salar y en la Planicie Aluvial (definidas en la Línea de base Geología y Geomorfología: Sección 2 Capítulo 4.1.5), por lo que la caracterización de esta componente, se realiza en un sector que incluye a estas dos unidades geomorfológicas y a la Cordillera Occidental, ubicada está última al oriente del Salar (ver Figura 4-194).

El sector en el que se realiza esta caracterización es idéntica a la utilizada para la caracterización de la componente de Hidrogeología (Sección 2 Capítulo 3.1 Línea Base Hidrogeología) dado a que los criterios para su definición son homólogos. El sector a caracterizar considera criterios de la dinámica de los sistemas de interés ambiental, y la escala de análisis requerida para evaluar posibles efectos futuros asociados al Proyecto. Al mismo tiempo, incluye por completo los modelos numéricos regionales y locales y representa en su totalidad las condiciones de contorno necesarias para éstos.

Con el fin de facilitar el análisis de los datos fisicoquímicos y comprender la evolución espacial de fluidos superficiales y subterráneos, se ha considerado una sectorización contextual subdividida en 3 unidades o zonas, la cual está basada en las unidades geomorfológicas presentes en la línea de base Geología y Geomorfología (Sección 2 Capítulo 4.1.5). Las principales características de cada uno de estos sectores se describen a continuación:

- Planicie Aluvial: Se conforma por abanicos aluviales provenientes de la Cordillera de la Sal, de la Cordillera Occidental y del Cordón de Lila. En esta unidad se incluye el Delta del Río San Pedro, ubicado al norte de la depresión del Salar, aguas abajo de la confluencia de los ríos Grande y Salado. Están constituidos por depósitos detríticos y su parte norte, este y sur corresponde a la principal área de recarga de la cuenca. Las aguas superficiales de este sector corresponden a flujos en quebradas, mientras que las aguas subterráneas corresponden a los flujos en el acuífero aluvial de agua.
- Salar de Atacama (conformado por: Núcleo, Zona de Transición Este y Zona Marginal,). Corresponde a una cuenca desecada, ubicada en el fondo de una cuenca de drenaje cerrada. Planicie limitada por depósitos aluviales por el este, oeste y norte, y por los altos del basamento del Cordón de Lila hacia el sur. Dentro del salar se distinguen 3 zonas o subunidades: Núcleo de halita, Zona de Transición Este y Zona Marginal.
  - Núcleo de halita. Posee una superficie aproximada de 1.100 km<sup>2</sup>. Su relleno consta de una serie de sedimentos clásticos y evaporíticos. En este sector no existen manifestaciones naturales de aguas en superficie de carácter permanente. Bajo superficie aloja un sistema de de salmuera hipersalino.

- Zona de Transición Este. Definida con base en observaciones de terreno e interpretación de información subsuperficial de sondajes, se encuentra ubicada entre el Núcleo del Salar y la Zona Marginal en el sector del Sistema de Soncor y noroeste de éste (ver Figura 4-194). De las observaciones en terreno, las interpretaciones de su ambiente deposicional y de la estratigrafía disponible, se desprende que responde a los depósitos de inundaciones intermitentes, correspondiendo en general a una alternancia entre capas cloruradas y sulfatadas, además de sedimentos clásticos de grano fino. Las aguas superficiales de este sector corresponden a afloramientos de agua subterránea provenientes desde acuífero aluvial.
- Zona Marginal. Presente en el margen sureste, este y noreste del Núcleo, y está constituida por depósitos aluviales en las zonas más distales, adyacente a los abanicos aluviales del margen oriental, y evaporíticos que gradan desde los bordes hacia el núcleo en facies de carbonatos y sulfatos, hasta llegar a las facies cloruradas del Núcleo, con algunas intercalaciones de materia orgánica.
- Cordillera Occidental. Unidad morfoestructural elongada en dirección norte-sur, que incluye el arco volcánico actual. Se dispone en el borde occidental del Altiplano-Puna y conforma el límite oriental de la Cuenca del Salar de Atacama, inmediatamente al este de la Planicie Aluvial oriental. El segmento de la Cordillera Occidental, contiene depósitos principalmente piroclásticos derivados del volcanismo actual, mientras que el arco volcánico actual, que alcanza hasta los 5.900 m.s.n.m., marcando la divisoria de aguas entre las cuencas que drenan hacia el oeste (al Pacífico) o hacia Argentina. Se compone de unidades ígneas y sedimentarias, paleozoicas a mesozoicas, cubiertas en discordancia por depósitos ignimbríticos neógenos. En esta área, todas estas unidades están disectadas por quebradas de rumbo aproximadamente este-oeste y parcialmente cubiertas por depósitos de piedemonte.

En adición, se han identificado cuatro sectores con valor ambiental y ecológico, donde se encuentran los objetos de protección ambiental. Dichos sectores corresponden, de norte a sur, a: Sistema Soncor, Sistema Aguas de Quelana, Sistema Peine y Sector Vegas de Tilpozo, todos los cuales se ubican principalmente en la Zona de Transición Este y en la Zona marginal del Salar de Atacama.

El valor ambiental de estos sectores está vinculado a la diversidad biológica, así como a la presencia y abundancia de especies silvestres en estado de conservación. Estos hábitats dependen de la ocurrencia de un nivel freático somero y de la presencia de cuerpos lagunares, algunos permanentes o presentes todo el año y otros intermitentes. A continuación, se describen en detalle los sistemas con valor ambiental:

- El Sistema Soncor ubicado en la Zona de Transición Este, al noreste del Núcleo del Salar, está conformado por tres lagunas principales, dos de las cuales, Chaxa y Barros Negros, se encuentran conectadas superficialmente a través del Canal Burro Muerto y la tercera, laguna Puilar, de menor tamaño, se ubica al noreste de las dos anteriores, sin evidencias de conexión superficial entre ellas. El Canal Burro Muerto recibe aportes de agua superficial y subterránea a lo largo de su trayecto de norte a sur, y es fundamental para el abastecimiento y mantención de las lagunas Chaxa y Barros Negros. Barros Negros es la laguna terminal del sistema, y los excedentes que recibe son vertidos en zonas de desbordes colindantes a la laguna a través de 2 puntos principales: uno ubicado al oeste de la laguna (conocido como Cola de Pez), el cual se encuentra en detrimento desde aproximadamente 2012, produciéndose principalmente los desbordes por el segundo punto, y el otro activo al extremo sur de la misma (conocido como Desborde sur).
- El Sistema Aguas de Quelana se ubica en la Zona Marginal, al este del Núcleo del Salar de Atacama, y está compuesto por afloramientos de agua alineados en una disposición aproximada N-S. Estos cuerpos de agua presentan un comportamiento errático, denotando una gran variabilidad temporal y espacial en

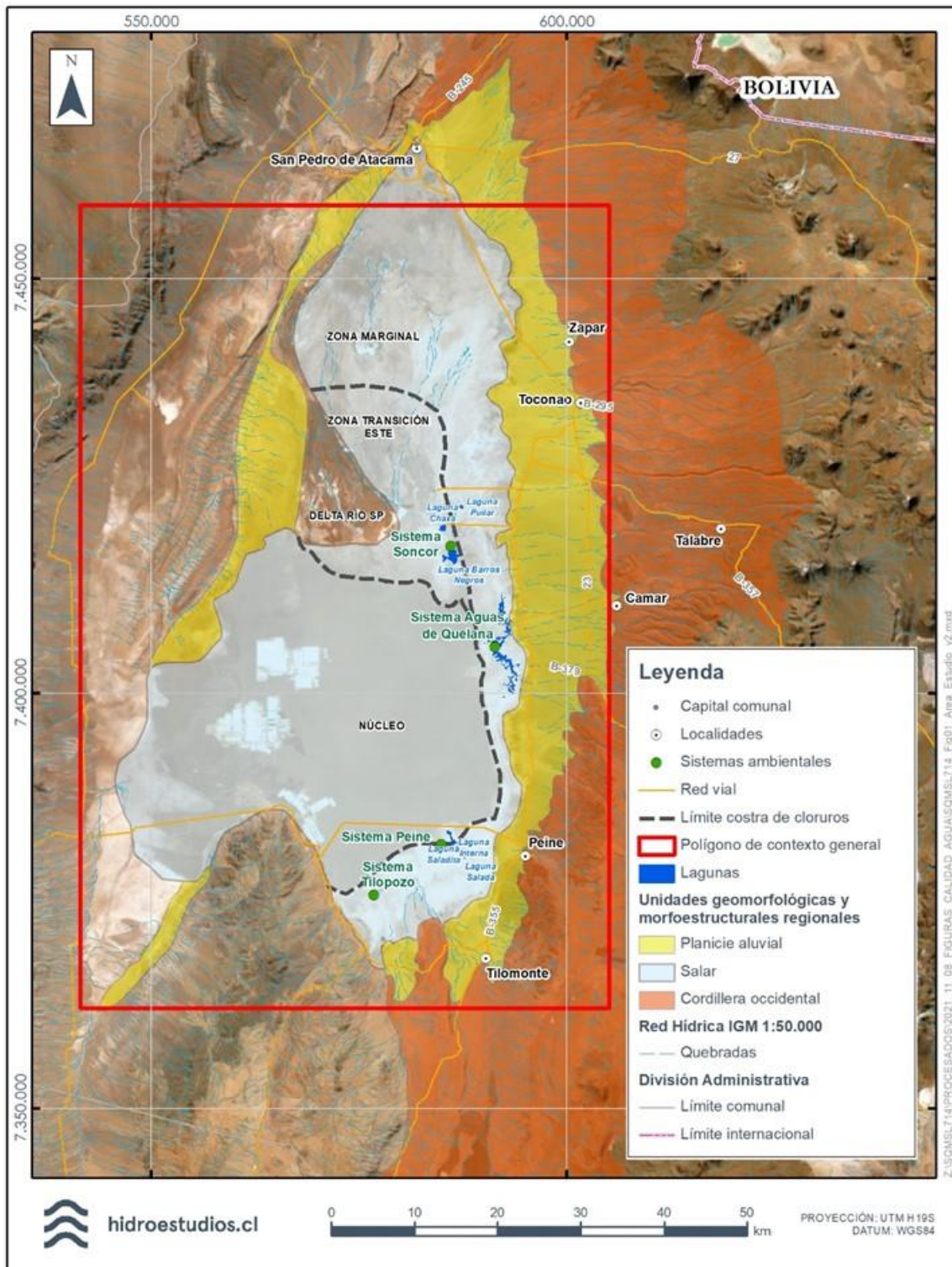


su superficie. Los cuerpos más estables se reconocen exclusivamente sobre la Zona Marginal, mientras que, durante períodos con eventos de precipitación intensa, éstos pueden temporalmente canalizarse y escurrir superficialmente hacia el oeste, alcanzando incluso el límite con el Núcleo del Salar.

- El Sistema Peine se sitúa en la Zona Marginal, al sureste del núcleo del Salar de Atacama, y en él se encuentran las lagunas Salada, Saladita e Interna, alineadas en una dirección aproximada SE-NW. La laguna Interna corresponde a la unidad terminal del sistema de lagunas Salada-Saladita-Interna, y su extensión depende de los desbordes o derrames que puedan ocurrir desde la laguna Saladita en épocas de abundancia hídrica.
- El Sector Vegas de Tilopozo se encuentra en la Zona Marginal, al sur del Núcleo del Salar de Atacama. En este sector el nivel freático se encuentra muy cercano a la superficie, lo que favorece la presencia de un ecosistema tipo vegas, donde destaca la Vega de Tilopozo. En este sector se encuentran las lagunas La Punta y La Brava.

En la Figura 4-194, se presenta la delimitación de las unidades geomorfológicas utilizadas en la caracterización de calidad de aguas y la ubicación de los sistemas ambientales sensibles.

Figura 4-194. Contexto General de línea base de calidad de agua



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.9.4 Metodología

##### 4.3.9.4.1 Fuente de información

La caracterización de la línea de base de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas del Proyecto se basa en la información fisicoquímica e isotópica obtenida a partir de las fuentes listadas a continuación. Esta información es presentada en el Anexo 15.

##### 4.3.9.4.1.1 SQM

En la Tabla 4-89 se presenta la cantidad de muestras utilizadas en esta línea base por fuente de información.

Tabla 4-89: Cantidad de muestras por fuente de información

Fuente	N° Muestras
PSAH SQM	2613
Estudios para SQM	1552
Muestreos Internos	1650

Fuente: Hidroestudios, 2021.

- b. Plan de Seguimiento Ambiental (PSAH): Puntos comprometidos en el PSAH por SQM en RCA N°226/2006. Los resultados originales de los análisis fisicoquímicos y sus respectivos certificados de laboratorio se encuentran en los anexos de los informes semestrales de dicho programa.
- c. Estudios para SQM: Corresponden a informes publicados con anterioridad. Estos son:
  - a. Amphos 21 (2009a), Actualización del modelo conceptual sistema Soncor.
  - b. Amphos 21 (2009b), Hidrología del sector oriental del Salar de Atacama.
  - c. Amphos 21 (2009c), Análisis sistemático de la información hidrológica del PSA.
  - d. Fock, Andrés (2011), Estudio del acuífero aluvial del borde este del Salar de Atacama, entre quebradas Camar y Socaire, comuna de San Pedro de Atacama.
  - e. Geohidrología (2011) Origen de las aguas del sistema Soncor
  - f. SQM Salar (2020a), Sección 4.0 – Línea de Base, Acápito 4.5 – Calidad de Aguas Superficiales y Subterráneas - Actualización Plan de Alerta Temprana y Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama. EIA desistido.
  - g. SQM Salar (2021a), Modelo Hidrogeológico Conceptual Regional del Salar de Atacama.
  - h. SQM Salar (2021b), Modelo Conceptual Hidrogeológico Borde Este
  - i. SQM Salar (2021c), Modelo Conceptual Hidrogeológico Peine
  - j. SQM Salar (2021d), Modelo Conceptual Hidrogeológico Quelana

k. SQM Salar (2021e), Modelo Conceptual Hidrogeológico Soncor

l. SQM Salar (2021f), Modelo Conceptual Hidrogeológico Tilopozo

Los resultados originales de los análisis fisicoquímicos y sus respectivos certificados de laboratorio se encuentran en los anexos de los informes citados.

- d. Muestreos internos: con el objetivo de complementar los antecedentes históricos, se han realizado campañas de muestreo semestral en todo el borde oriental del salar, desde febrero de 2016 a diciembre de 2020, y trimestrales en el entorno de la laguna Barros Negros. Adicionalmente, en 2017 se habilitaron 3 multipiezómetros con 16 piezómetros habilitados a distinta profundidad en el sector Soncor y 3 multipiezómetros con 12 piezómetros en el sector Aguas de Quelana. Los resultados de los análisis fisicoquímicos se encuentran en el Anexo 15 y sus respectivos certificados de laboratorio se encuentran Anexo 16.

#### 4.3.9.4.1.2 Antecedentes de organismos oficiales

##### 4.3.9.4.1.2.1 Corporación Nacional Forestas (CONAF)

En el marco del PSAH del Salar de Atacama, como parte de un convenio establecido en RCA N° 226/2006, CONAF realizó, hasta diciembre de 2018, el monitoreo de 7 puntos de aguas superficiales de cuerpos lacustres de los sistemas Soncor y Peine. En dicho convenio, CONAF se comprometió a compartir información de la mediciones de nivel de agua superficial, extensión lacustre y calidad química de las aguas en las lagunas. Desde enero de 2019 estos muestreos han sido realizados por SQM mediante contratación de Entidades Técnicas de Fiscalización Ambiental (ETFAs). Los resultados de los análisis fisicoquímicos y sus respectivos certificados de laboratorio se encuentran en los anexos de los informes semestrales del referido PSAH. Así como, los resultados de los análisis fisicoquímicos originales y sus respectivos certificados de laboratorio se encuentran en los anexos de cada uno de estos informes.

##### 4.3.9.4.1.3 Antecedentes de terceros

###### 4.3.9.4.1.3.1 Albemarle (Ex Rookwood Lithium)

Análisis realizados en el marco de proyecto “EIA Modificaciones y Mejoramiento de Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”, RCA N°021/2016, de dicha compañía. Los resultados de los análisis fisicoquímicos originales y sus respectivos certificados de laboratorio se encuentran en los anexos del Informe “Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur Del Salar De Atacama” (SGA, 2015).

###### 4.3.9.4.1.3.2 Minera Escondida (MEL)

En la presente línea base son empleados los datos de 3 puntos de medición de propiedad de Minera Escondida (MEL). Los datos fisicoquímicos presentes en la base de datos son obtenidos del informe SGA (2015) realizado para Albemarle (Ex-Rockwood Lithium).

## 4.3.9.4.1.3.3 Otros

1. Gerardo Diaz, 1972. Geología de superficie, sub-superficie y geoquímica del Salar de Atacama.
2. RIOCHILEX, 1999. Perfiles de la compañía minera Riochilex s.a.
3. Risacher, 1999. S.I.T. N°51: Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: Primera, Segunda y Tercera región - Chile
4. Huerta, G. 2012 Evaluation of chemical patterns in brines in the Salar de Atacama, northern Chile: a chemical and isotopic approach
5. CRICYT, 2017 Segundo informe de avance sobre estudios e investigaciones que intentan explicar el estado actual de ejemplares de algarrobo, en una población ubicada en las proximidades del pozo CAMAR 2 de SQM, en el Salar de Atacama, Chile.

## 4.3.9.4.2 Puntos de monitoreo

Para la elaboración de la presente línea de base se ha utilizada información registrada en 709 puntos de monitoreo, de los cuales 160 corresponden a puntos de muestreo superficial, y 542 a puntos de muestreo subterráneos, pudiendo estos corresponder a aguas, aguas salobres o salmueras. Además, para complementar el análisis isotópico, se cuenta con el registro de 7 puntos de monitoreo de aguas lluvia. Se incluyen algunos puntos de monitoreo localizados fuera de la sectorización indicada en la sección 4.3.9.3 el objetivo de realizar una caracterización amplia y abundante, y con la mayor cantidad de información disponible. Las coordenadas de cada punto de monitoreo se presentan en el Anexo 17. En la Tabla 4-90 se muestra la cantidad de puntos de monitoreo de hidroquímica por sector.

Tabla 4-90. Número de puntos de monitoreo

Sector	Muestreo Aguas Lluvia	Muestreo Superficial	Muestreo Subterráneo	Total
Cordillera Occidental	1	4	17	22
Planicie Aluvial	2	97	6	105
Salar de Atacama				
Núcleo	1	195	5	201
Zona de Transición Este	1	70	67	138
Zona Marginal	2	181	69	252
Externo a sectorización de la tabla			2	2
<b>Total general</b>	<b>7</b>	<b>547</b>	<b>166</b>	<b>720</b>

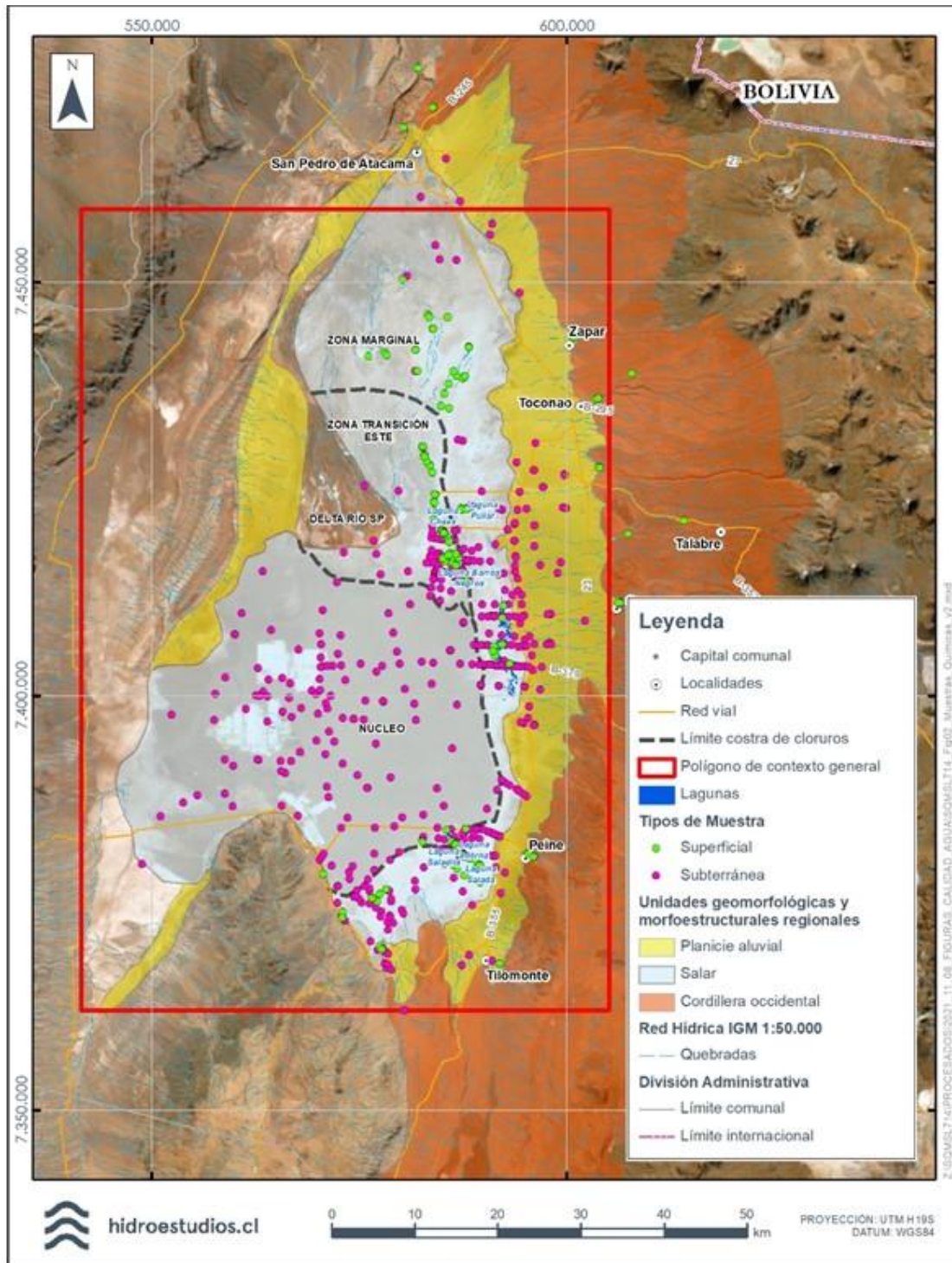
Fuente: Hidroestudios, 2021.

En la Figura 4-195 se presenta la ubicación de los puntos de monitoreo que cuentan con información Hidroquímica, utilizados para la caracterización en el contexto general, y junto con estos puntos, se delimitan las unidades geomorfológicas definidas en la línea de base de Geología y Geomorfología (ver Sección XXX Capítulo XXX). Por otro lado, en la Figura 4-196 se muestra la ubicación de los puntos que cuentan con información



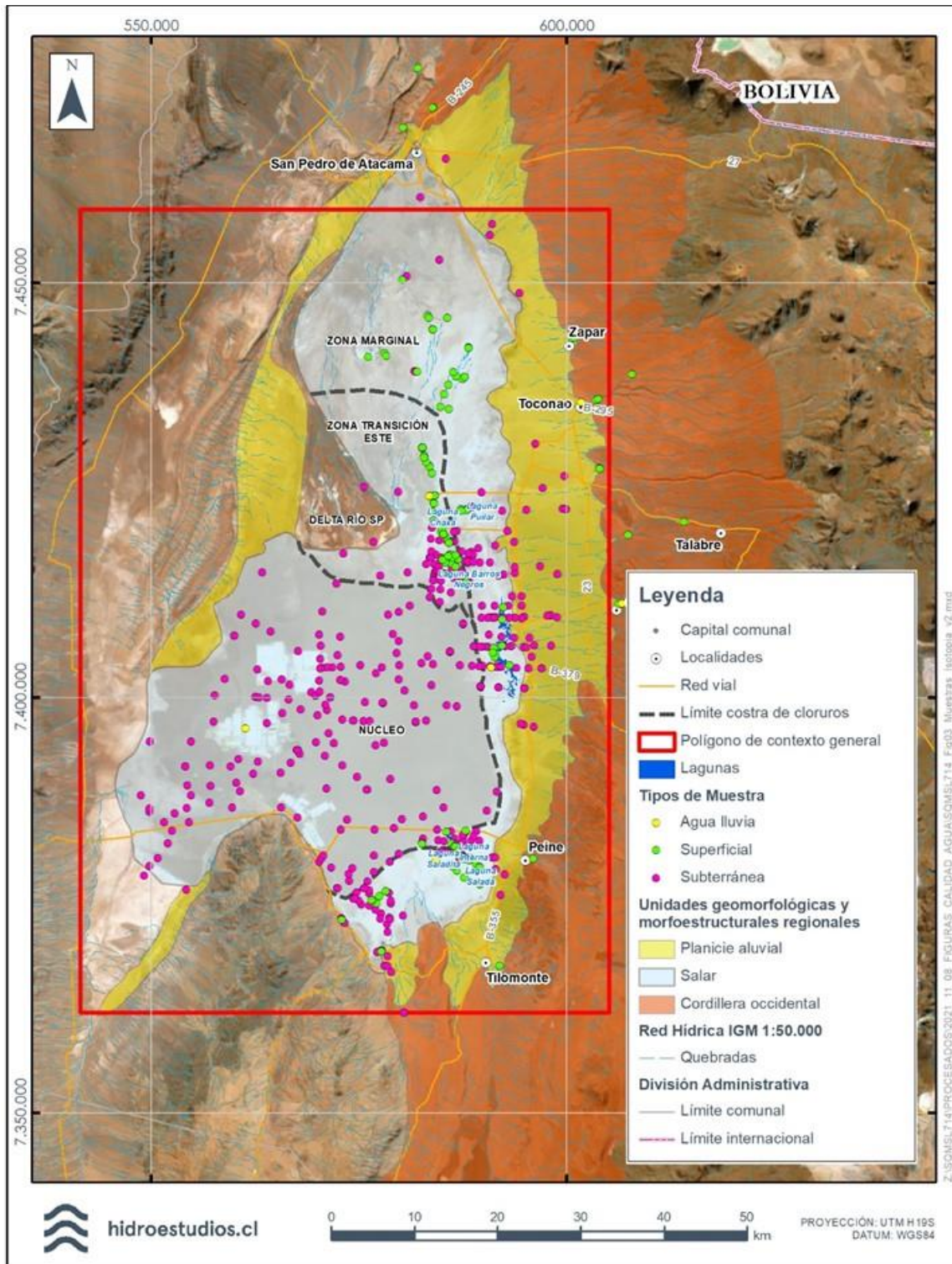
isotópica y que ha sido considerados para realizar la caracterización en el contexto general. Mientras que, desde la Figura 4-197 a la Figura 4-200 se muestran los puntos de monitoreo para cada sistema local.

Figura 4-195 Puntos con muestras químicas en Salar Atacama y su relación con las unidades geomorfológicas



Fuente: Hidroestudios, 2021.

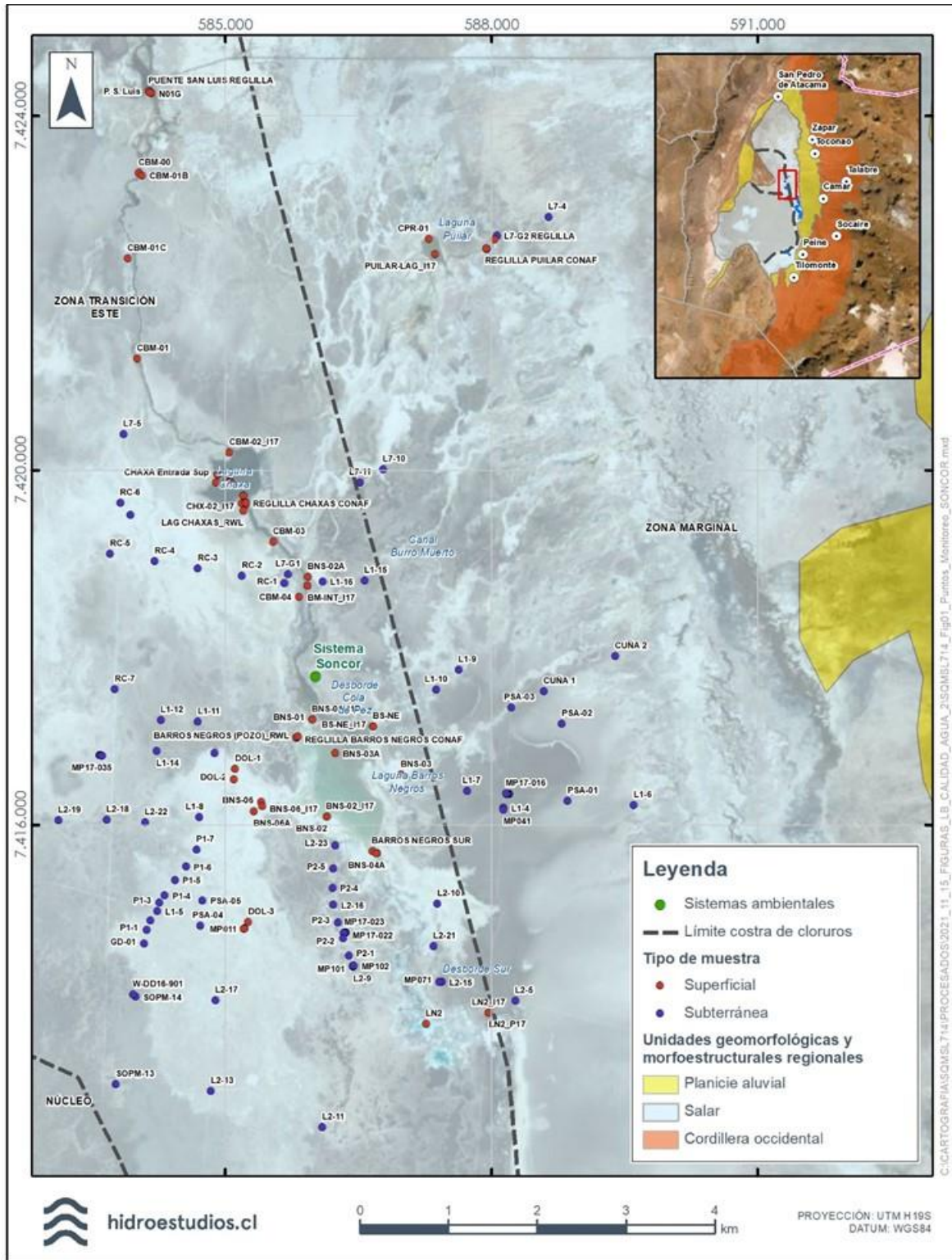
Figura 4-196. Puntos con muestras de isótopos H<sub>2</sub>O y su relación con las unidades geomorfológicas



Fuente: Hidroestudios, 2021.

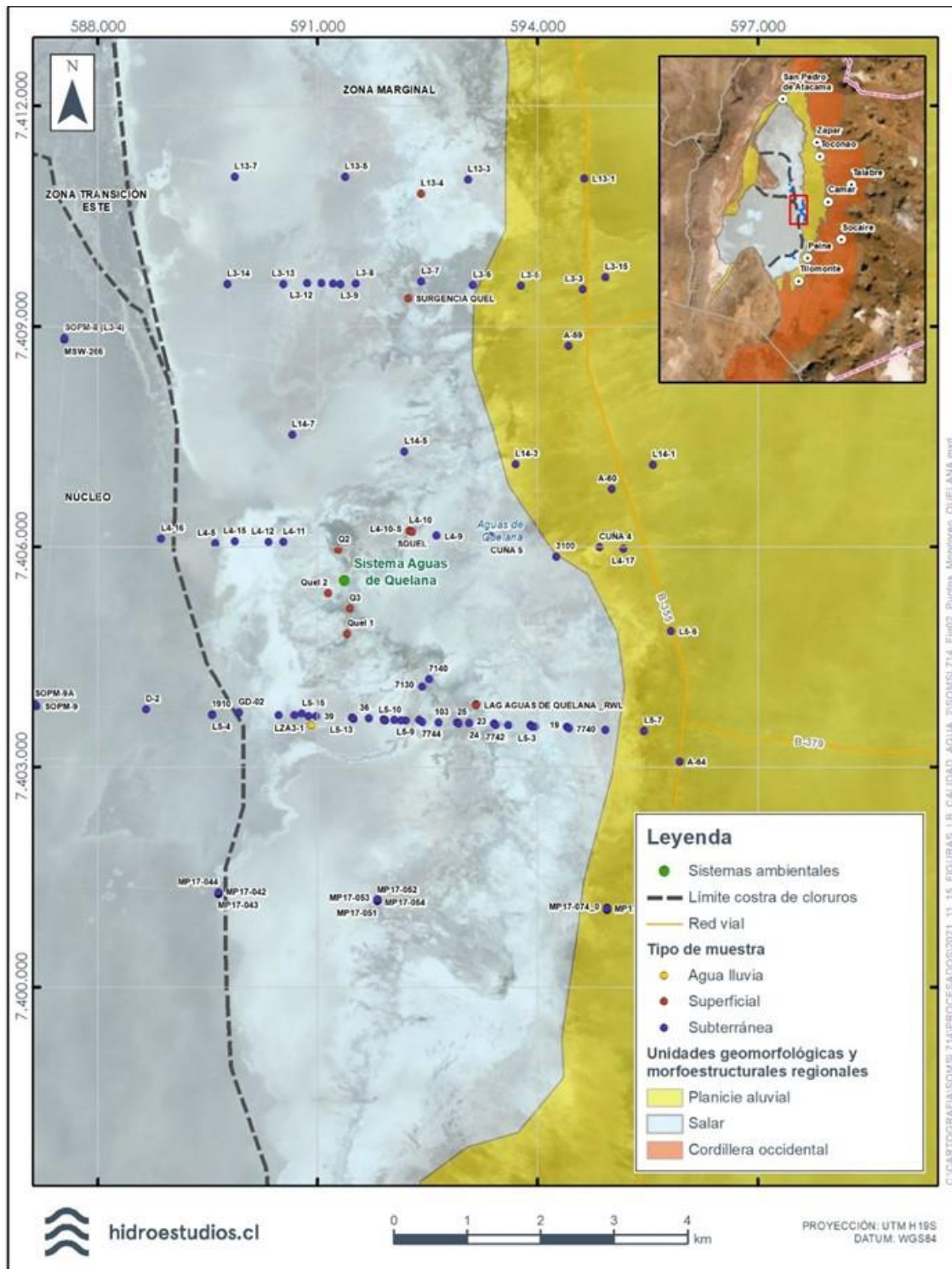


Figura 4-197: Puntos de monitoreo asociados al Sistema Soncor



Fuente: Hidroestudios, 2021.

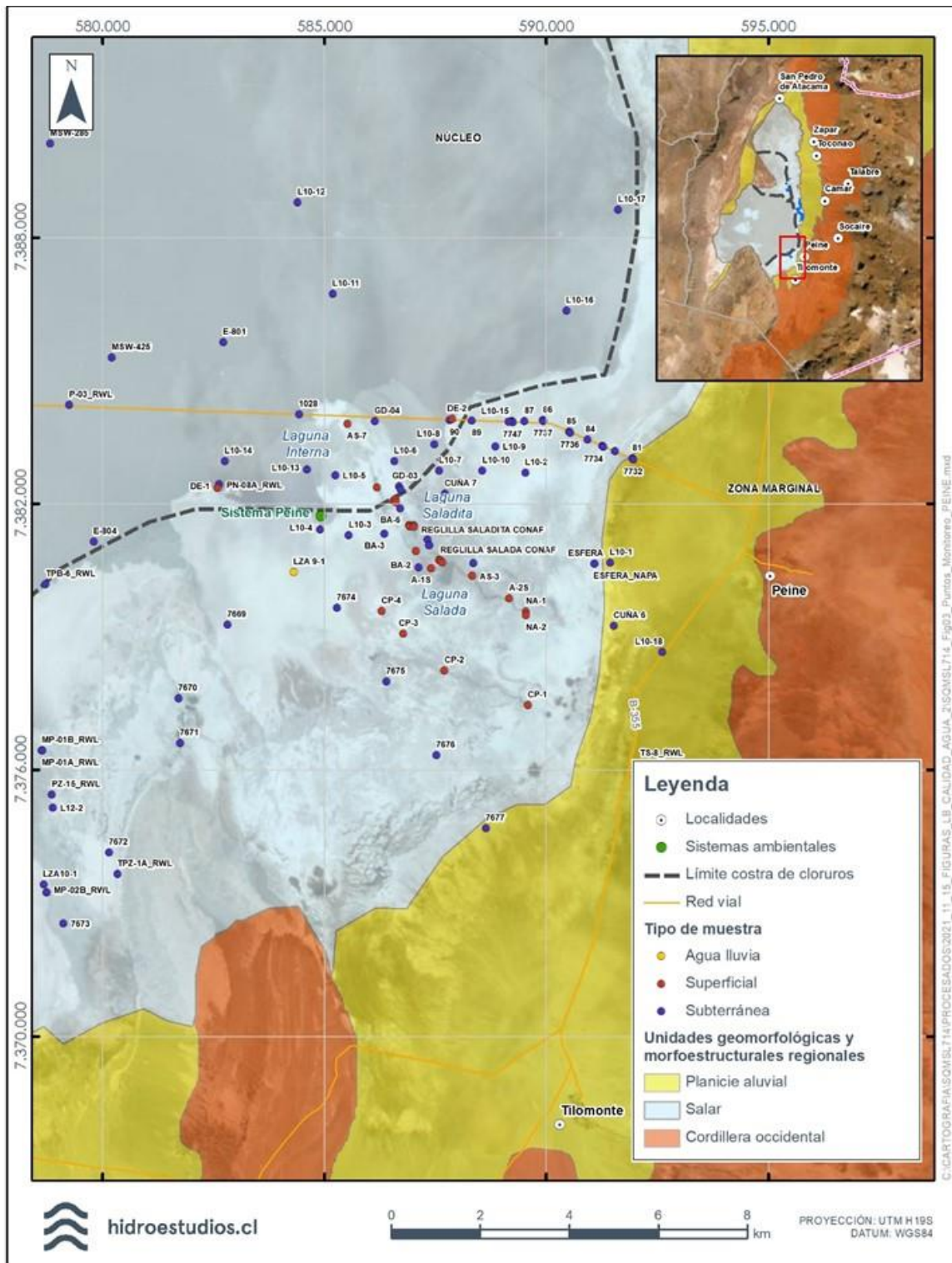
Figura 4-198. Puntos de monitoreo asociados al Sistema Aguas de Quelana



Fuente: Hidroestudios, 2021.

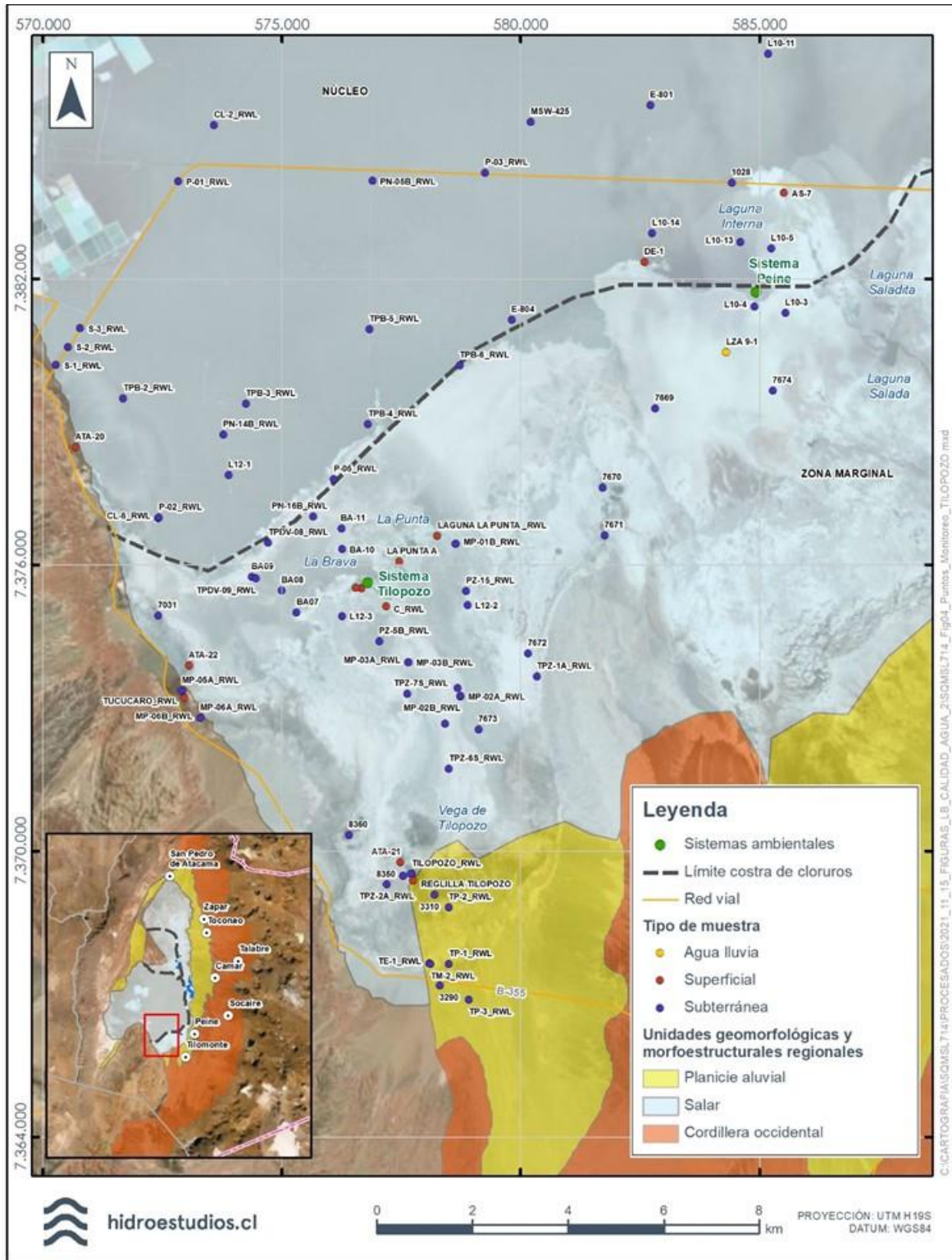


Figura 4-199. Puntos de monitoreo asociados al de Sistema Peine



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-200: Puntos de monitoreo asociados al Sistema Tilopozo



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.9.4.3 Frecuencias de Monitoreo

La frecuencia de monitoreo ha ido cambiando en el tiempo y no son comunes entre las diferentes unidades geomorfológicas. En la Tabla 4-91, se presenta el largo estadístico y frecuencias de monitoreo de cada unidad geomorfológica, tanto en aguas superficiales como subterráneas. El largo estadístico y frecuencias en detalle para cada punto se muestran en Anexo 19.





Tabla 4-91. Sectores de monitoreo y largo estadístico resumido (Continuación)

Sector	2008		2009									2010					2011					2012					2013											
	12	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	1	2	3	4	7	8	10	1	4	6	7	10	1	4	6	7	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cordillera Occidental											1	3																	3	1		3	3	3	2	3	3	
Núcleo	9	11	5		5	15	5		6	7		5		5	5		5	5	5	28	20	5	45	5	5		5	5	10	1	5	4	6	12	6	7	15	
Planicie Aluvial	2	27	9	2	10	5	9		20	9		9	1	8	9	9		9	9		12	9	18	9	4	6	13	9	1	5	9	3	3	12	1	3	12	
Zona de Transición Este	30	4	6		10	15	10	5		7	3	12	3		10	6	6	10	9	9		10	9	12	9	4	5	9	11		1	9	1		9	2	2	11
Zona Marginal	21	42	14	1	15	18	15	2	21	11	4	18	6	3	15	14	1	15	15	15		15	15	24	15	10	5	15	15	11	6	22	12	11	24	12	13	42
-												1																										
<b>Total general</b>	<b>62</b>	<b>84</b>	<b>34</b>	<b>3</b>	<b>40</b>	<b>53</b>	<b>39</b>	<b>7</b>	<b>47</b>	<b>34</b>	<b>7</b>	<b>45</b>	<b>14</b>	<b>11</b>	<b>39</b>	<b>34</b>	<b>7</b>	<b>39</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>28</b>	<b>57</b>	<b>38</b>	<b>99</b>	<b>38</b>	<b>23</b>	<b>16</b>	<b>42</b>	<b>40</b>	<b>25</b>	<b>14</b>	<b>45</b>	<b>23</b>	<b>23</b>	<b>60</b>	<b>23</b>	<b>28</b>	<b>83</b>

Sector	2013		2014										2015					2016					2017																		
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	4	7	10	11	12	1	2	3	4	6	7	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8			
Cordillera Occidental	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2								5															2			1	
Núcleo	10	7	11	5	6	13	6	6	12	62	6	11	7	8	6	5	6	6	5	2	7		10	6	1	6		11	2	1	21	6	9	15		12	15	3			
Planicie Aluvial	1	1	10	1	1	10	1	1	10	2	1	11	2	2	9	9	9	20			9	3	18	11		7	2	18			35		3	22		17	26	2			
Zona de Transición Este	2	2	11	2	2	11	2	2	11	4	2	9	2	1	9	9	9				8		32	23		9		12	3		20	3		21	31	21	27	3			
Zona Marginal	24	15	32	19	20	35	20	20	35	21	20	36	21	18	14	15	15	20			15	6	31	28		15		21	4		36	10	11	36	4	42	40	7			
-																						1																			
<b>Total general</b>	<b>40</b>	<b>28</b>	<b>67</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>71</b>	<b>31</b>	<b>31</b>	<b>70</b>	<b>91</b>	<b>31</b>	<b>69</b>	<b>34</b>	<b>31</b>	<b>38</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>55</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>39</b>	<b>15</b>	<b>91</b>	<b>68</b>	<b>1</b>	<b>37</b>	<b>2</b>	<b>62</b>	<b>9</b>	<b>1</b>	<b>114</b>	<b>19</b>	<b>23</b>	<b>94</b>	<b>36</b>	<b>92</b>	<b>108</b>	<b>15</b>			

Sector	2017			2018										2019										2020										Total				
	9	10	11	1	2	3	4	5	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	5	7	8	10					
Cordillera Occidental					1							1														1												107
Núcleo	4	23		20	1		15		5	6	6	5	5	10	5	2	1	11	1		5		14		5		10	4	1	68	5	1	16			990		
Planicie Aluvial		31	6	24		1	24		8	12	4	8			3	3		7			7	13	1		7		9			7	7				18	1.098		
Zona de Transición Este	10	55	9	38	3	14	23	34	10	42	13	10	26	4	4	6	10	24	23	7	3	16	9	4	3		18	8		5	4		31		1.446			
Zona Marginal	19	53	3	49	19	10	37	6	12	32	46	15	8		8	10	1	52	1	9	5	4	15	1	6		16	8		6	6		24		2.172			
-																																				2		
<b>Total general</b>	<b>33</b>	<b>162</b>	<b>18</b>	<b>131</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>99</b>	<b>40</b>	<b>35</b>	<b>92</b>	<b>70</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>12</b>	<b>94</b>	<b>25</b>	<b>16</b>	<b>20</b>	<b>33</b>	<b>39</b>	<b>5</b>	<b>21</b>	<b>1</b>	<b>53</b>	<b>20</b>	<b>1</b>	<b>86</b>	<b>22</b>	<b>1</b>	<b>89</b>	<b>5.815</b>				

Fuente: Hidroestudios, 2021.



#### 4.3.9.4.4 Parámetros de calidad de agua monitoreados

Los parámetros monitoreados dependen del origen de la información y del periodo considerado. El listado de parámetros medidos históricamente en las distintas unidades geomorfológicas se presentan en la Tabla 4-92 en donde se informa, además, la cantidad de análisis por parámetro y la fuente de la información.



Tabla 4-92. Parámetros Históricos monitoreados. Se informa la cantidad de datos por parámetro y unidad geomorfológica (continuación)

Fuente	Sector	Sodio Disuelto	Sólidos Disueltos To.	Sólidos Suspendidos	Sólidos Totales	Sulfato	Temperatura Conductiv...	Temperatura pH	Temperatura recepción	Temperatura Terreno	Zinc	Zinc Disuelto
Amphos 21, 2009	Núcleo	3				68						
	Planicie Aluvial	15				79					4	
	Zona de Transición Este	54				183						
	Zona Marginal	23				169						
	Total	95				499					4	
Andres Fock, 2009	Núcleo	3				3						
	Planicie Aluvial	17				17						
	Zona Marginal	12				12						
	Total	32				32						
CRICYT, 2017	Cordillera Occidental											
	Planicie Aluvial											
	Total											
Geohidrología, 2011	-	1				1				1		
	Cordillera Occidental	4				4				4		
	Planicie Aluvial	9				9				9		
	Zona de Transición Este	10				10				5		
	Zona Marginal	13				13				11		
	Total	37				37				30		
Gerardo Diaz, 1972	Planicie Aluvial					11						
	Total					11						
Gonzalo Huerta, 2012	Núcleo					34						
	Planicie Aluvial					2						
	Zona de Transición Este											
	Zona Marginal											
Muestras Internos SQM	Total					36						
	-					1				1	1	
	Cordillera Occidental	4	4			45	2		9	9	4	
	Núcleo	82	102	7	7	128	40		97	105	82	
	Planicie Aluvial	76	95	4	4	327	46		107	139	75	
	Zona de Transición Este	387	391	5	5	502	189		350	432	385	
	Zona Marginal	289	326	14	14	426	146	1	313	366	288	
Total	838	918	30	30	1.429	423	1	877	1.052	834		
Perf. de evap. en el margen E del S.A.	Núcleo	1	1			1		1	1	1	1	
	Planicie Aluvial	1	1			1		1	1	1	1	
	Zona Marginal	30	30			30		30	30	30	30	
	Total	32	32			32		32	32	32	32	
PSAH	Núcleo	13	271	271	271	13	5	63		157		
	Planicie Aluvial	5	452	150	151	305	8	86		219	302	
	Zona de Transición Este	4	495	456	454	292	7	59		343	15	
	Zona Marginal	14	921	887	886	420	10	113	36	517		
	Total	36	2.139	1.764	1.762	1.030	30	321	36	1.236	317	
RIOCHILEX, 1999	Planicie Aluvial		1			1						
	Zona Marginal		14	10		14					12	
	Total		15	10		15					12	
Risacher, 1999	Cordillera Occidental	1				3				3	1	1
	Núcleo					1				1		
	Planicie Aluvial					1				1		
	Zona Marginal					2				2		
	Total	1				7				7	1	1
SGA, RWL, 2015	Cordillera Occidental	53	53			53				51	53	53
	Núcleo	141	141			140				120	141	141
	Planicie Aluvial	39	39			39				36	39	39
	Zona de Transición Este	35	35			35				33	35	35
	Zona Marginal	379	379			379				366	379	379
	Total	647	647			646				606	647	647
SOP, 2014	Núcleo											
	Planicie Aluvial											
	Zona de Transición Este											
	Zona Marginal											
	Total											
Total general		1.718	3.751	1.804	1.792	3.774	30	776	37	2.788	2.065	1.514

Fuente: Hidroestudios, 2021

#### 4.3.9.4.5 Criterios de aceptación y validación de la información (QA/QC)

El control de la calidad de los datos de mediciones y análisis de laboratorio se efectúa con el fin de determinar su confiabilidad antes de que éstos sean utilizados en la caracterización de la línea de base. Como este chequeo se realiza respecto de la data histórica, en la mayoría de los casos no es posible determinar cuál es la fuente del error o la desviación, sin embargo, se destaca a objeto de que el dato sea eliminado del análisis o bien que se utilice con los resguardos del caso. Existen variados métodos de chequeo y control de la calidad de los datos, dentro de los cuales se ha seleccionado el balance iónico, la comparación entre parámetros de terreno y laboratorio y la comparación con resultados históricos.

- **Balance iónico (BI):** Para aquellas muestras en que se analizaron los iones mayoritarios, se verificó el error de cargas entre cationes y aniones. La expresión empleada para evaluar el balance iónico por muestra es:

$$\text{Error Balance Iónico (\%)} = \frac{(\sum \text{Cationes}(\frac{\text{meq}}{\text{L}}) - \sum \text{Aniones}(\frac{\text{meq}}{\text{L}}))}{(\sum \text{Cationes}(\frac{\text{meq}}{\text{L}}) + \sum \text{Aniones}(\frac{\text{meq}}{\text{L}}))} * 100$$

Por lo general se suele admitir un 5% de error según la bibliografía existente (Custodio & Llamas, 2001). Dadas las elevadas concentraciones que se encuentran en la salmuera, de acuerdo con la literatura disponible para el análisis de muestras de salmueras con elevadas concentraciones (Garces, *et al.*, 1996), se definió un valor inferior a 7,5%, como valor recomendable, aceptándose un máximo de 10%. Según sea el caso, se dispone de concentraciones de especies iónicas disueltas, o en su defecto concentraciones totales, así como también casos en que no se cuenta con datos suficientes de concentración de iones, por ello se ha adoptado el siguiente criterio:

- Se evalúa BI considerando especies disueltas.
- Si no se cuenta con datos de especies disueltas, se evalúa BI considerando concentraciones totales.

En la caracterización hidrogeoquímica no se utilizaron las muestras con error de BI absoluto mayor a un 10%.

- **Comparativa entre resultados de terreno y laboratorio (Densidad y conductividad eléctrica):** Se comprueba la coherencia de los parámetros fisicoquímicos entre la medición del laboratorio y terreno. Los criterios de aceptación son  $\pm 20\%$  para la Conductividad Eléctrica (CE) y  $\pm 1\%$  para la densidad.
- **Comparativa con respecto a las concentraciones históricas:** Se revisó la coherencia de cada resultado con los resultados históricos para el mismo punto y analito. El criterio empleado consistió en el cálculo de la siguiente expresión:

$$[X_{\text{punto, analito}}] \leq \text{Validado}[X]$$

$$\text{Validado}[X] = \bar{x} + 2\sigma$$

Donde “Validado [X]” representa la concentración (o cualquier parámetro medido) empleada como valor para detectar valores que pueden considerarse anómalos, “ $\bar{x}$ ” representa el valor promedio de todas las mediciones existentes y “ $\sigma$ ” la desviación estándar de las concentraciones para un punto y analito.

Para los análisis se consideraron las muestras validadas por los distintos criterios, según los parámetros que se estén mostrando (densidad, conductividad eléctrica, comparación con históricos y balance iónico). Como resultado de control de calidad se obtiene que, para un total de 5.815 muestras, 856 (14,7%) de ellas no

cumplen con el criterio de control de calidad (Tabla 4-93). La base de datos depurada se presenta en Anexo 19.

Tabla 4-93 Resultado global de control de calidad

	Muestras	%
Total	5815	100,0
Cumple	4.432	76,2
No cumple	1.383	23,8

Fuente: Hidroestudios, 2021.



#### 4.3.9.5 Resultados

##### 4.3.9.5.1 Caracterización regional

En esta sección se muestran los resultados que permiten caracterizar la calidad de aguas en el contexto general, a escala regional. Cabe destacar que se describen en términos generales todos los fluidos presentes, esto es: aguas, aguas salobres y salmueras, sectorizados por las unidades geomorfológicas. Un mayor detalle sobre el funcionamiento del sistema y los procesos que afectan a los fluidos puede consultarse en SQM Salar (2021a)

##### 4.3.9.5.1.1 Parámetros físicoquímicos

En este apartado se caracterizan las muestras subterráneas y superficiales de las distintas unidades geomorfológicas. Para ello, se ha representado la información de los parámetros físicoquímicos de las aguas (conductividad eléctrica, densidad y pH) en gráficos tipo boxplot y en mapas de manera de conocer la distribución espacial y los rangos de variación para los distintos parámetros en distintos puntos de muestreo. Posteriormente se ha considerado, además, el registro histórico de puntos de monitoreo para los distintos sectores definidos.

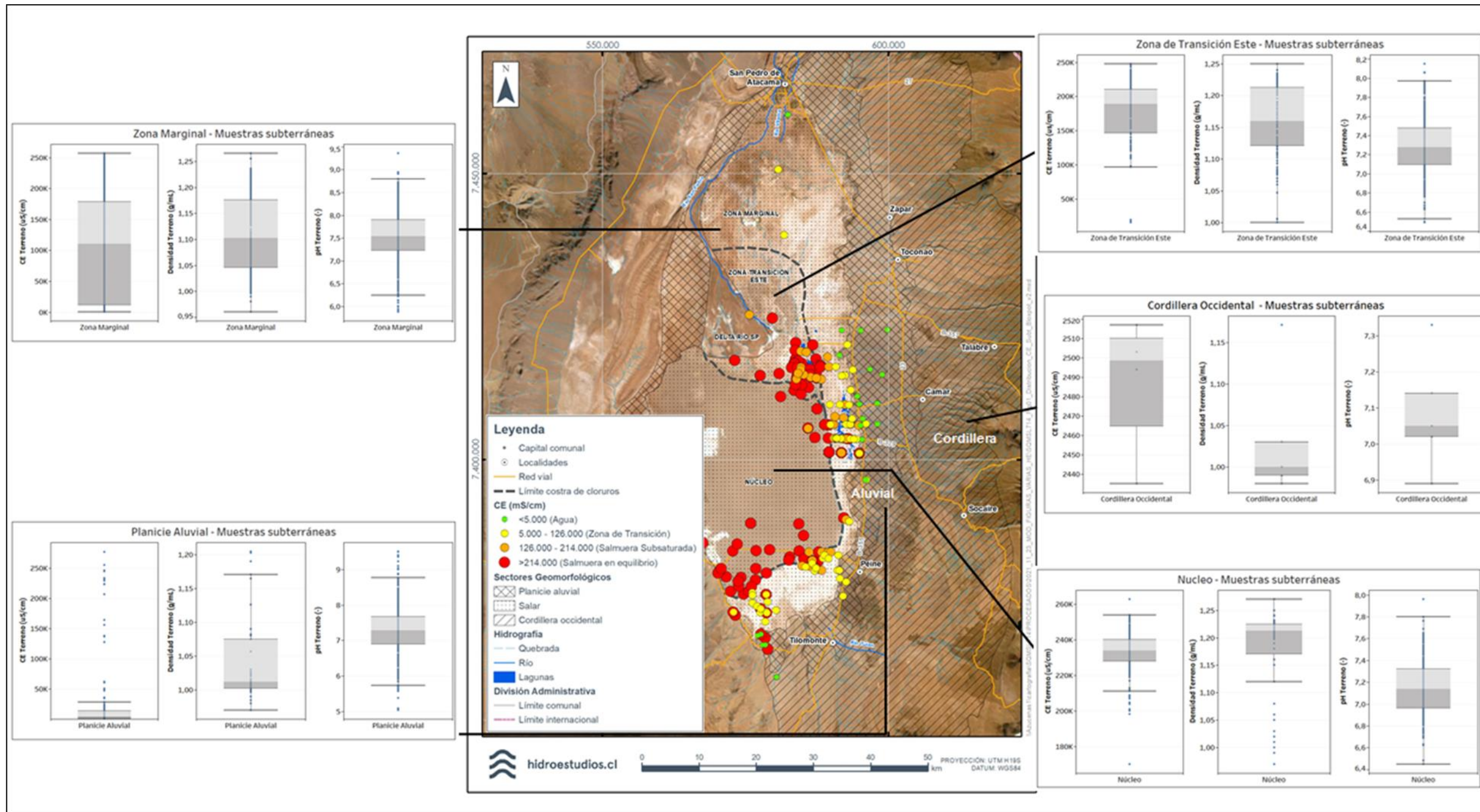
##### 4.3.9.5.1.1.1 Distribución espacial

La Figura 4-201 muestra la distribución espacial de CE por punto de monitoreo, y además las gráficas tipo boxplot por zona, para los fluidos presentes en el Salar de Atacama. De forma general, es posible observar que los valores bajos de CE se presentan en la Cordillera Occidental y en la Zona Aluvial, aumentando de este a oeste. En la Zona Marginal se observa un aumento de la CE terreno a medida que se acerca al Núcleo, donde se observan los mayores valores superiores a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Para la Cordillera Occidental se observan valores de mediana CE Terreno  $<5.000\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que para la Planicie Aluvial se observan registros de todos los rangos mostrados (diferenciados por colores). Este comportamiento también se observa en el gráfico tipo boxplot de la Planicie Aluvial, en la cual la mediana corresponde a 4.200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , sin embargo, se observa puntos sobre el bigote superior del diagrama, incluso alcanzando los 250.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores altos de CE se dan en los límites con la Zona Marginal, cercano a los Sistemas locales Tilopozo y Aguas de Quelana, los cuales corresponden a puntos profundos que captan aguas de la interfaz salina. Los puntos someros en el comienzo de la Zona Marginal tienen valores bajos de CE.

Respecto de los valores de pH, se observa en los gráficos boxplot que la mayoría de las zonas presentan resultados de mediana y cuartiles entre 7 y 8, es decir de neutros a levemente básicos. Se observan algunos valores por encima y por debajo de este margen en especial en la Zona Marginal y en la Planicie Aluvial.

Figura 4-201. Distribución espacial de CE Terreno por punto de monitoreo y gráficas boxplot por zona para las aguas subterráneas y salmueras



Fuente: Hidroestudios, 2021.

La Figura 4-202 muestra la distribución espacial de la densidad medida en terreno para los puntos de monitoreo subterráneos, y gráficos tipo boxplot para conductividad eléctrica terreno (CE Terreno), pH terreno y densidad terreno, representativos de los distintos sectores geomorfológicos. La gráfica boxplot muestra a simple vista la mediana y los cuartiles de los datos, y también exhibe los valores atípicos.

Se observa que las menores densidades se encuentran en el contorno sur, este y norte, coincidiendo con las zonas de recarga en la cuenca, y a medida que se avanza hacia el núcleo, las aguas van adquiriendo una mayor densidad hasta alcanzar valores entre 1,20 y 1,25 g/mL. Además, se observan algunos valores de densidad levemente menores en la Zona Marginal al este del Núcleo (en la zona del Sistema Aguas de Quelana), y en algunas zonas del Núcleo próximas a la Zona Marginal en los sectores de los sistemas Peine y Tilopozo, estos valores se asocian al aporte de aguas superficiales hacia aguas subterráneas.

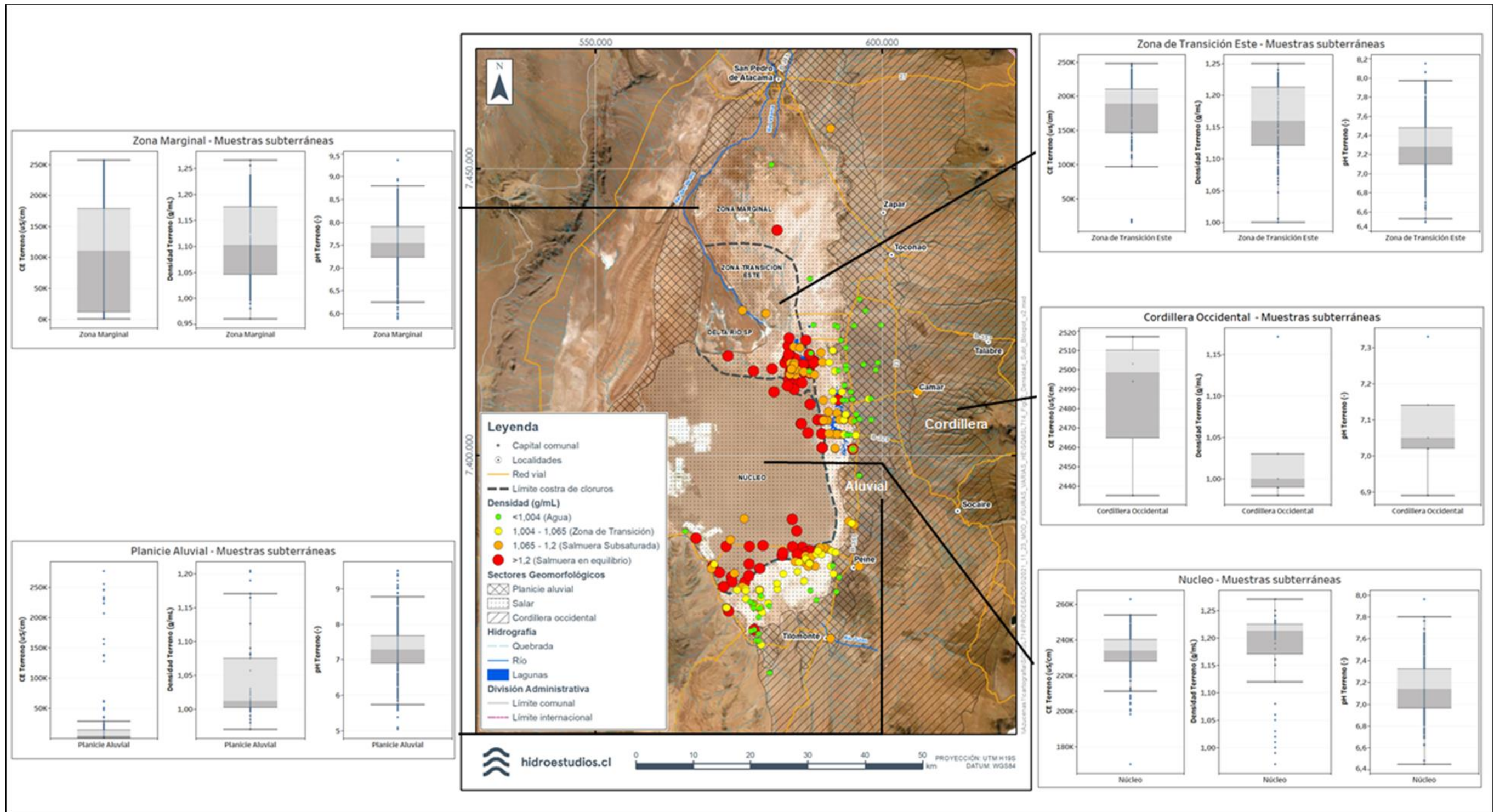
Respecto a los valores de CE Terreno y densidad terreno en conjunto, se observa en los gráficos de la Figura 4-201 y Figura 4-202 que, en coherencia con la distribución de densidad, los valores más altos se observan en el núcleo (medianas próximas a 1,21g/mL y 234.000 $\mu$ S/cm para densidad y CE Terreno, respectivamente). A medida que se aleja al norte, este o sur los valores de ambos parámetros disminuyen hasta valores en sus medianas próximas a 1,02g/mL y 4.200 $\mu$ S/cm en la Planicie Aluvial, y 1,00g/mL y 2.500  $\mu$ S/cm en la Cordillera Occidental. La Zona Marginal y la Zona de Transición Este presentan las mayores amplitudes de valores para ambos parámetros, lo que nos indica que en estos sectores se produce una transición hacia los valores elevados presentes en el Núcleo.

La Zona Transición Este presenta una mayor amplitud respecto al Núcleo, en sus resultados de CE Terreno y densidad, como consecuencia de los desbordes desde los cuerpos de agua superficial.

En la Planicie Aluvial se observan algunos resultados distintos en lo que se refiere a CE Terreno y densidad, alcanzando en algunos puntos valores en el rango 1,17-1,21g/mL (color rojo). Estos valores se asocian a puntos profundos que captan aguas de la interfaz salina.



Figura 4-202. Distribución espacial de densidad por punto de monitoreo y graficas boxplot de parámetros físico-químicas para los distintos sectores



Fuente: Hidroestudios, 2021.

La Figura 4-203 muestra la distribución espacial de la mediana por punto para la CE Terreno en aguas superficiales y los respectivos gráficos tipo boxplot para las mediciones de CE, pH y densidad registradas en terreno en las distintas unidades geomorfológicas. Con respecto a la CE, se observa en la zona norte valores entre 5.000 y 126.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con valores puntuales puntuales de CE sobre 126.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  registrados en las lagunas Tabenquinche y Cejar. Al sur de estos puntos, en el sector conocido como Llano del Tambillo, se encuentran las surgencias que dan origen a dos ramales de agua superficial bien diferenciados, que aguas abajo forman el canal de Burro Muerto (Geohidrología, 2011). En general, estas vertientes y el cauce del canal de Burro Muerto presentan CE bajas que aumentan hacia el sur, alcanzándose los valores más altos (próximos a 200.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en torno a la laguna Barros Negros y sus desbordes (Cola de Pez y Desborde Sur).

Los cuerpos de agua superficial ubicados en la Planicie Aluvial (sector Vegas de Tilopozo, entre otros), registran valores de CE menores a 5.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (color verde), excepto el sector cercano a poblado de Tilomonte, el cual presenta del orden de 6.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (color amarillo), mientras que por su lado las quebradas en la Cordillera Occidental, tales como aquellas ubicadas en las cercanías de los poblados de Talabre, Camar, Peine y Soncor, presentan spolo valores menores a 5.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (color verde). La CE en estos sectores aumenta al aproximarse hacia el núcleo donde se observan, en general, los valores más altos de CE asociados al proceso de evaporación en el sistema.

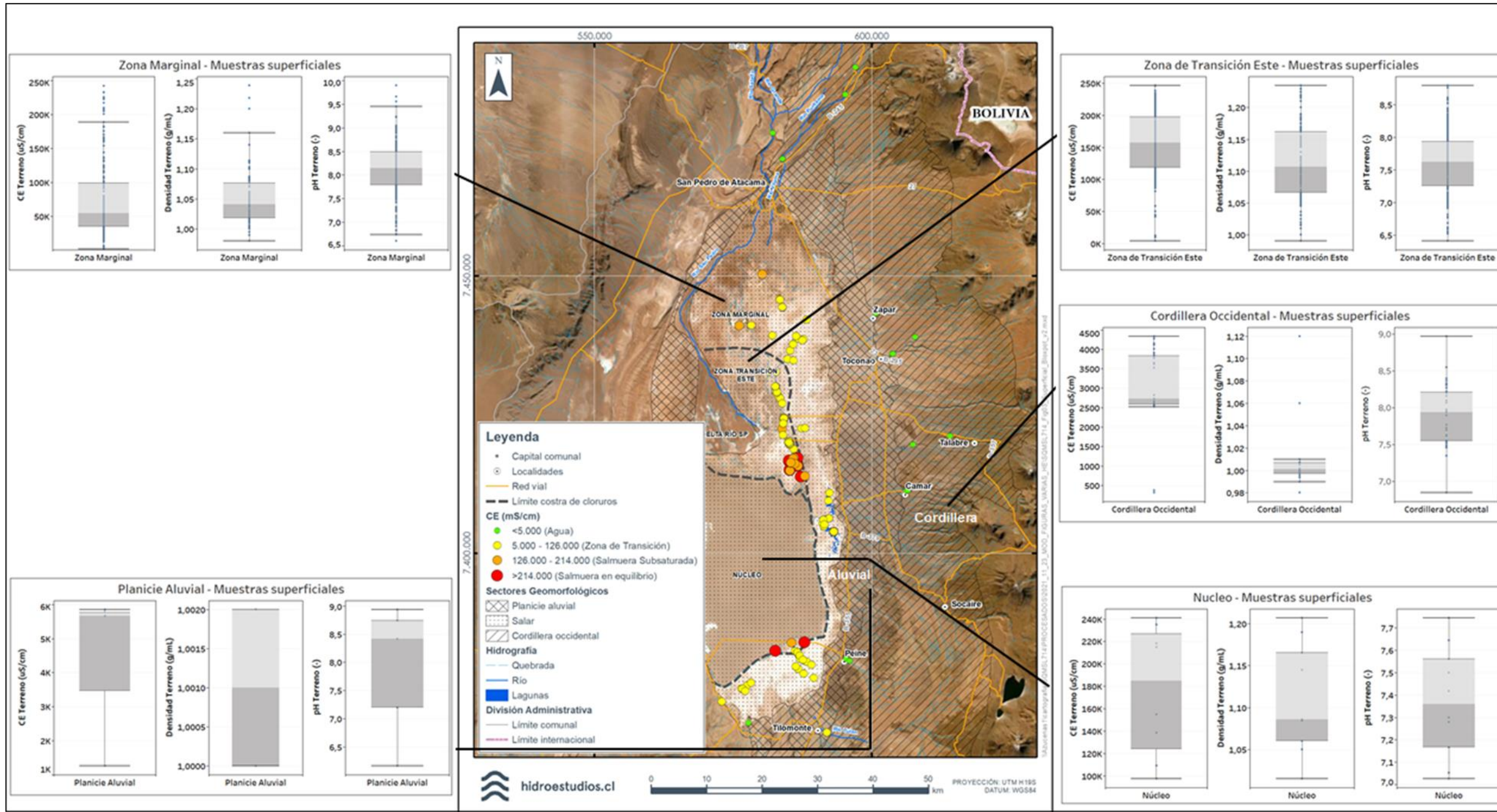
En los gráficos tipo boxplot, puede observarse que el pH de terreno en las aguas superficiales varía entre 6 y 9, presentando las mayores amplitudes en la Planicie Aluvial y la Zona Marginal.

Respecto de la densidad y la CE Terreno, los valores más altos en los cuerpos superficiales se presentan en Zona de Transición Este. El resto de las zonas presentan amplitudes muy notables en sus valores para ambos parámetros y esto se debe a la marcada estacionalidad que presentan los sistemas de agua superficial por el efecto, principalmente, de la evaporación. Este aspecto puede verse en la Figura 4-204, que muestra la evolución temporal de CE Terreno, presentando las mayores CE Terreno en verano y las mínimas en invierno para los sistemas lagunares. Además, se observa que los sistemas lagunares en el norte (Soncor) y este (Aguas de Quelana) presentan valores mucho más elevados de CE Terreno en verano, lo que sugiere que las tasas de renovación en los sistemas Soncor y Quelana son menores que en los sistemas del sur.

En la Figura 4-205 se muestra la evolución de la CE Terreno en el tiempo, para puntos subterráneos de registros ubicados en los distintos sectores del Salar de Atacama. Los mayores valores de CE se observan en las zonas del Núcleo y en la Zona de Transición Este, en las cuales no se exhibe estacionalidad. Al oriente del Núcleo, en la Zona Marginal, los valores de son menores que los registrados en el Núcleo y en la Zona de Transición Este. Los valores de CE disminuyen hacia el sur del Núcleo, en la Zona Marginal, y hacia la Planicie Aluvial y la Cordillera Occidental, coincidente con los sectores por donde la cuenca recibe su recarga.

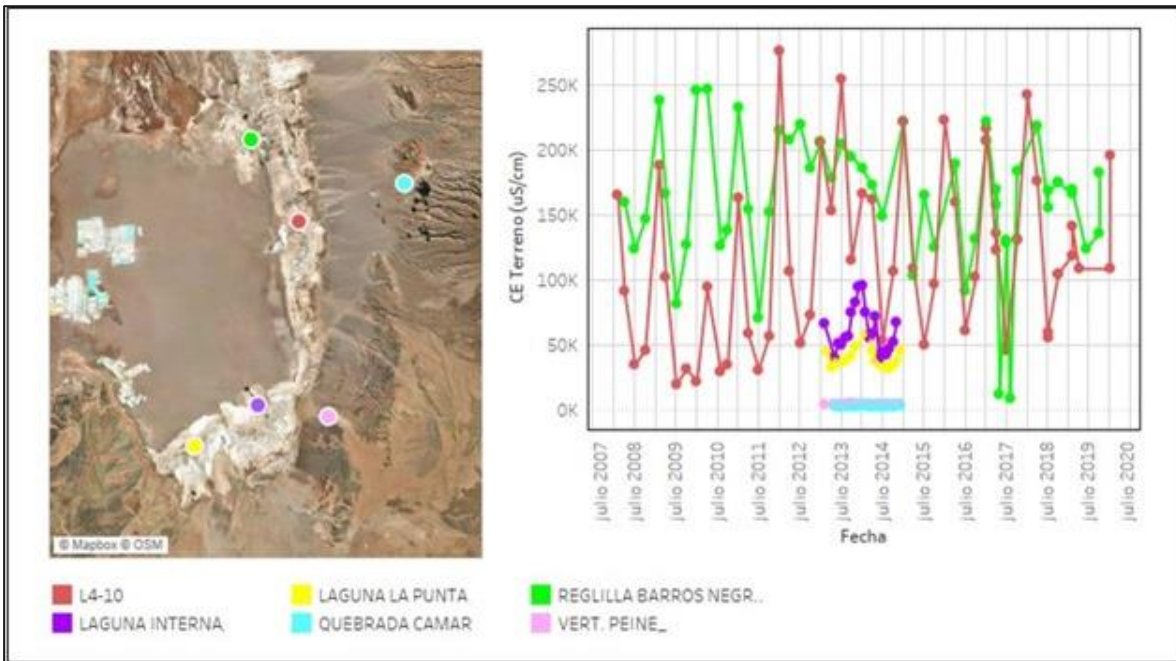


Figura 4-203. Distribución espacial de CE Terreno en aguas superficiales de diferentes sectores del Salar y graficas boxplot de parámetros físico-químicos



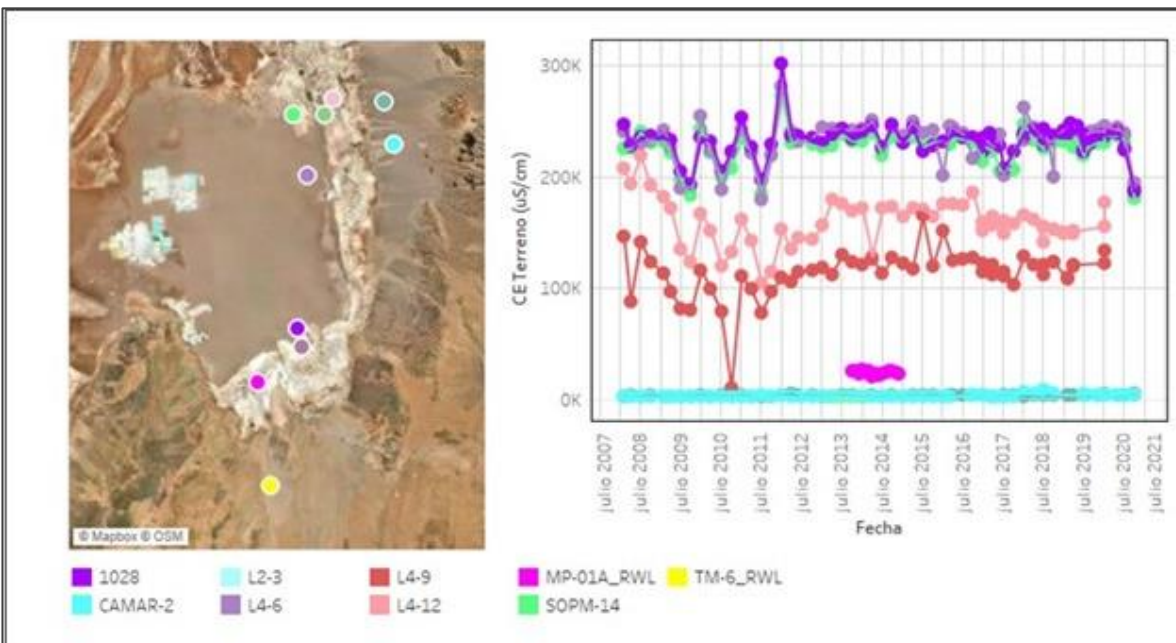
Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-204. Evolución temporal CE Terreno en distintos cuerpos de agua superficial



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-205. Evolución temporal CE Terreno de aguas subterráneas y salmueras en los distintos sectores del Salar Atacama



Fuente: Hidroestudios, 2021.



## 4.3.9.5.1.1.2 Evolución histórica

En las Figura 4-206 a Figura 4-209 se presentan gráficos de evolución histórica de la calidad del agua en pozos de los sistemas de protección ambiental: Soncor, Aguas de Quelana, Peine, Tilopozo y el Núcleo del Salar, junto con la ubicación de estos puntos.

Estos sistemas han sido monitoreados a través del tiempo de acuerdo con lo comprometido en el PSAH del proyecto “Cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama”, lo cuáles están incluidos en los puntos presentados en la Sección 4.3.9.4.2.

En la Tabla 4-94 se indican los rangos de los parámetros fisicoquímicos registrados en los pozos y reglillas monitoreados. El detalle de cada grafico junto mediciones de laboratorio se presentan en el Anexo 8.

**Tabla 4-94 Resumen de caracterización histórica por pozo de los sistemas ambientales**

Pozo	Tipo	pH rango histórico	CE rango histórico (µS/cm)	Densidad rango histórico (g/mL)
<b>Pozos y reglillas de monitoreo</b>				
<b>Sistema Soncor</b>				
L2-4	Pozo	7,2-8,6	6.000-15.500	1,0-1,03
L1-4	Pozo	6,9-7,5	180.0000 - 282.000	1,214 - 1,236
L1-5	Pozo	7,2-7,7	150.000-210.000	1,100-1,150
L1-6	Pozo	7,0-7,7	170.000-220.000	1,140-1,180
L2-3	Pozo	6,8-8,0	2.600-4.500	1,000-1,002
L2-5	Pozo	7,2-7,7	160.000-230.000	1,170-1,210
L7-3	Pozo	7,5-8,7	1.000-11.000	1,000-1,015
L2-6	Pozo	6,9-7,5	200.000-245.000	1,215-1,225
SOPM-14	Pozo	6,9-7,6	200.000-240.000	1,210-1,220
L1-G4-Reglilla	Reglilla	6,9-7,7	160.000-220.000	1,100-1,200
L7-G1	Reglilla	6,8-8,1	90.000-250.000	1,050-1,250
<b>Sistema Aguas de Quelana</b>				
L4-3	Pozo	5,0-7,1	12.000-25.000	1,000-1,008
L4-6	Pozo	6,9-7,6	200.000-260.000	1,200-1,223
L4-8	Pozo	6,9-7,7	60.000-115.000	1,040-1,060
L4-9	Pozo	7,5-8,5	75.000-150.000	1,050-1,010
L4-12	Pozo	7,4-8,4	125.000-200.000	1,070-1,150
L5-3	Pozo	7,4-8,3	2.000-8.500	1,000-1,005
L4-10	Reglilla	7,4-8,7	20.000-220.000	1,000-1,150
<b>Sistema Peine</b>				
L10-1	Pozo	7,7-8,8	9.000-35.000	1,000-1,015
L10-4	Pozo	7,0-7,9	100.000-200.000	1,060-1,120
1028	Pozo	6,7-7,4	200.000-250.000	1,210-1,224

Tabla 4-94 Resumen de caracterización histórica por pozo de los sistemas ambientales

Pozo	Tipo	pH rango histórico	CE rango histórico (µS/cm)	Densidad rango histórico (g/mL)
<b>Pozos de agua</b>				
<b>Sistema Soncor</b>				
Mullay-1	Pozo Bombeo	7,1-8,2	1.500-2.600	1,000-1,002
Allana	Pozo Bombeo	7,0-7,9	3.800-4.400	1,000-1,001
<b>Sistema Aguas de Quelana</b>				
Camar-2	Pozo Bombeo	6,6-7,7	2.000-5.800	1,000-
Socaire-5Socaire-5	Pozo Bombeo	6,6-7,4	2.700-3.500	1,000-
<b>Sistema Vegetación Borde Este</b>				
P2	Pozo Bombeo	7,1-7,9	4.000-18.000	1,000-1,006
<b>Sistemas lacustres</b>				
<b>Sistema Soncor</b>				
Canal de Burro Muerto	Reglilla	7,0-8,9	10.000-140.000	
laguna Barros Negros	Reglilla	6,5-8,8	60.000-240.000	
Laguna Chaxa	Reglilla	6,8-8,3	40.000-200.000	
Laguna Puilar	Reglilla	7,2-8,9	10.000-35.000	
<b>Sistema Peine</b>				
Laguna Salada	Laguna	6,2-10,0	44.000-80.000	
Laguna Saladita	Laguna	6,9-8,8	39.000-80.000	
Laguna Interna	Laguna	6,6-9,8	46.000-80.000	

Fuente: Hidroestudios, 2021.

## 4.3.9.5.1.1.2.1 Parámetros Físicoquímicos en pozos y reglillas de monitoreo

Sistema Soncor

La evolución histórica de los parámetros físicoquímicos medidos en los pozos y reglillas de monitoreo del Sistema Soncor se presenta en la Figura 4-206. Históricamente estos parámetros han sido medidos en los pozos L2-4, L1-4, L1-5, L1-6, L2-3, L2-5, L7-3, SOPM-7 (L2-6), SOPM-14 y en las reglillas L1-G4 Reglilla y L7-G1.

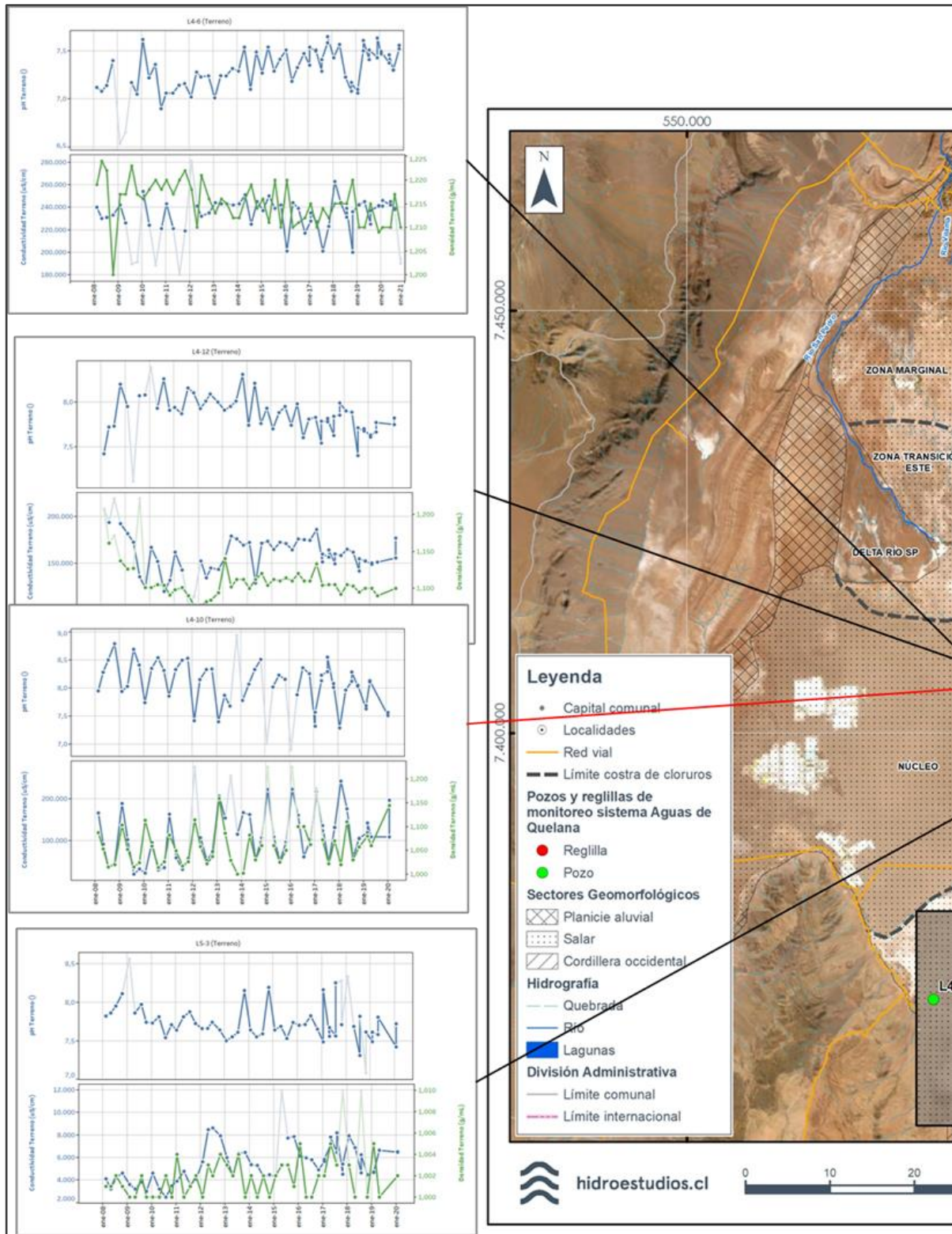
Aquellos pozos perforados en la Planicie Aluvial (L2-3) y en la Zona Marginal de Salar (L2-4 y L7-3), presentan bajos valores de conductividad eléctrica (< 15.000 µS/cm), densidad (1 a 1,03 g/mL). Mientras que en los ubicados en la Zona de Transición se observan elevados valores de CE (100.000 – 280.000 µS/cm), una densidad mayor (1,05 – 2,5 g/mL). Los valores de pH disminuyen desde la Planicie Aluvial hacia la en la Zona de Transición.

### Sector Aguas de Quelana

Los parámetros fisicoquímicos de calidad del agua en los pozos y reglillas de monitoreo del Sector Aguas de Quelana ha sido medido en los pozos L4-3, L4-6, L4-8, L4-9, L4-12, L5-3 y en la reglilla L4-10. La ubicación es estos puntos monitoreados junto con los gráficos que muestran el comportamiento de estos parámetros a través del tiempo se muestran en la

**Figura 4-207. Evolución histórica de la calidad del agua en el Sistema Aguas de Quelana**





Fuente: Hidroestudios, 2021.

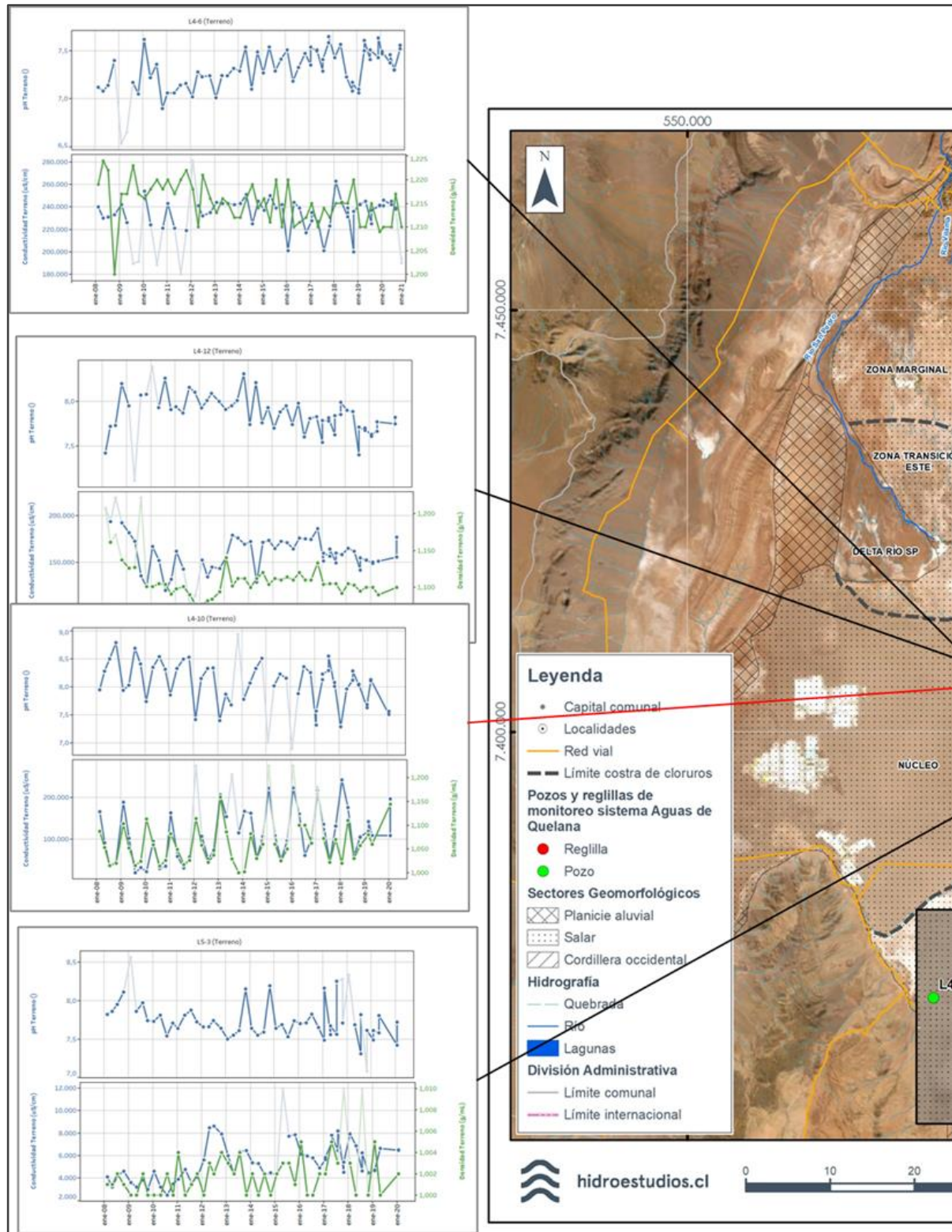
Figura 4-208.

De igual modo que para el Sistema Soncor, se observan menores valores de CE y de densidad en aquellos pozos ubicados en Planicie Aluvial (L4-3, 12.000-25.000) y en la Zona Marginal de Salar (L5-3, L4-8, L4-9 y L4-12. < 200.000). Y mayores valores de CE (200.000-260.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) y de densidad (1,200-1,223  $\text{g}/\text{mL}$ ), en el pozo L4-6, ubicado en el Núcleo del Salar, donde se observan además los menores valores de pH (6,9 – 7,6)

#### Sistema Peine

La calidad química del agua subterránea en el sistema Peine es monitoreada en los pozos L10-1 (en la Planicie Aluvial), L10-4 (en la Zona Marginal) y 1028 (en el Núcleo). La evolución temporal para los distintos parámetros en estos pozos junto con su ubicación se muestra en la

Figura 4-207. Evolución histórica de la calidad del agua en el Sistema Aguas de Quelana



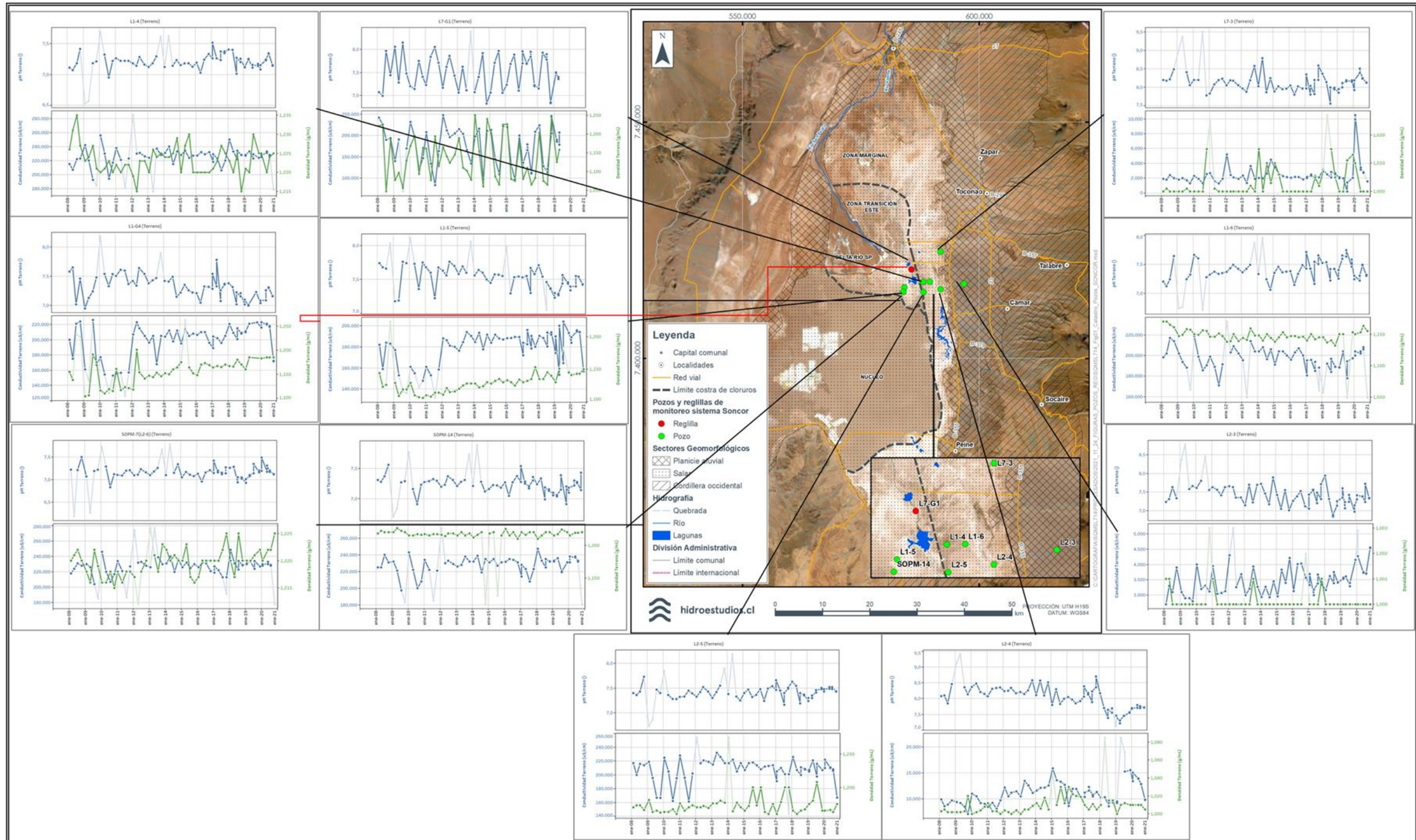
Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-208.

Los parámetros CE y densidad aumentan desde la Planicie Aluvial (CE: 9.000-35.000; densidad: 1,000-1,015 mg/L) hacia el Núcleo del Salar L10-1 (CE: 200.000-250.000; densidad: 1,210-1,224 g/mL), mientras que el pH disminuye en ese sentido (desde 8,8 a 6,7).



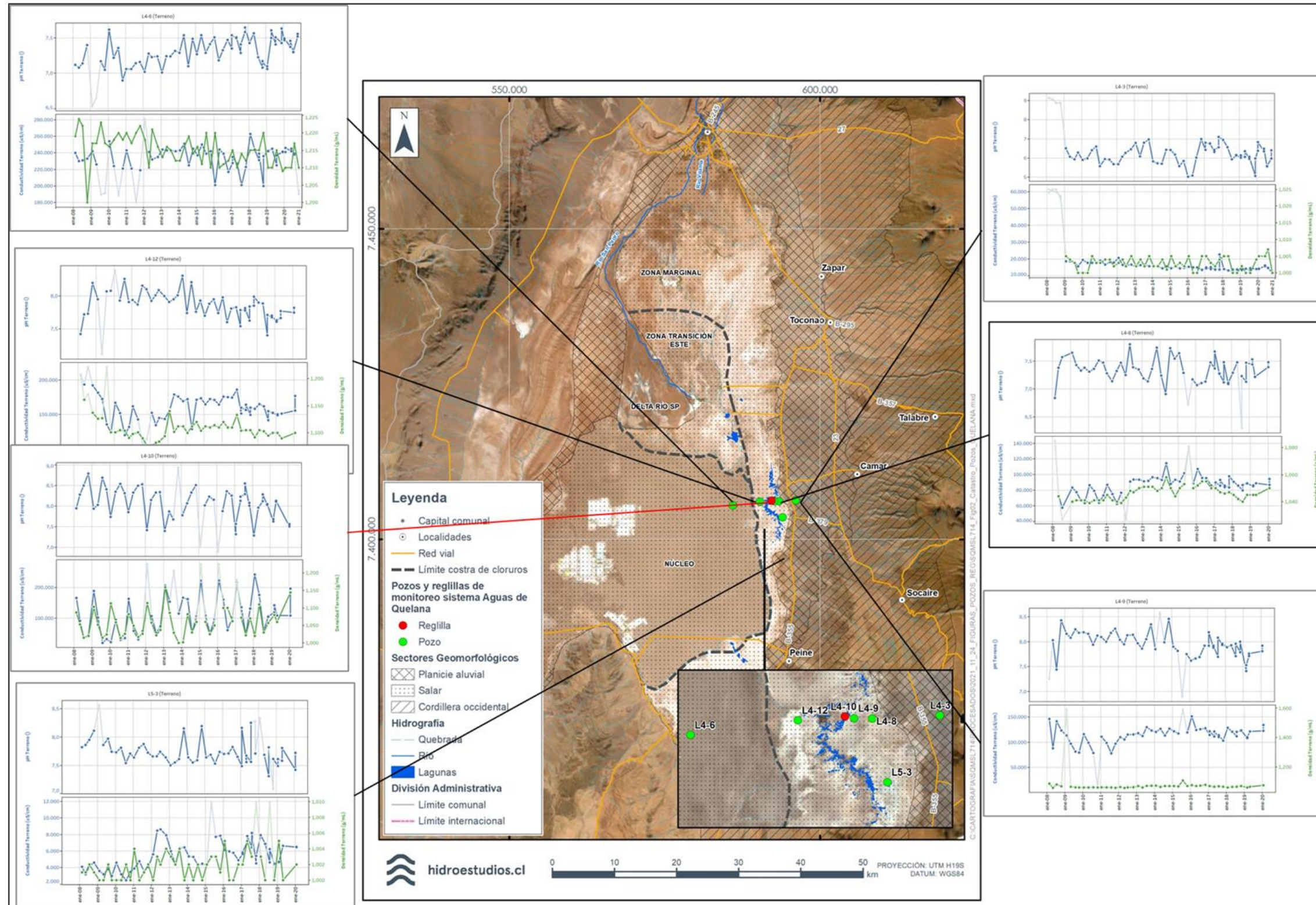
Figura 4-206. Evolución histórica de la calidad del agua en el Sistema Soncor



Fuente: Hidroestudios, 2021



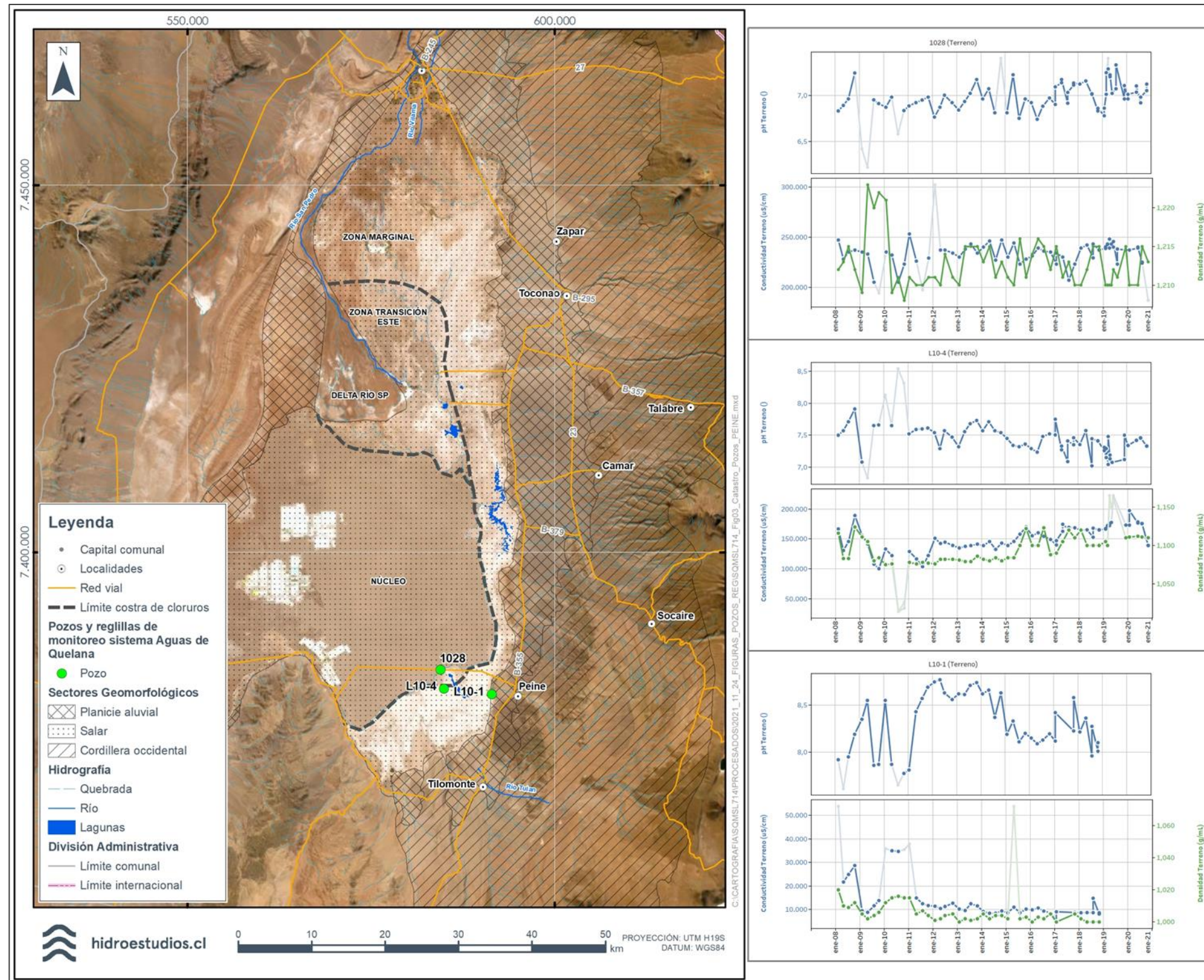
Figura 4-207. Evolución histórica de la calidad del agua en el Sistema Aguas de Quelana



Fuente: Hidroestudios, 2021.



Figura 4-208. Evolución histórica de la calidad del agua en el Sistema Peine



Fuente: Hidroestudios, 2021.

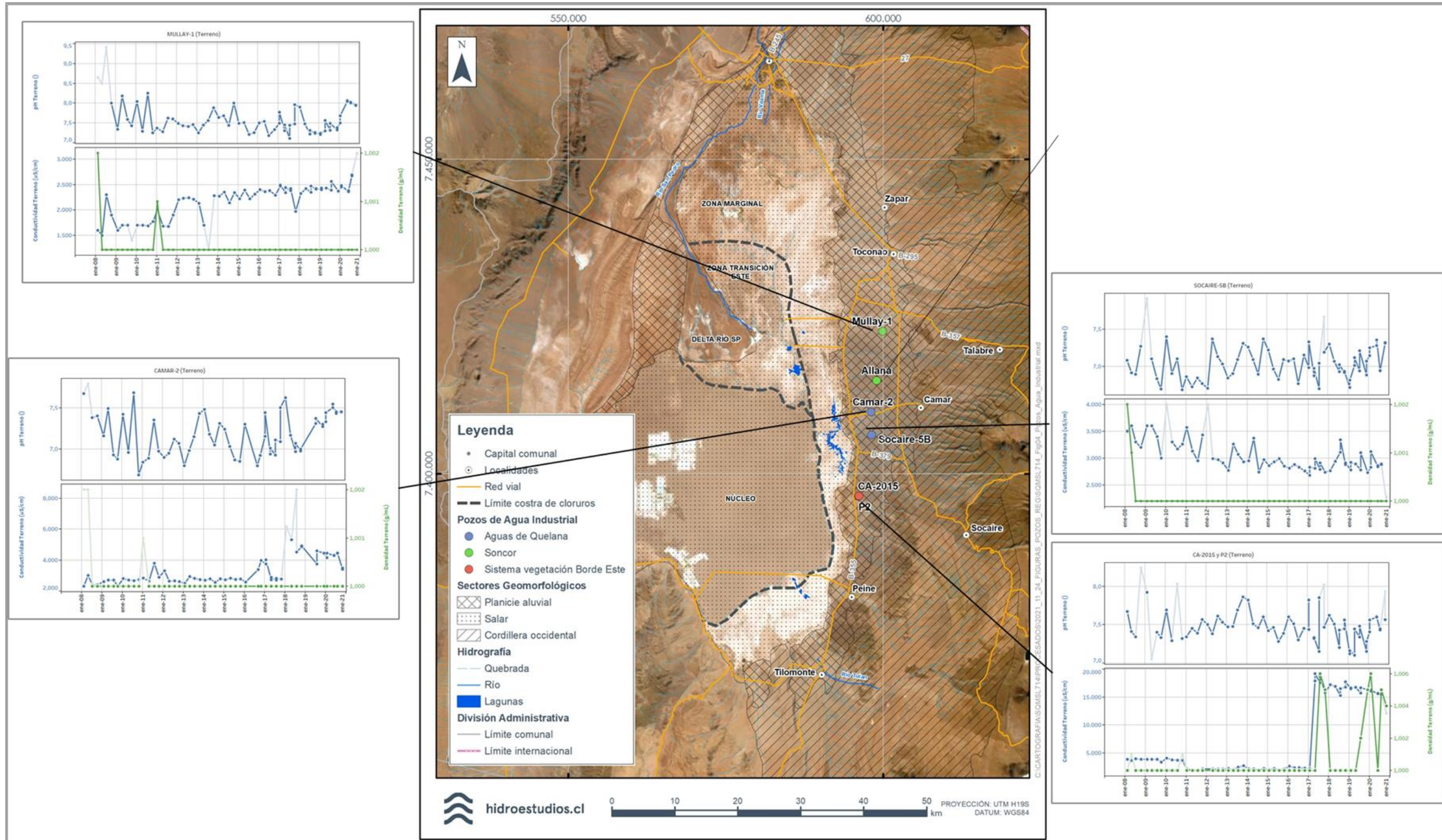
#### 4.3.9.5.1.1.2.2 Parámetros fisicoquímicos en pozos de agua

La evolución histórica de los parámetros monitoreados en los pozos de extracción de agua ubicados en los sistemas Soncor (Mullay-1 y Allana), Aguas de Quelana (Camar-2 y Socaire-5Socaire-5) y del Sector Borde Este (P2 y CA-2015) se muestran en la Figura 4-209.

En los sistemas Soncor y Aguas de Quelana la CE se mantiene en un rango entre 1.500 a 5.800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , la densidad entre 1,000 a 1,002  $\text{mg}/\text{L}$  y el pH entre 6,6 a 8,2, mientras que en el pozo P2 ubicado en el Sistema Vegetación Borde Este la CE y la densidad son levemente mayores (4.000-18.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 1,000-1,006  $\text{mg}/\text{L}$ , respectivamente) y el pH levemente menor (7,1-7,9).



Figura 4-209. Evolución histórica de la calidad del agua en pozos de agua



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.9.5.1.1.2.3 Parámetros Fisicoquímicos en sistemas lacustres

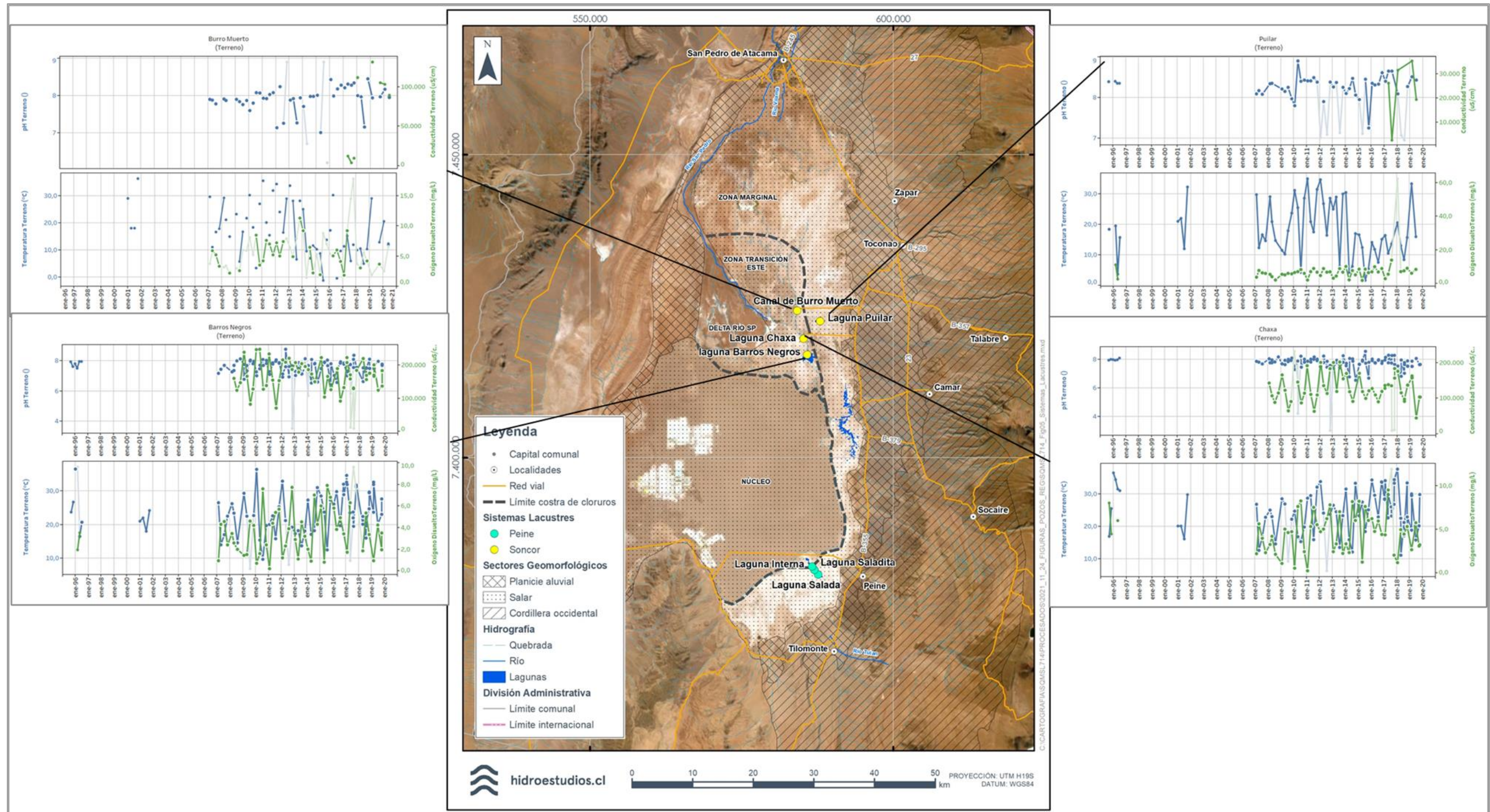
La Figura 4-210 presenta la evolución histórica de los parámetros fisicoquímicos monitoreados en aguas superficiales del canal Burro Muerto y de las lagunas Chaxa, Barros Negros y Puilar, ubicados todos en el Sistema Soncor

La Figura 4-211 presenta la evolución histórica de los parámetros fisicoquímicos monitoreados en aguas superficiales de las lagunas Salada, Saladita e Interna ubicadas en el Sistema Peine.

En ambos sistemas las lagunas muestran una marcada oscilación estacional, con mayores concentraciones de CE y densidad en verano y menores concentraciones en invierno. Además, en cada sistema las concentraciones en las lagunas aumentan al aproximarse al núcleo.



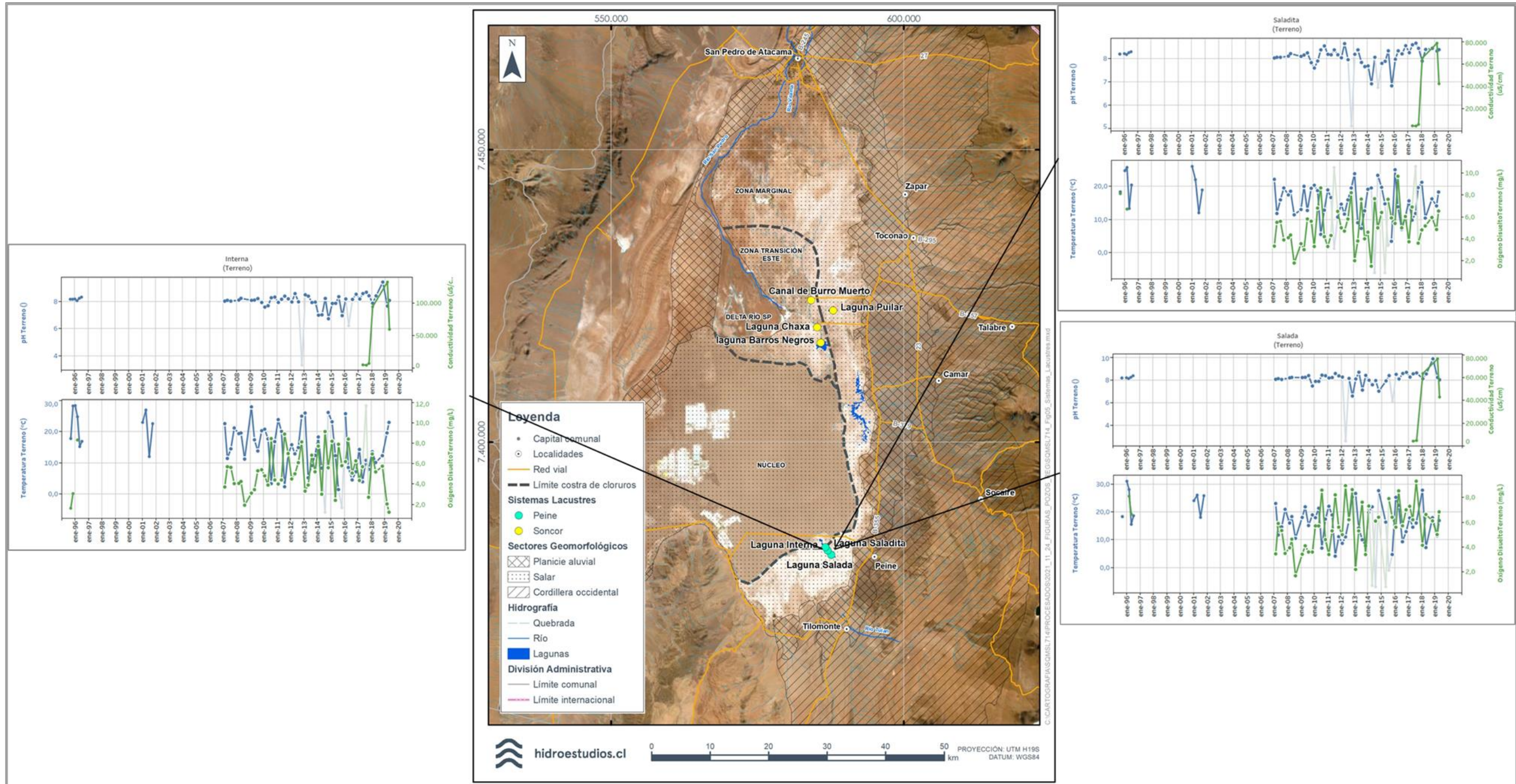
Figura 4-210. Evolución histórica de la calidad del agua en sistemas lacustres del Sistema Soncor



Fuente: Hidroestudios, 2021.



Figura 4-211. Evolución histórica de la calidad del agua en sistemas lacustres del Sistema Peine



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.9.5.1.1.2.4 Elementos mayoritarios

En la Figura 4-212 se muestran los diagramas de Schroeller Berkloff representativos de la mediana en cada unidad geomorfológica para los periodos de verano (diciembre a marzo) e invierno (junio a agosto), mientras que en la Figura 4-213 se exhibe el diagrama de piper por unidad geomorfológica para los datos disponibles para el año 2020. En general, tanto las aguas superficiales como subterráneas tienen composición clorurada sódica. La Planicie Aluvial y la Cordillera Occidental presentan una composición más carbonatada y sulfatada frente al resto de zonas netamente cloruradas sódicas.

En el caso de las aguas subterráneas, puede verse que las concentraciones más bajas se encuentran en la Planicie Aluvial y Cordillera Occidental, correspondiendo con los sectores de recarga a la cuenca. A medida que el agua fluye hacia el núcleo, las concentraciones aumentan progresivamente. Puede verse que estos puntos apenas presentan estacionalidad, mostrando similares valores en verano e invierno.

Las aguas superficiales presentan una clara tendencia al aumento en sus concentraciones en dirección al núcleo, presentando valores máximos en la Zona Transición Este. Se observa una marcada estacionalidad, en las zonas Marginal, Núcleo y Transición Este, debido a que presentan mayores concentraciones en verano que en invierno.

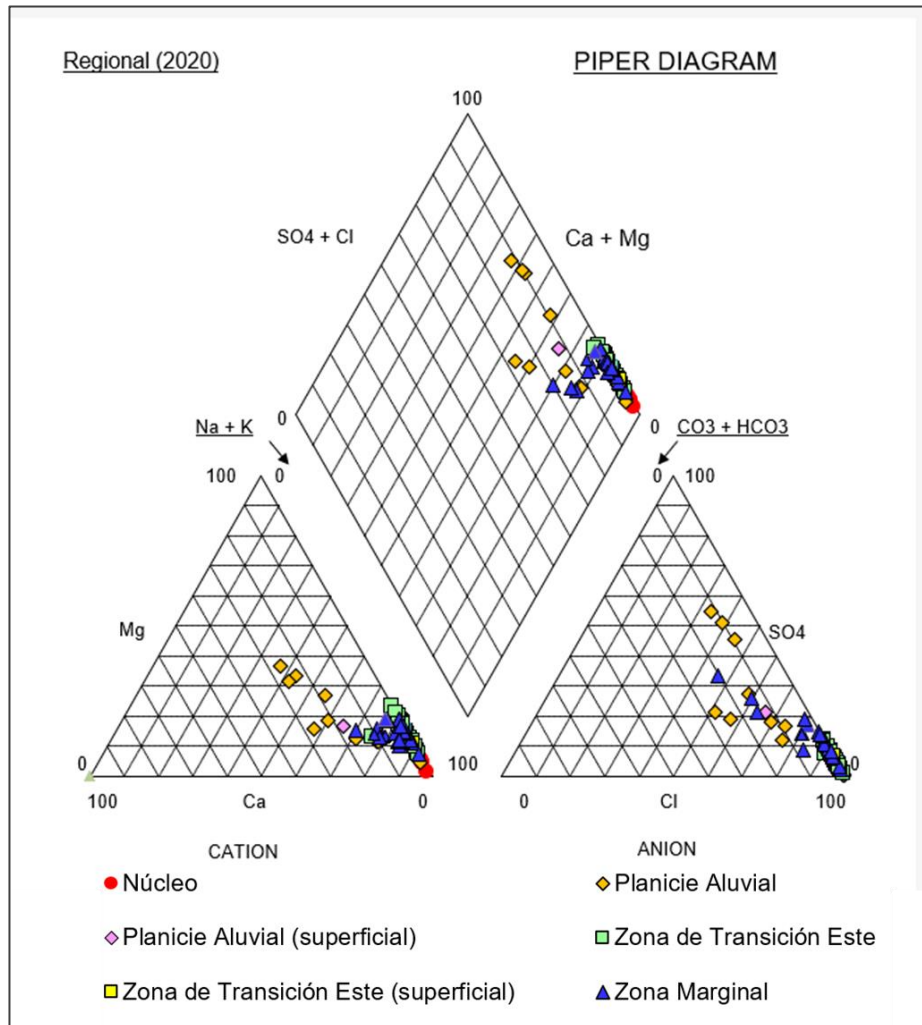
Figura 4-212. Diagramas Schröeller Berkaloff para las distintas unidades geomorfológicas en verano (diciembre a marzo) e invierno (junio a agosto) Ceq: Concentración equivalente en (meq/L)



Fuente: Hidroestudios, 2021



Figura 4-213. Diagrama de piper por unidad geomorfológica, muestras subterráneas y superficiales. (ene-nov 2020)



Fuente: Hidroestudios, 2021.

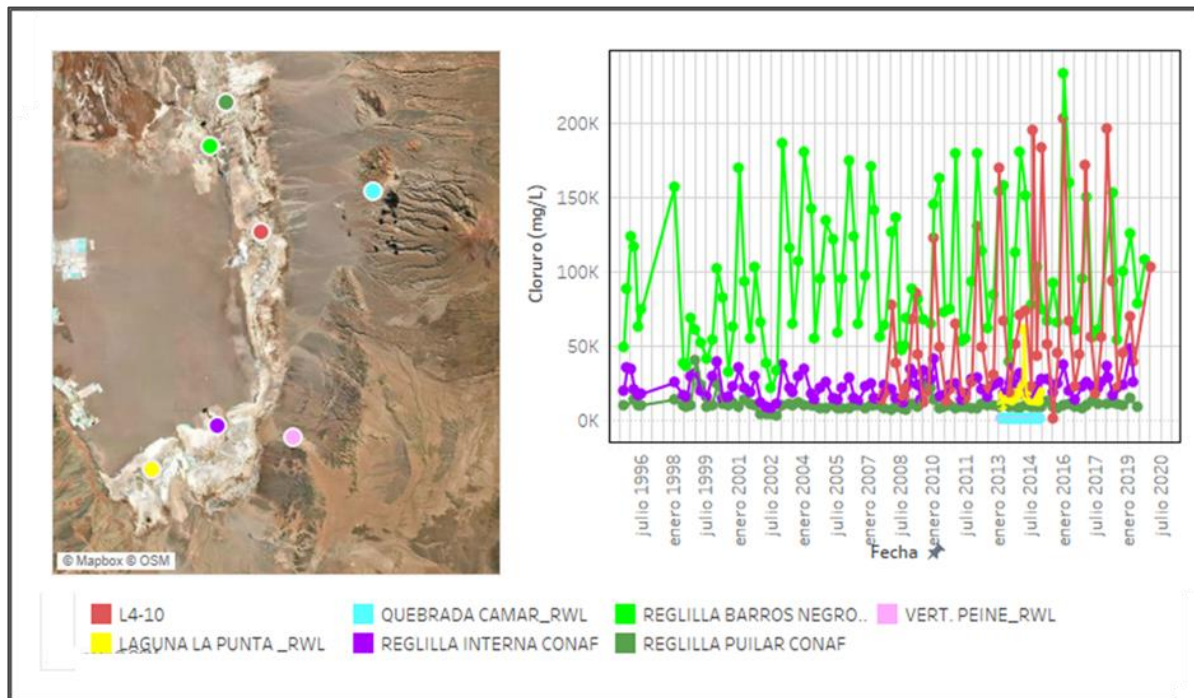
La evolución temporal de cloruros en diferentes cuerpos superficiales de la cuenca Salar de Atacama se muestra en la Figura 4-214, en donde, se destaca que el agua proveniente de quebradas ubicadas en la Cordillera Occidental, al oriente del Salar (Quebrada Camar y Vertiente Peine, sobrepuestos) apenas presentan estacionalidad y sus concentraciones son bajas (<1.000 mg/L), representando éstas el agua de recarga. Al acercarse al núcleo se encuentran afloramientos, como el que da origen a la laguna Puilar en Soncor, con concentraciones levemente superiores, aunque también bajas (3.000 - 14.000 mg/L) y presentando leves variaciones por estacionalidad. Los puntos más próximos al núcleo presenta estacionalidades más marcadas como consecuencia del efecto de la evaporación, presentando máximos en verano y mínimos en invierno. De manera similar a lo que se observaba con la CE Terreno, las concentraciones de cloruro alcanzadas en estiaje son mucho más altas en los cuerpos lagunares de Barros Negros (Soncor) y L4-10 (Quelana), en donde alcanzan valores de Cloruros de ~ 240.000 mg/L, que en los del sur: La punta (Tilopozo) e Interna (Peine), lo



que sugiere que la tasa de renovación de aguas es menor en los sistemas lagunares del norte respecto a los del sur.

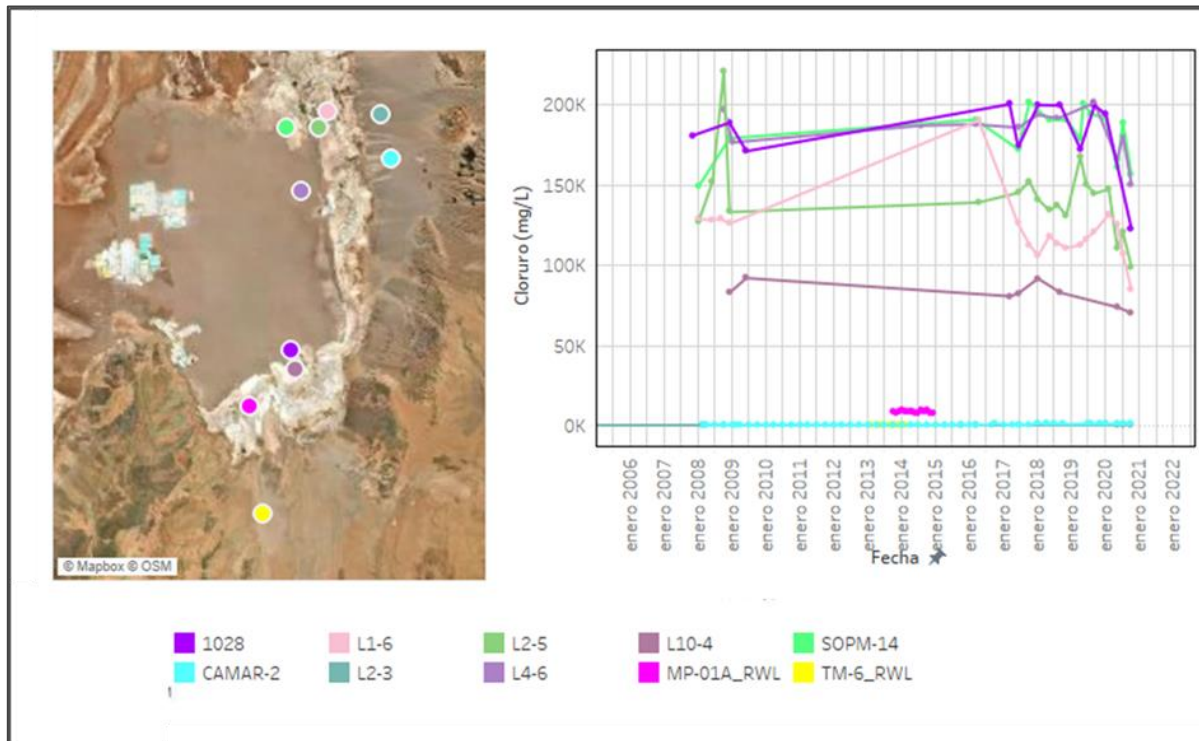
El comportamiento del cloruro registrado en las aguas subterráneas (ver Figura 4-215) es similar al observado en las aguas superficiales, es decir, baja concentración de cloruro en pozos ubicados en la Planicie Aluvial (L2-3 y CAMAR-2), del orden ~ 200 - 1.500 mg/L, y en la Cordillera Occidental (pozo TM-6\_RWL) del orden de Cl~300 mg/L sin oscilación estacional en ambos casos. Luego, al acercarse al Núcleo, en la Zona Marginal (pozos MP-01a\_RWL, L10-4, L2-5, L1-6) los valores de cloruros varían entre 8.000 y 170.000mg/L . Las aguas subterráneas presentes en el núcleo registran las más elevadas concentraciones de cloruro, alcanzando valores de 240.000 mg/L, con una nula variación estacional, presentado mínimos de 130.000 mg/L. El pozo mostrado para la Zona de transición (SOPM-14) presenta un comportamiento análogo a los puntos del núcleo.

Figura 4-214 Evolución cloruros en cuerpos agua superficial y zona transición marginal – lagunar



Fuente: SQM Salar (2021a )

Figura 4-215. Evolución temporal cloruros en aguas subterráneas y salmueras en los distintos sectores del Salar Atacama



Fuente: Hidroestudios, 2021.

4.3.9.5.1.2 Isótopos estables

Los isótopos estables del agua ( $\delta D$ ,  $\delta 18O$ ) son una herramienta que permite entender la dinámica del flujo de agua subterránea regional. Éstos aportan información complementaria con la hidroquímica que ayuda a identificar la recarga de aguas subterráneas, fuentes, interconexión de acuíferos, y trayectoria de flujo de agua subterránea.

Para realizar la caracterización isotópica en el contexto general, se recopiló toda la información disponible de isótopos estables del agua ( $\delta D$ ,  $\delta 18O$ ). Obteniéndose un total de 5.120 muestras de isótopos (Anexo 15), de las cuales 3.900 muestras fueron recolectadas desde 396 puntos de aguas subterráneas, 1.189 muestras desde 133 puntos de aguas superficiales y 31 muestras desde 6 puntos de agua de lluvia. Con estos datos se realizó una caracterización general de las zonas definidas. La distribución espacial de estos puntos y las unidades geomorfológicas en las que se encuentran se presenta en la Figura 4-196.

A continuación, se presenta una serie de gráficos de la relación  $\delta 2H$ - $\delta 18O$  para los diferentes sectores caracterizados en el contexto general, en donde la composición isotópica se comparó con la Línea Meteorica Local (LMWL) definida por Aravena et al., 1999. Se indica además la Línea meteórica local sin exceso de deuterio

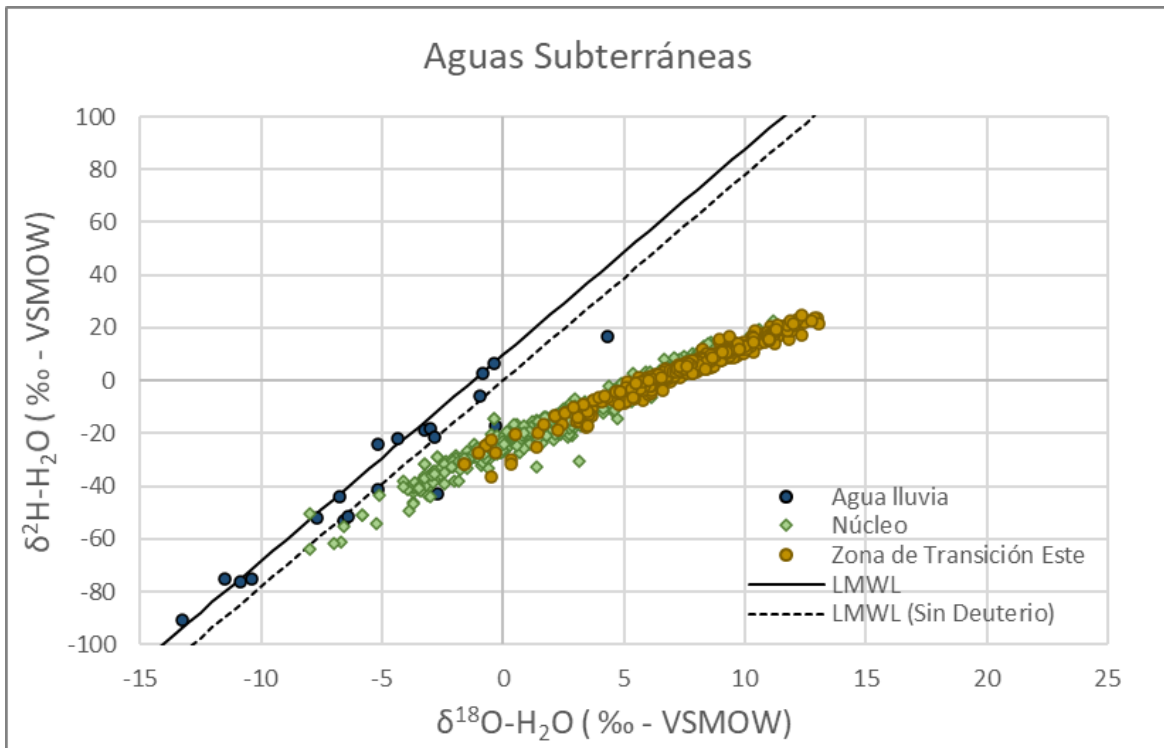
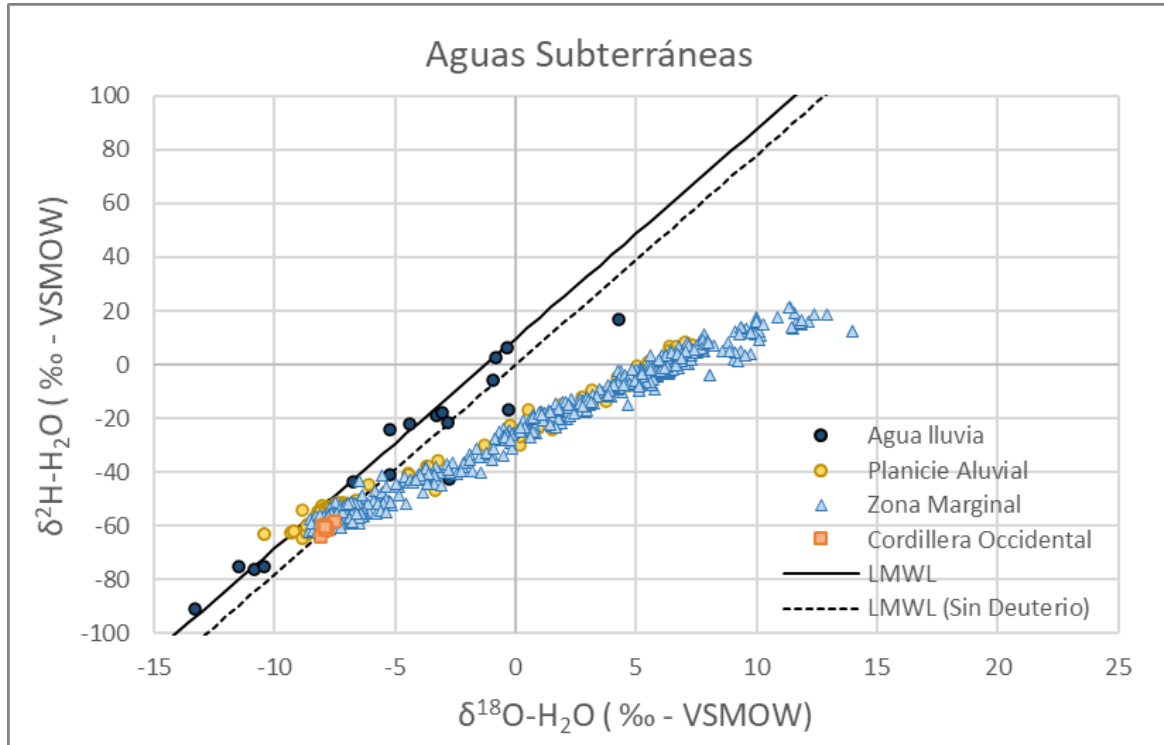
La LMWL definida por Aravena et al. (1999), calculada con datos isotópicos de muestras de agua de lluvia del norte de Chile, se expresa como:

$$\delta ^2H = 7,8 \cdot \delta^{18}O + 9,7 (\text{‰})$$

En la Figura 4-216 se observa que existen tres grupos de muestras para aguas subterráneas: el primero, que se alinea según la LMWL, corresponde a las aguas de lluvia colectadas. El segundo grupo corresponde a muestras que se encuentran entre la LMWL y LMWL sin deuterio, que representan las aguas de recarga infiltradas desde los Altos Andinos; estas muestras apenas han sido afectadas por evaporación, lo que sugiere que su infiltración post precipitación fue rápida. El tercer grupo, donde se ubica la mayoría de las muestras caracterizadas a escala regional, sigue la tendencia de una línea de evaporación local (LEL), que también corresponde con una línea de mezcla entre aguas más y menos evaporadas.

En el tercer grupo, las aguas más empobrecidas corresponden con la descarga de la Planicie Aluvial en la Zona Marginal y a medida que se avanza hacia el sector de afloramiento de la interfaz aumenta el enriquecimiento isotópico encontrándose los valores máximos en la zona marginal al Oeste de la interfaz, en la Zona transición Este y en las zonas del Núcleo más próximas a la zona marginal (al oeste de la interfaz salina). Estos sectores con alto enriquecimiento denotan que la evaporación es un proceso muy importante en la Zona Marginal, Zona Transición Este y el sector del Núcleo más próximo a la Zona Marginal. Existe un grupo de muestras de la Planicie Aluvial que se encuentran evaporadas, presentando lineación según LEL. Se trata de puntos que por su profundidad interceptan la interfaz salina de manera que representan una mezcla entre el agua del aluvial y la salmuera del núcleo en distintas proporciones.

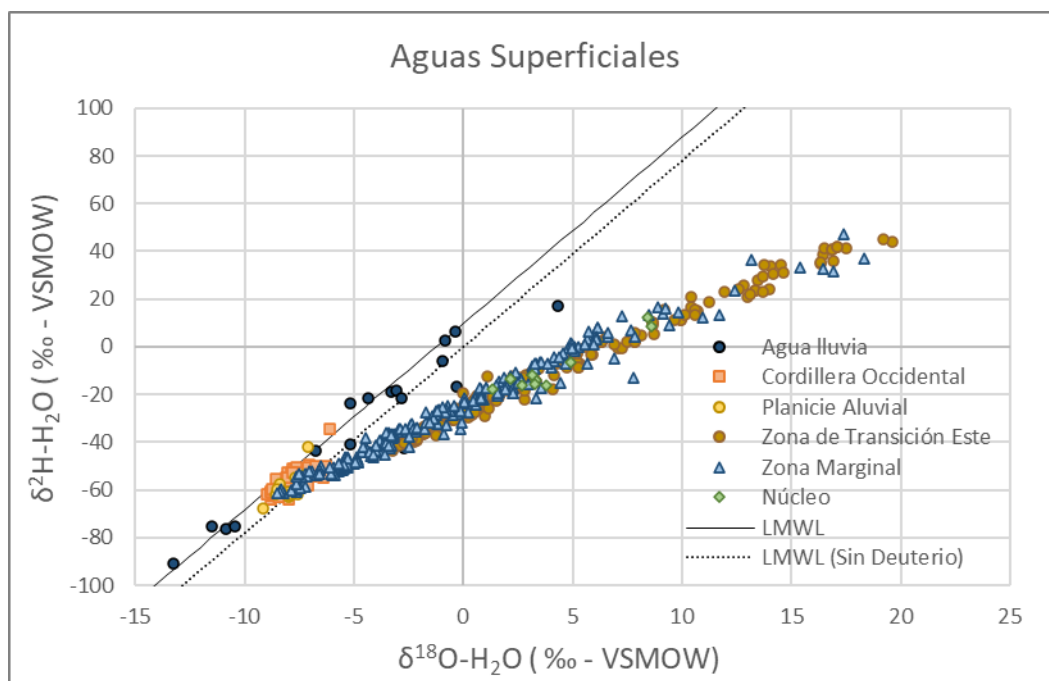
Figura 4-216. Análisis isotópicos de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  de agua subterránea



Fuente: Hidroestudios, 2021.

En la Figura 4-217 se muestra la distribución  $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$  para las aguas superficiales. De manera similar a las aguas subterráneas, las aguas superficiales en la Cordillera Occidental y Planicie Aluvial (también corresponden a quebradas) se alinean con la LMWL, lo que indica que estas aguas apenas han sido afectadas por evaporación desde su infiltración en las zonas altas de la cuenca, sugiriendo una rápida infiltración en las zonas de recarga. Puede verse que la Zona Marginal presenta aguas poco enriquecidas, que representan la descarga de la Planicie Aluvial y a medida que se avanza hacia el núcleo los enriquecimientos aumentan, siendo máximos en los cuerpos de agua terminales de cada sistema lagunar o en el entorno entre el sector del Núcleo y la Zona Marginal y en la Zona Transición Este.

Figura 4-217. Análisis isotópicos de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  de agua superficial



Fuente: Hidroestudios, 2021.

La distribución espacial de los isótopos  $\delta^{18}\text{O}$  para los puntos subterráneos muestreados puede verse en la Figura 4-218 donde se presenta la mediana de los resultados de  $\delta^{18}\text{O}$  para los puntos. Además, se encuentran gráficos tipo boxplot para cada una de las unidades geomorfológicas del Salar de Atacama.

Puede verse que la distribución espacial de los isótopos es muy similar a la encontrada en la química y los parámetros fisicoquímicos. La Cordillera Occidental y la Planicie Aluvial presentan los valores más empobrecidos en  $\delta^{18}\text{O}$  representando el agua de recarga infiltrada desde los Altos Andinos, con valores entre a -7 y -8‰. En general se observa un gradiente, aumentando el enriquecimiento isotópico al acercarse al núcleo por el efecto de la evaporación que comienza a actuar debido a la somerización de niveles originada por la llana topografía de la zona marginal y el encuentro de las aguas de recarga con densidad cercana a 1 con la interfaz salina con densidades de salmuera, cercanas a 1,23 g/mL.

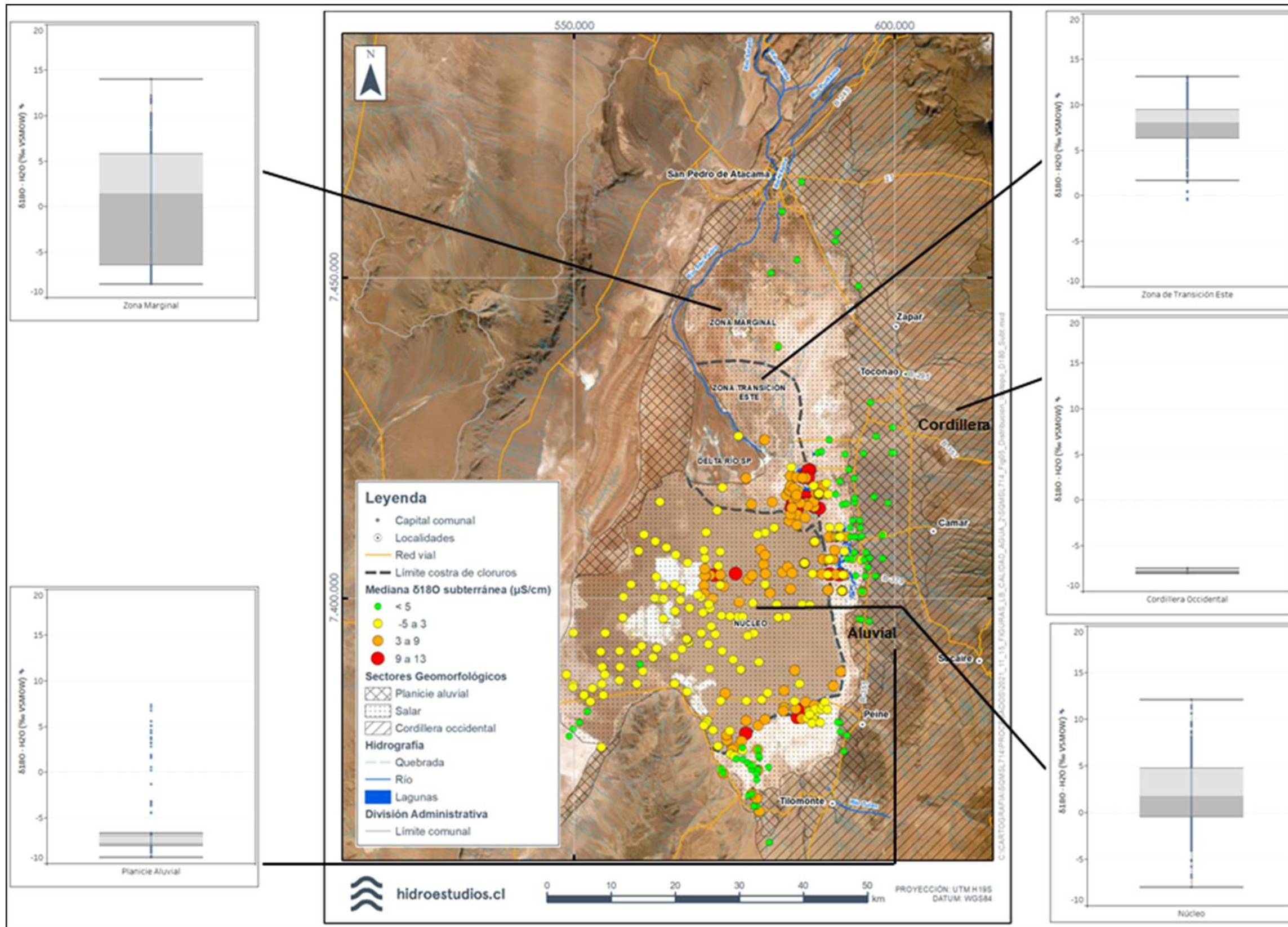
En el núcleo se observan valores menos enriquecidos que en la Zona Marginal. Este hecho sugiere la existencia de un flujo desde el núcleo hacia la zona marginal donde se evaporan los fluidos en el contacto entre



ambas unidades, presentando enriquecimientos mayores que en el resto del núcleo. Al sur del sistema Tilopozo, se encuentra una zona con valores más empobrecidos en  $\delta^{18}\text{O}$  que el entorno inmediato, lo que se interpreta como una entrada de flujo al sistema del Núcleo.

Respecto de los gráficos Boxplot, puede verse que la Planicie Aluvial presenta los menores enriquecimientos, con algunas excepciones que corresponden a puntos profundos que intersectan la interfaz salina en profundidad. La Zona Marginal presenta una gran amplitud en sus resultados  $\delta^{18}\text{O}$ , coherente con ser una zona de transición entre salmuera y agua – salobre. En zona del Núcleo se observan enriquecimientos entre -1 y 5%, correspondientes a los cuartiles del gráfico de caja.

Figura 4-218 Mediana isótopo  $\delta^{18}O-H_2O$  en puntos subterráneos y gráficos tipo boxplot por zona



Fuente: Hidroestudios, 2021

## geobiota

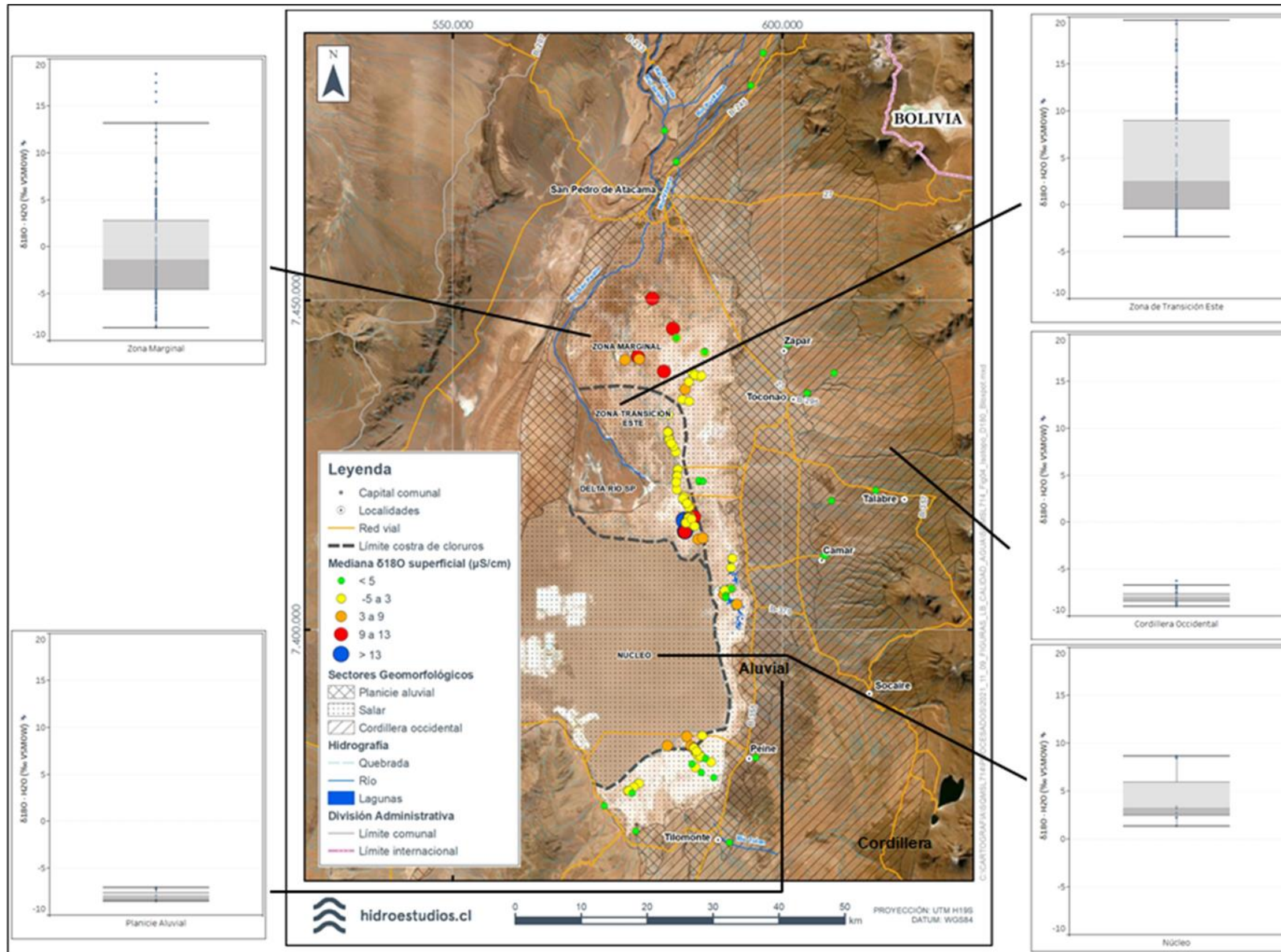
---

En la Figura 4-219 se presenta la mediana de los resultados de  $\delta^{18}\text{O}\text{-H}_2\text{O}$  para los puntos superficiales y gráficos tipo caja para las distintas Unidades Geomorfológicas. En el extremo norte de la Zona Marginal, se observan algunas lagunas con enriquecimientos en  $\delta^{18}\text{O}$  mayores a los que dan origen al canal de Burro Muerto en Llano del Tambillo. Estos sistemas lagunares funcionan como sistemas aislados y sometidos a una intensa evaporación, sin mostrar interacción con el resto del sistema Soncor. En el sector del Llano del Tambillo aparecen unas surgencias que dan origen a dos canales que aguas abajo confluyen formando el canal de Burro Muerto. Estos puntos presentan  $\delta^{18}\text{O}$  próximo a  $-5\text{‰}$ . Al avanzar al sur las aguas se enriquecen a valores entre  $-5$  y  $3\text{‰}$ , encontrándose los valores más elevados en la laguna Barros Negros y sus zonas de desborde.

El resto de los sistemas, las quebradas del este y zona aluvial presentan enriquecimientos en  $\delta^{18}\text{O}$  característicos del agua de recarga próximos a  $-8\text{‰}$ . Al aproximarse al núcleo se encuentran valores más elevados de  $\delta^{18}\text{O}$ , aumentando a medida que se aproximan los puntos hacia el núcleo. Respecto los gráficos boxplot, puede verse que las menores amplitudes se encuentran en Planicie Aluvial y Cordillera Occidental, la mayor amplitud en la Zona Marginal y los valores más elevados en la Zona Transición Este.



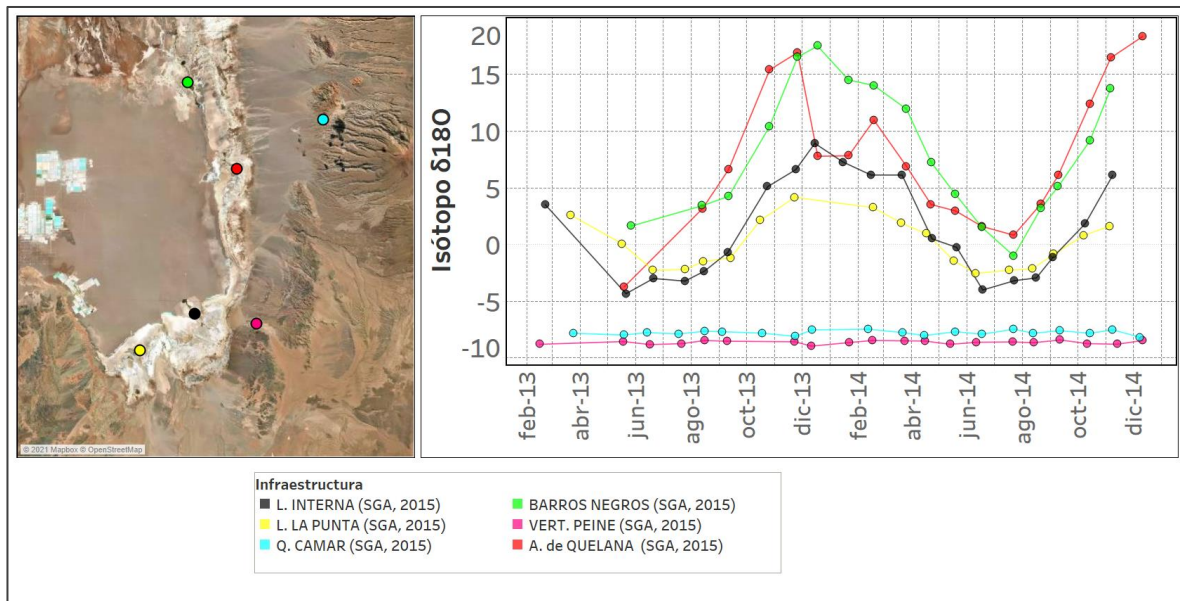
Figura 4-219 Mediana isótopo  $\delta^{18}O-H_2O$  en puntos superficiales y gráficos tipo boxplot por sector geomorfológico



Fuente: Hidroestudios, 2021

La Figura 4-220 muestra la evolución temporal de  $\delta^{18}\text{O}$  en varios cuerpos de agua superficial. Los puntos más periféricos (Camar y Peine), que corresponden a quebradas, no presentan estacionalidad y su enriquecimiento en  $\delta^{18}\text{O}$  es próximo a  $-8\text{‰}$ , representando el agua de recarga. Los puntos más próximos al núcleo tienen estacionalidades muy marcadas como consecuencia del efecto de la evaporación, presentando máximos en verano y mínimos en invierno. De manera similar a lo que se mostraba con la CE Terreno y cloruros en apartados anteriores, los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  alcanzados en estiaje son mucho más altas en los sistemas de Quelana (A. de Quelana) y Soncor (Barros Negros), lo que sugiere que la tasa de renovación de estos cuerpos es menor que en los cuerpos de Peine (Interna) y Tilopozo (La Punta).

Figura 4-220. Evolución temporal aguas superficiales en Salar Atacama.



Fuente: SQM Salar (2021a )

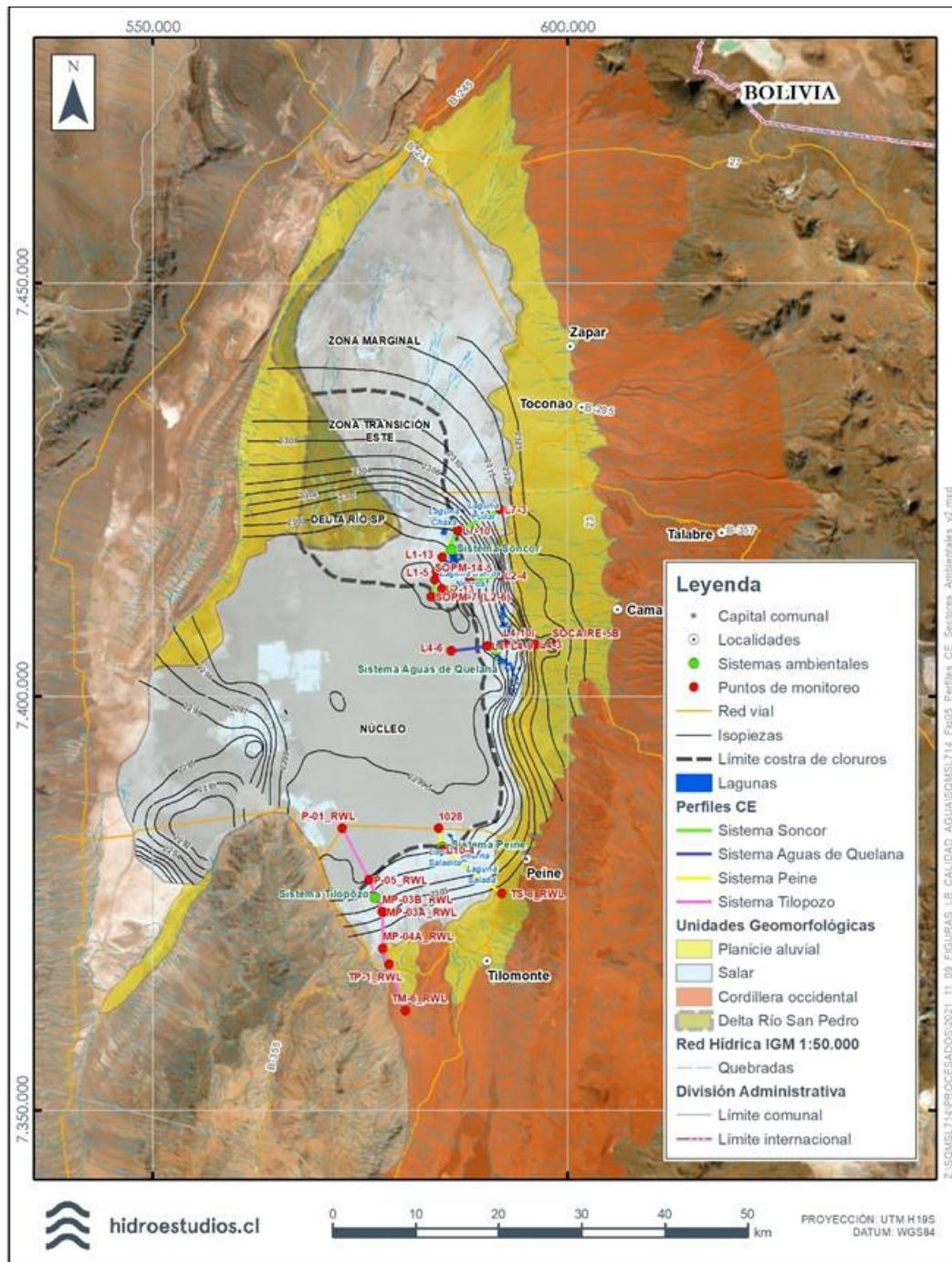


#### 55555 Caracterización Sistemas Locales

En esta sección se muestran los resultados que permiten caracterizar la calidad de aguas del contexto general, a escala local en las zonas de interés ambiental: Sector Soncor, Sector Aguas de Quelana, Sector Peine y Sector Tilopozo.

Para cada sector de interés ambiental, se presenta en detalle para los parámetros fisicoquímicos la evolución espacial y temporal de la conductividad eléctrica. Para esta se han confeccionado perfiles longitudinales desde el margen oriental hasta el núcleo del salar. En la Figura 4-221 se exhiben los perfiles de conductividad eléctrica que cruzan los diferentes sectores. Para estos perfiles se han considerado pozos con registro histórico extenso, para dar cuenta de la variación temporal de la Conductividad Eléctrica (CE) de Terreno. Además, se han graficado en paralelo las precipitaciones diarias en las estaciones meteorológicas ubicadas en las cabeceras de las cuencas aportantes de cada sector, con el objetivo de visualizar la posible relación entre eventos de precipitación y sus efectos sobre la salinidad de las aguas, con excepción del Sistema Soncor, para el cual no se cuenta con el registro de la estación Toconao Experimental posteriores a 2007

Figura 4-221 Ubicación de perfiles de conductividad eléctrica analizados. Isopiezas año 2020



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.9.5.1.3 Sistema Soncor

En el presente apartado se realiza una descripción de la información hidroquímica e isotópica disponible para el sistema Soncor, caracterizando las distintas zonas según sus parámetros FQ, química e isótopos de H<sub>2</sub>O. Un mayor detalle sobre el funcionamiento del sistema Soncor y los procesos que afectan a los fluidos puede consultarse en SQM Salar (2021e)

##### 4.3.9.5.1.3.1 Parámetros Físicoquímicos

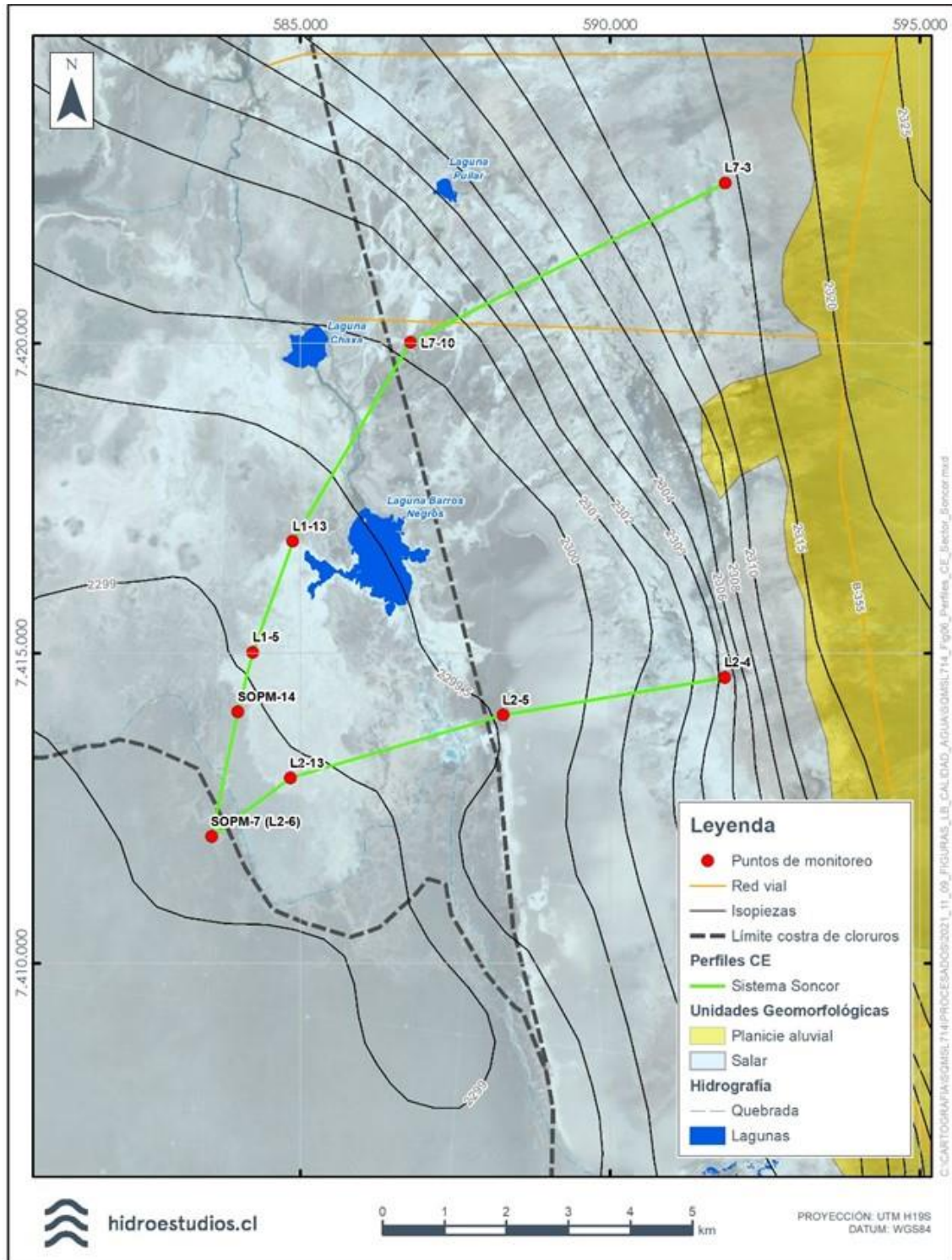
###### 4.3.9.5.1.3.1.1 Evolución Espacial y Temporal de la Conductividad Eléctrica

La evolución espacial y temporal de la CE se ha evaluado a partir 2 perfiles ortogonales a las isopiezas de niveles subterráneos, los cuales se pasan desde la Zona Marginal, Zona de Transición Este, y terminan en el Núcleo (Figura 4-222).

El perfil del norte se extiende desde el pozo L7-3, hasta el pozo SOPM-7(L2-6), interceptando al canal Burro Muerto en la sección comprendida entre las lagunas Chaxa y Barros Negros.

Más al sur, un segundo perfil se extiende desde el pozo L2-4 por el este, hasta el SOPM-7(L2-6), cruzando una zona de inundación estacional llamada Desborde Sur al sur de Laguna Barros Negros.

Figura 4-222. Ubicación de perfiles de CE Terreno analizados en Sector Soncor. Isopiezas año 2020



Fuente: Hidroestudios, 2021.



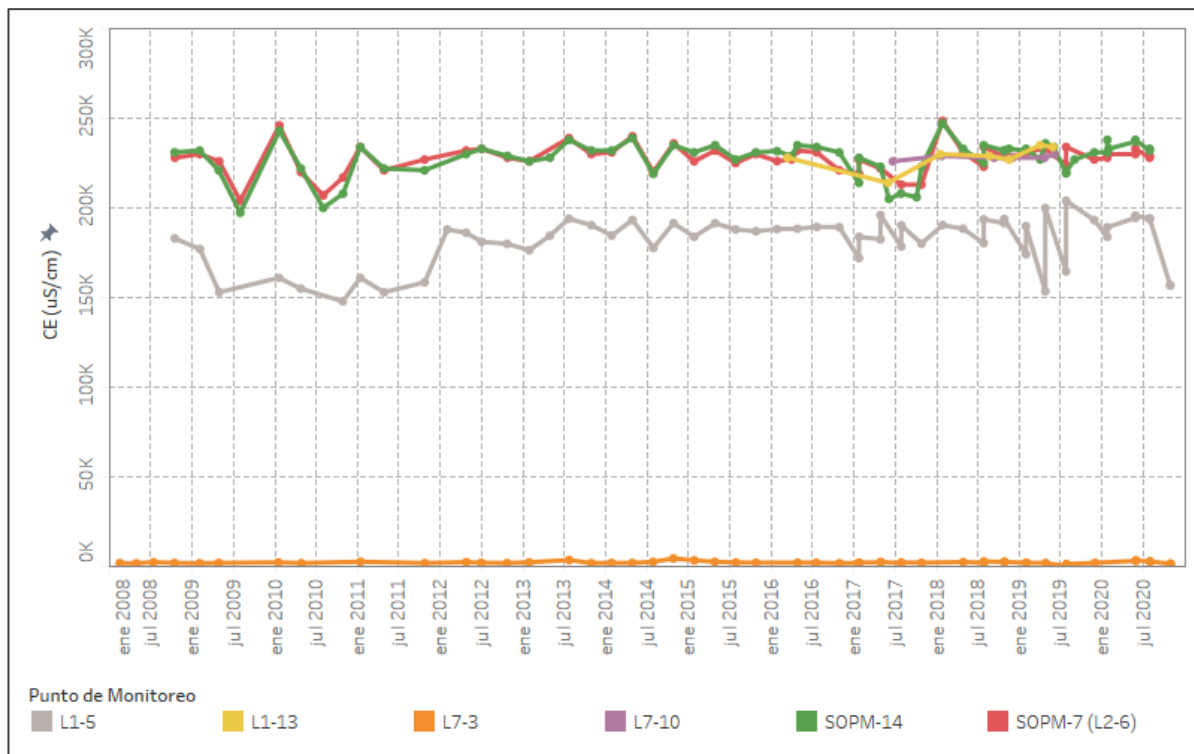
Desde la Figura 4-223 hasta la Figura 4-226 se muestra la CE por pozo en función del tiempo para los 2 perfiles definidos en la Figura 4-222.

En los 2 perfiles es posible observar que los pozos ubicados en el sector Zona Marginal próximos a la Planicie Aluvial (pozos L7-3 y L2-4) presentan CE cercanas a 2 y 15 mS/cm, respectivamente.

Por su parte, los pozos ubicados en la Zona Marginal próximos a la Zona Transición Este (pozos L7-10 y L2-5) y los pozos en la Zona de Transición Este (pozos L1-13, L1-5, SOPM-14, y L2-13) se caracterizan por una CE en torno a 230 mS/cm, con la excepción de L1-5. Las bajas CE en L1-5 se explican por los aportes desde el desborde de Barros Negros desde Cola de Pez. Estos desbordes por el oeste son menos frecuentes desde 2012, por lo que este punto presenta tendencia al alza en sus valores (IDAEA-CSIC, 2018; Hidroestudios, 2021).

Teniendo en cuenta el cambio abrupto de CE entre los pozos L7-3 y L7-10 en un perfil, y entre el pozo L2-4 y L2-5, es posible sugerir que el límite salino se encuentre en el sector comprendido entre los pares de pozos.

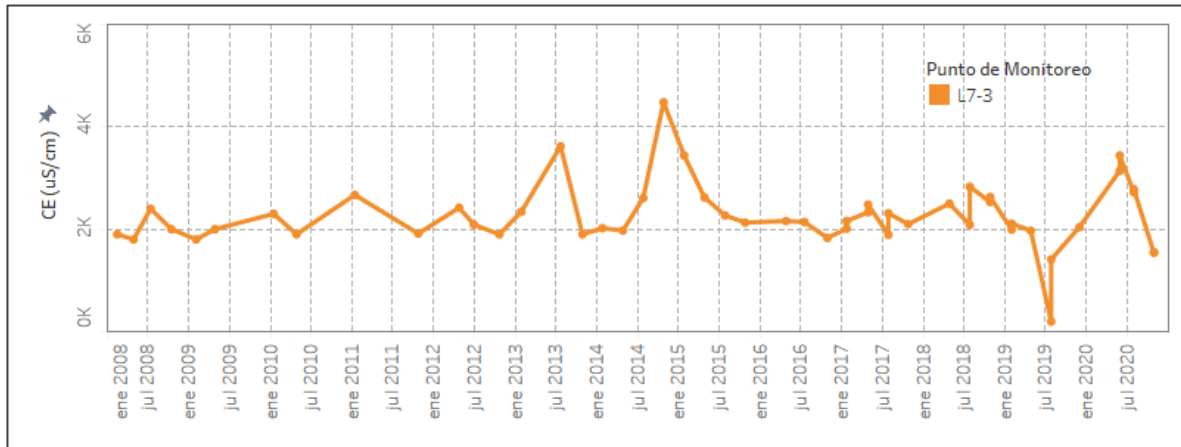
Figura 4-223. Evolución temporal de la conductividad eléctrica de terreno de Sistema Soncor en perfil Norte, entre L7-3 y SOPM-7(L2-6)



Fuente: Hidroestudios, 2021

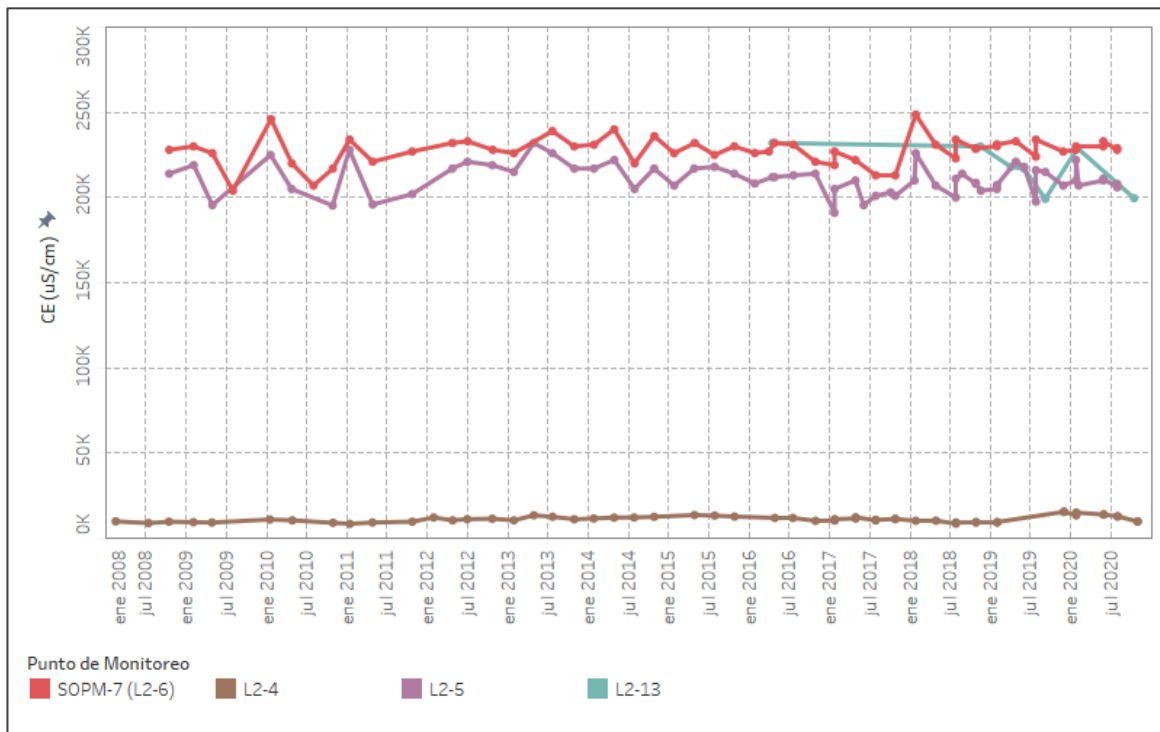


Figura 4-224. Evolución temporal de la CE de Terreno de Sistema Soncor, entre L7-3 y SOPM-7(L2-6) (acercamiento a valores bajos de CE de Figura 4-223)



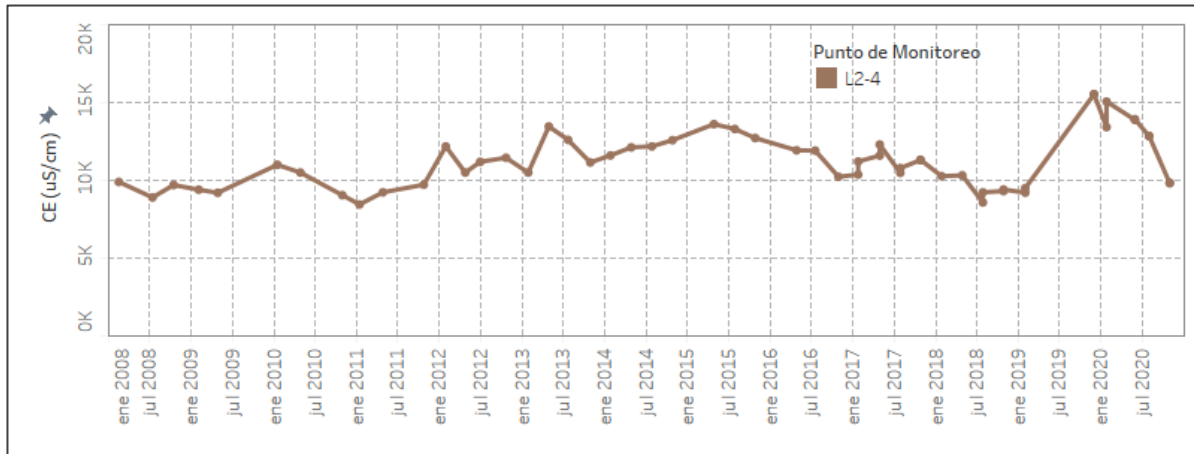
Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-225. Evolución temporal CE de terreno, Sistema Soncor en perfil Sur, entre L2-4 y SOP-7 (L2-6)



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-226. Evolución temporal de CE de Terreno de Sistema Soncor, entre L2-4 y SOPM-7(L2-6) (acercamiento a valores bajos de CE de Figura 4-225)

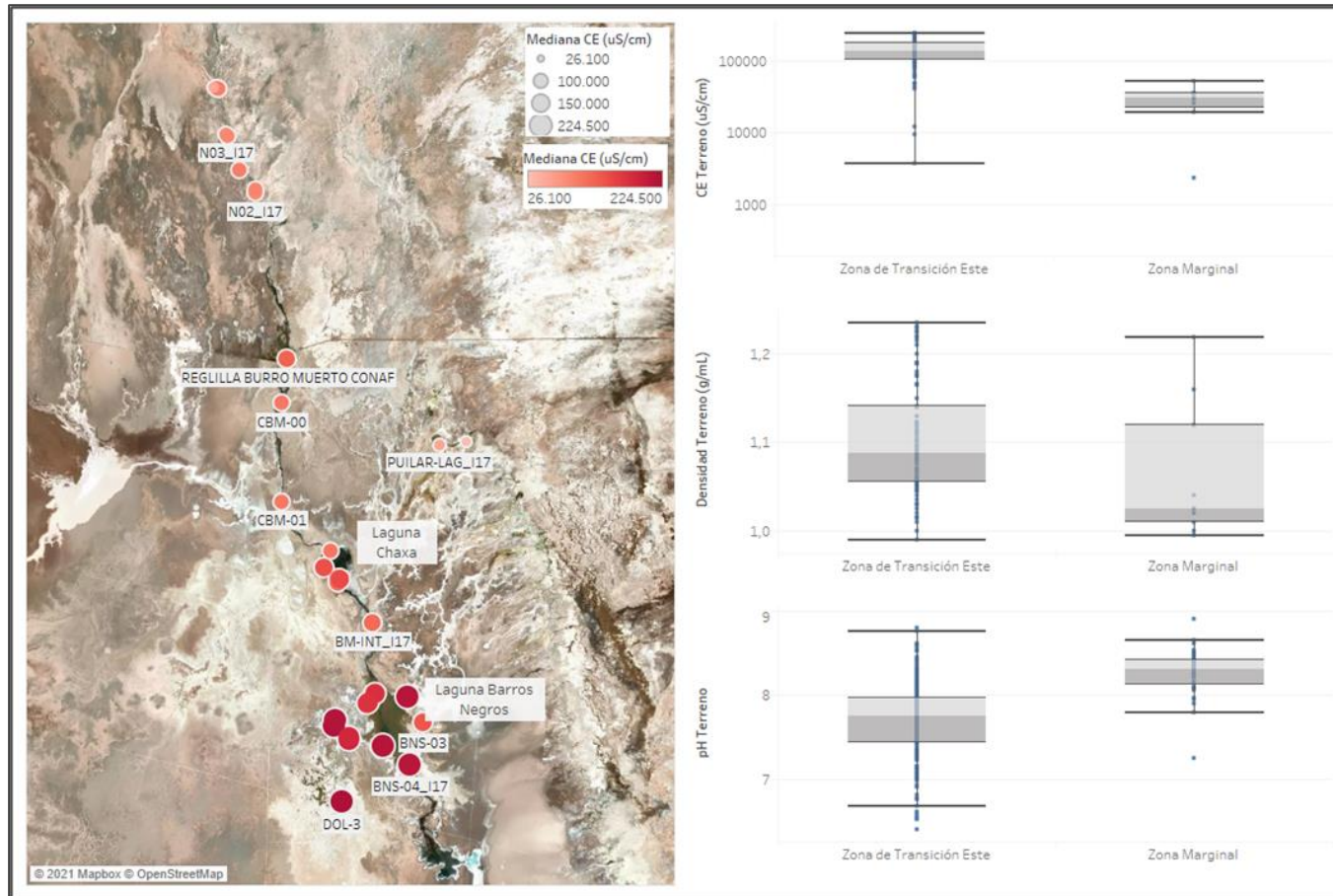


Fuente: Hidroestudios, 2021.

Con respecto a las aguas superficiales, los menores valores de CE se han registrado en la Zona Marginal, los cuales corresponden a mediciones de la laguna Puillar y alrededores, con una mediana de 30 mS/cm. En la Zona Transición Este, la CE de las aguas superficiales aumenta hacia el sur (Figura 4-227), con una mediana calculada de 138 mS/cm. Los valores más elevados en la la Zona Transición Este se presentan en la laguna Barros Negros, laguna terminal del sistema y sus desbordes, ubicados al oeste de la laguna (conocido como Cola de Pez) y al extremo sur de la misma (conocido como Desborde sur).

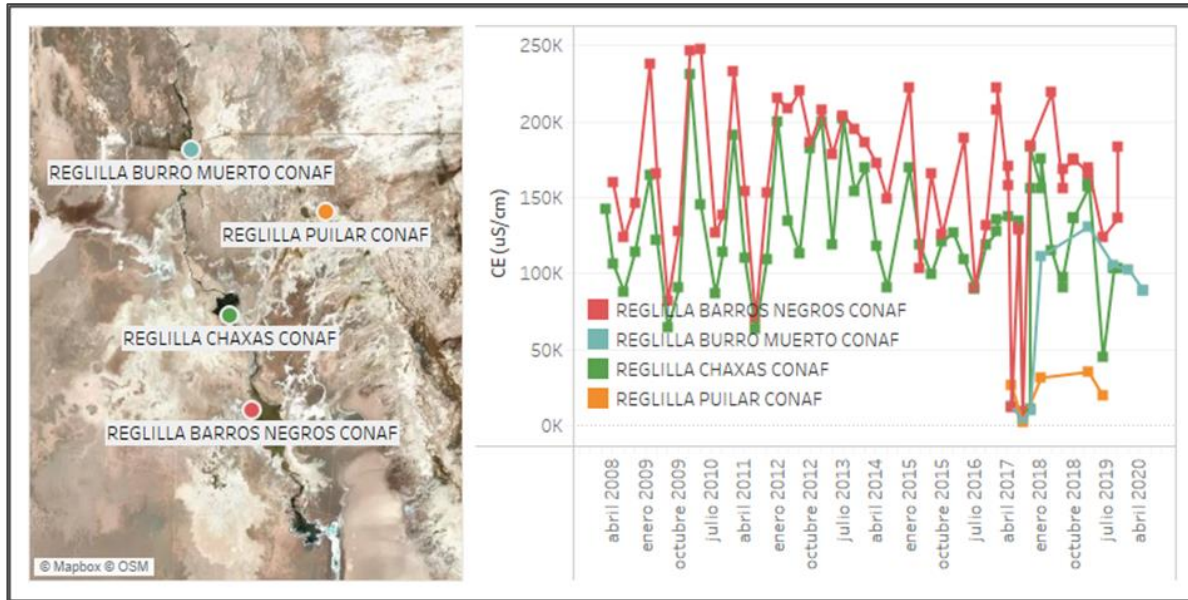
Para las lagunas se reconoce una marcada estacionalidad en sus valores de CE. Este aspecto puede observarse en la Figura 4-228. En esta también se muestra el aumento de CE en las lagunas de norte a sur.

Figura 4-227. Distribución espacial de CE Terreno de aguas superficiales del Sistema Soncor



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-228. Evolución temporal CE Terreno en lagunas Sistema Soncor



Fuente: Hidroestudios, 2021.

4.3.9.5.1.3.2 Elementos mayoritarios

En la Figura 4-229 se presenta el diagrama Piper para las unidades geomorfológicas definidas en Soncor. Los valores corresponden a la información registrada para los puntos de muestreo (superficial o subterránea) durante el año 2020. Luego de la validación de los análisis de laboratorio, se obtuvieron 5 puntos con monitoreo subterráneo, y todas muestran que los fluidos son clorurados sódicos y las concentraciones mayores de analitos se presenta en la unidad geomorfológica Zona de Transición Este.



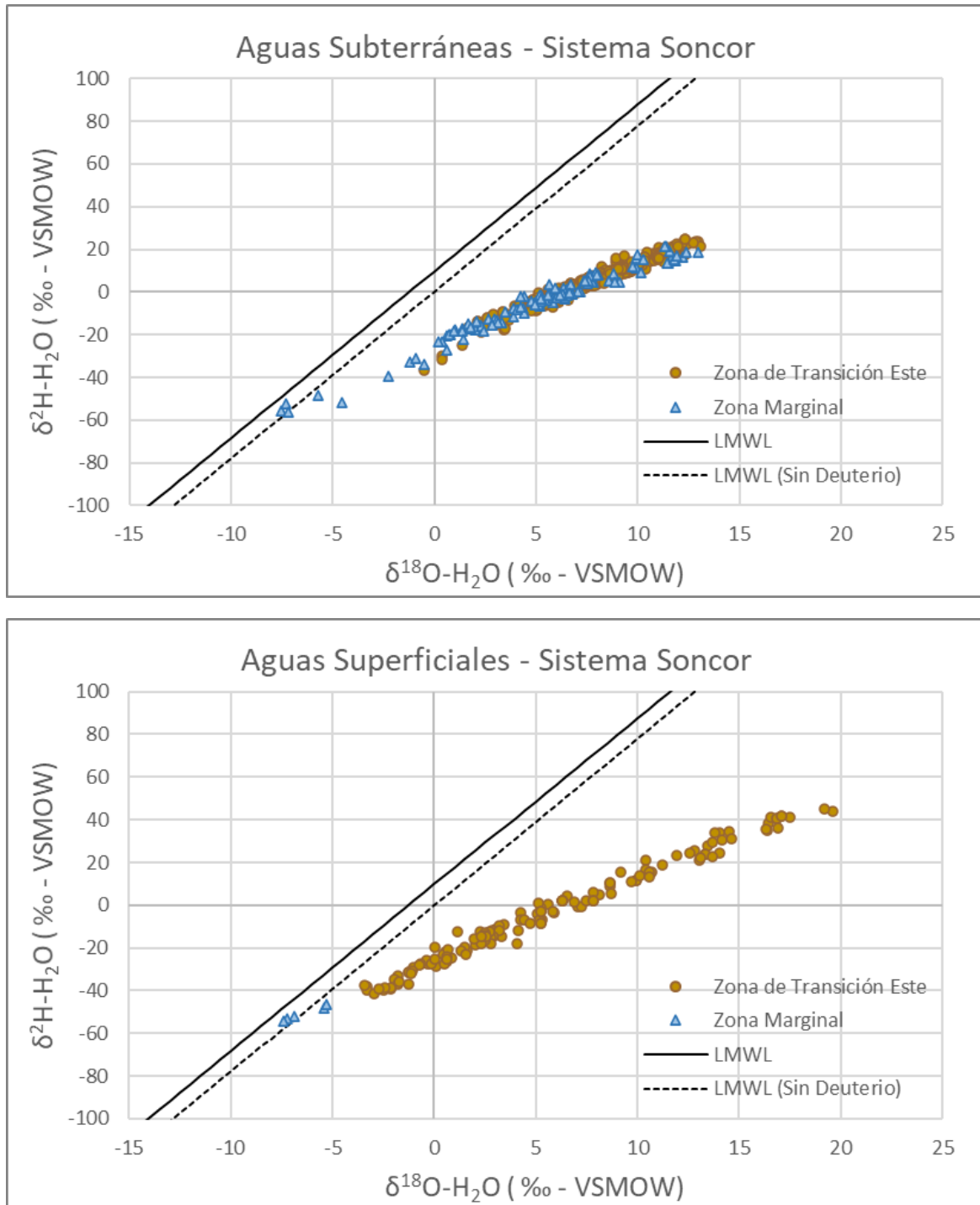


LMWL. De esta forma, los fluidos de la Zona Marginal son más empobrecidos que los de Zona Transición Este, aumentando el enriquecimiento al aproximarse los fluidos al núcleo

El hecho de que el extremo de la LEL se encuentre representado por fluidos de la Zona Transición Este y no por el núcleo, sugiere que existe un flujo desde el Núcleo a la zona marginal, donde se encuentran los resultados más enriquecidos en isótopos de agua.

Por su parte, las muestras superficiales, Figura 4-230, ubicadas en la Zona Marginal y Zona Transición Este, se pueden describir en dos grupos. El primero ubicado entre LMWL y LMWL (sin deuterio), el cual muestra un bajo enriquecimiento en  $O^{18}$  lo que representa una baja afectación por evaporación, estas aguas representan la recarga al sistema Soncor. Y el segundo grupo está alineado según una LEL, el cual exhibe muestras enriquecidas en isótopos pesados, lo que significa que estos cuerpos de agua se han visto afectados por evaporación.

Figura 4-230. Análisis isotópico de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  de agua subterránea sector Soncor



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.9.5.1.4 Sistema Aguas de Quelana

En el presente apartado se realiza una descripción de la información hidroquímica e isotópica disponible para el sistema Aguas de Quelana, caracterizando las distintas zonas según sus parámetros FQ, química e isótopos de H<sub>2</sub>O. Un mayor detalle sobre el funcionamiento del sistema Aguas de Quelana y los procesos que afectan a los fluidos puede consultarse en SQM Salar (2021d).

##### 4.3.9.5.1.4.1 Parámetros Físicoquímicos

###### 4.3.9.5.1.4.1.1 Evolución Espacial y Temporal de la Conductividad Eléctrica

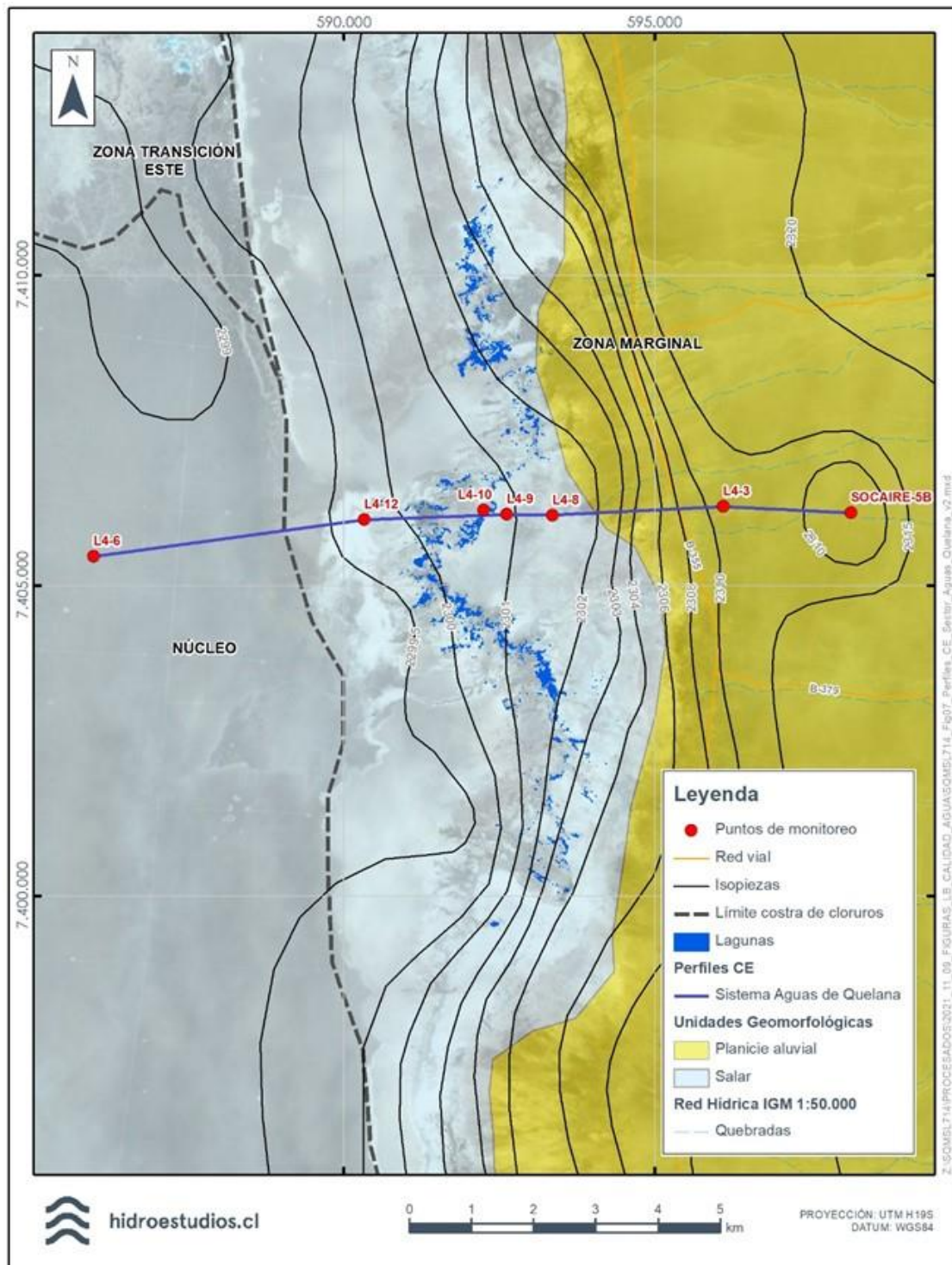
La evolución espacial y temporal de la CE se ha evaluado a partir del perfil de la Figura 4-231, el cual se ubica en la zona media del sector Aguas de Quelana. Este es ortogonal a las isopiezas de niveles subterráneos y pasa por 7 puntos de monitoreo subterráneo. El perfil pasa por las zonas geomorfológicas, de este a oeste: Planicie Aluvial, Zona Marginal y Núcleo, cruzando cuerpos de aguas poco profundos y estacionales producto de afloramientos de aguas subterráneas.

Para este perfil es posible observar que los pozos ubicados en el sector de depósitos aluviales (pozos Socaire-5/Socaire-5 y L4-3) presentan CE entre 2,5 y 20 mS/cm. El pozo L4-3 muestra una CE asociado a aguas levemente salobres.

Por su parte, los pozos ubicados en la Zona Marginal (pozos L4-8, L4-9, L4-10, L4-12) y Núcleo (pozo L4-6) muestran un progresivo aumento de la conductividad eléctrica desde oriente a occidente, con valores 90 mS/cm en el pozo L4-8, a 240 mS/cm en el pozo L4-6 (Figura 4-232). La dispersión de valores en este rango es reflejo de una zona de mezcla entre agua y salmuera.

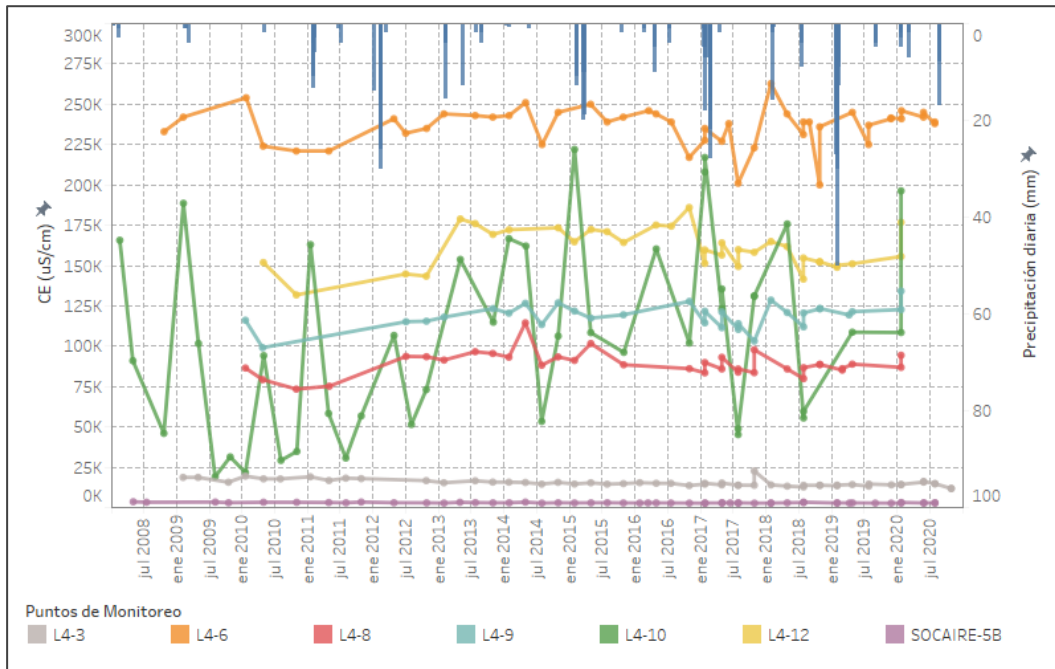
Es posible identificar dos grupos de pozos en función de rangos de CE y ubicación. Por un lado, se encuentra los pozos L4-3 y Socaire-5/Socaire-5, en el extremo este del perfil, caracterizados por valores bajos valores de CE (Figura 4-233). Por otro lado, los pozos L4-8, L4-9, L4-12 y L4-6 y la reglilla L4-10, ubicados en la porción oeste del perfil, se caracterizan por valores de CE superiores a 80 mS/cm y u. Por lo tanto, es posible que el inicio de la interfaz salina se encuentre ubicada entre los pozos L4-9 y L4-12 en la Zona Marginal, considerando que, a partir de estos pozos hacia el oeste, se alcanzan valores superiores a 150mS/cm.

Figura 4-231. Ubicación de perfil de Conductividad Eléctrica analizado en los sectores Aguas de Quelana y Zona Marginal. Isopiezas año 2018



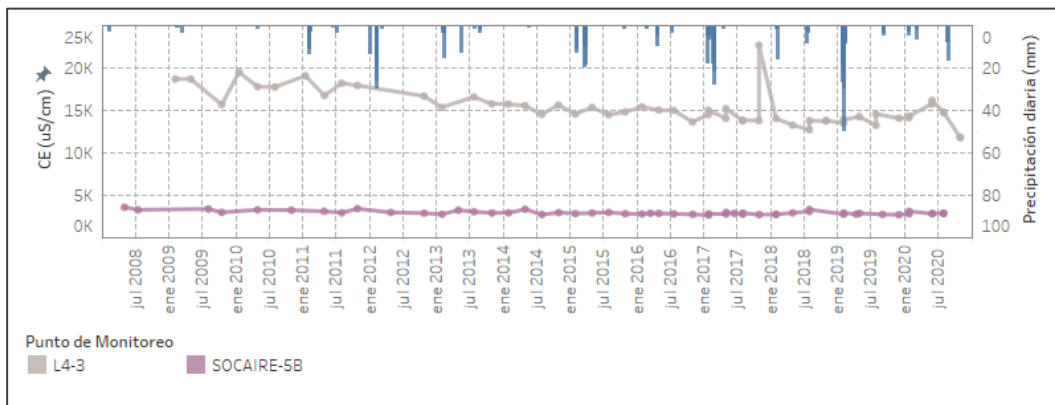
Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-232. Evolución temporal de la conductividad eléctrica de terreno de sector Aguas de Quelana



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-233. Evolución temporal de la conductividad eléctrica de terreno de terreno de sector Aguas de Quelana. (Detalle a valores bajos de CE de Figura 4-232)

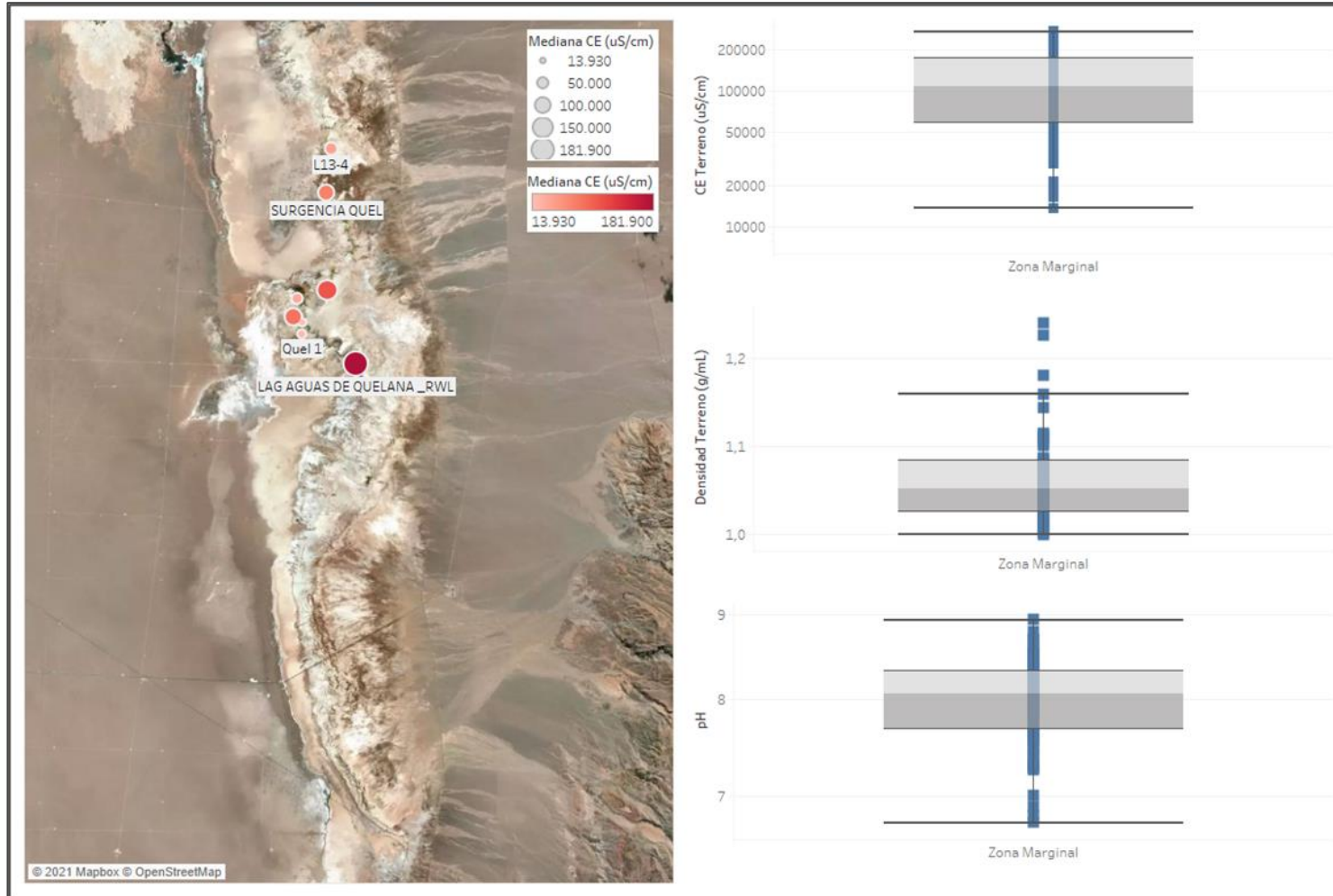


Fuente: Hidroestudios, 2021.

Las aguas superficiales, ubicadas en la Zona Marginal presentan un amplio rango de CE, que va entre los 13,9 a 182 mS/cm. Se ubican acá cuerpos de agua con comportamiento errático, tanto en ubicación como en dimensión y continuidad espacial, denotando una gran variabilidad temporal y espacial, reflejado en los diagramas boxplot de la Figura 4-234.



Figura 4-234. Distribución espacial de CE Terreno de aguas superficiales del sector Quelana



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.9.5.1.4.2 Elementos mayoritarios

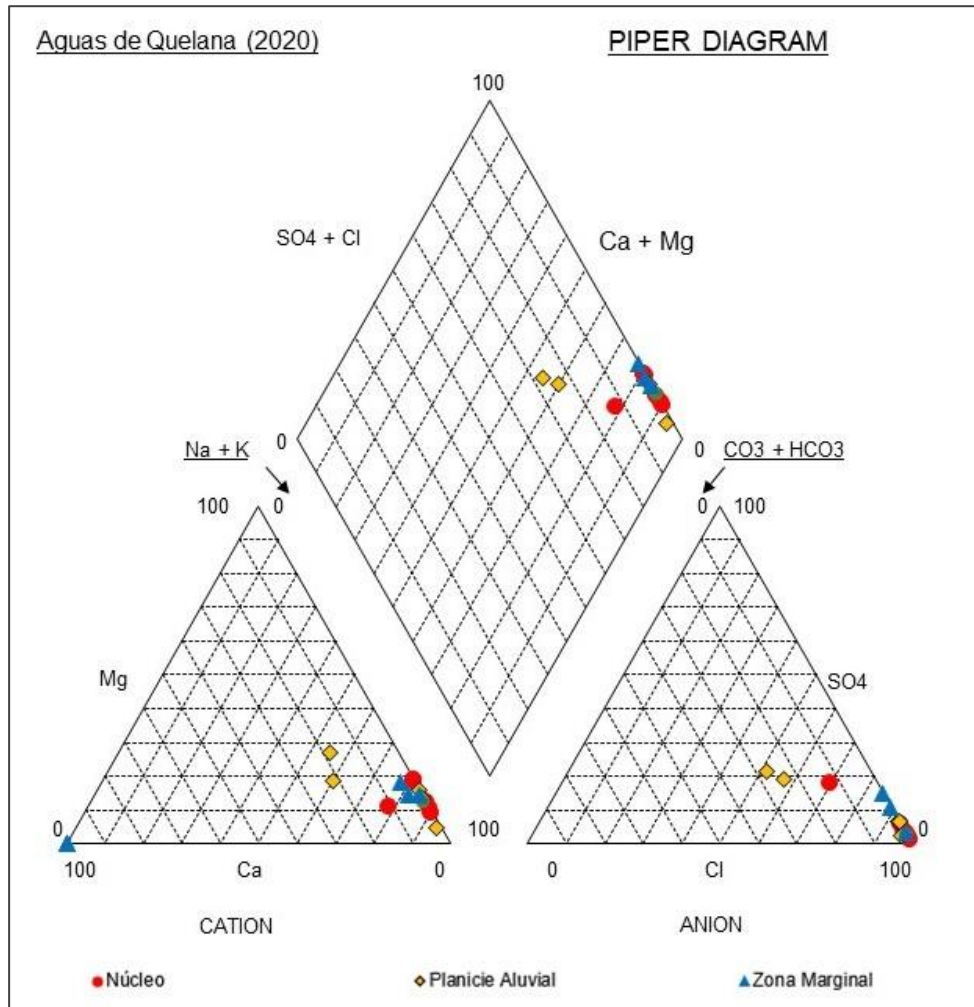
Se realizó el diagrama de Piper para el Sector de Aguas de Quelana (Figura 4-235) para las zonas definidas en el sistema. Los valores corresponden a la información disponible para los puntos de muestreo (superficial o subterránea) para el año 2020, y se obtuvieron 18 puntos con monitoreo subterráneo.

A nivel subterráneo, se observan aguas y salmueras de tipo clorurado sódico en las tres unidades geomorfológicas muestreadas que se presentan en el sector Aguas de Quelana. La predominancia de estos iones (Na y Cl) aumenta a medida que se avanza hacia el Núcleo, por lo que el porcentaje de otros iones presentes (como Ca, SO<sub>4</sub> o HCO<sub>3</sub>) disminuye. A nivel superficial también se observa un fluido clorurado sódico en la Zona Marginal, mientras que, en la Planicie Aluvial, la predominancia del sodio y cloruro disminuye hasta aproximadamente un 45% y 50%, respectivamente.

Además, se observa que la mayor cantidad de mediciones corresponden a la Zona Marginal. A pesar de que en esta unidad se registran fluidos similares con respecto a los iones predominantes, se aprecia una diferenciación entre los tipos de fluido, dependiendo de su CE (agua, transición o salmuera). En particular, se observa que para las mediciones presumibles como salmuera (puntos más cercanos al núcleo), la suma entre los porcentajes de sulfato y cloruro es mayor que en las mediciones de agua, donde el bicarbonato presenta concentraciones levemente mayores (entre 5% y 10%).

En la Planicie Aluvial, en cambio, se aprecia un porcentaje mayor de bicarbonato y sulfato y, en consecuencia, menor de cloruro. El porcentaje de calcio en estas muestras también es más elevado.

Figura 4-235. Diagramas de Piper de sector Aguas de Quelana por unidad geomorfológica (2020)



4.3.9.5.1.5 Isótopos estables

En la Figura 4-236 se observa que existen dos grupos de muestras para aguas subterráneas: uno localizado entre la LMWL y la LMWL sin deuterio, lo cual representa las aguas de recarga infiltradas desde la Cordillera Occidental, que han sido muy poco afectadas por evaporación, lo que sugiere que su infiltración post precipitación fue rápida. El segundo grupo, donde se ubica la mayoría de las muestras, sigue la tendencia de una línea de evaporación local (LEL), que también corresponde con una línea de mezcla entre aguas más y menos evaporadas.

El primer grupo corresponden a las muestras de la Planicie Aluvial y de la Zona Marginal, asociadas a la descarga proveniente de la Planicie Aluvial. En el segundo grupo, es posible identificar que los sectores presentan algunas diferencias en su signatura isotópica, siendo las aguas que están menos afectadas por procesos de evaporación y/o mezcla con agua más evaporadas, las más empobrecidas isotópicamente, localizándose más cerca de la LMWL.

El hecho de que el extremo de la LEL se encuentre representado por fluidos de la Zona marginal y en menor medida por muestras del núcleo, sugiere que existe un flujo desde el Núcleo a la zona marginal, donde se encuentran los resultados más enriquecidos en isótopos de agua.

Por su parte, las muestras superficiales, Figura 4-236, ubicadas todas en la Zona Marginal, se pueden describir en dos grupos. El primero ubicado entre la LEL, con algunas muestras entre LMWL y LMWL (sin deuterio), el cual muestra un bajo enriquecimiento en  $O^{18}$  lo que representa una baja afectación de la evaporación desde las zonas de recarga. Y el segundo grupo está situado desde la zona media de la LEL, el cual exhibe muestras enriquecidas en isótopos pesados, lo que significa que estos cuerpos de agua se han visto afectados por evaporación.

Figura 4-236. Isótopos H<sub>2</sub>O ( $^{18}O$  y deuterio), sector aguas de Quelana en Planicie Aluvial, Zona Marginal y Núcleo

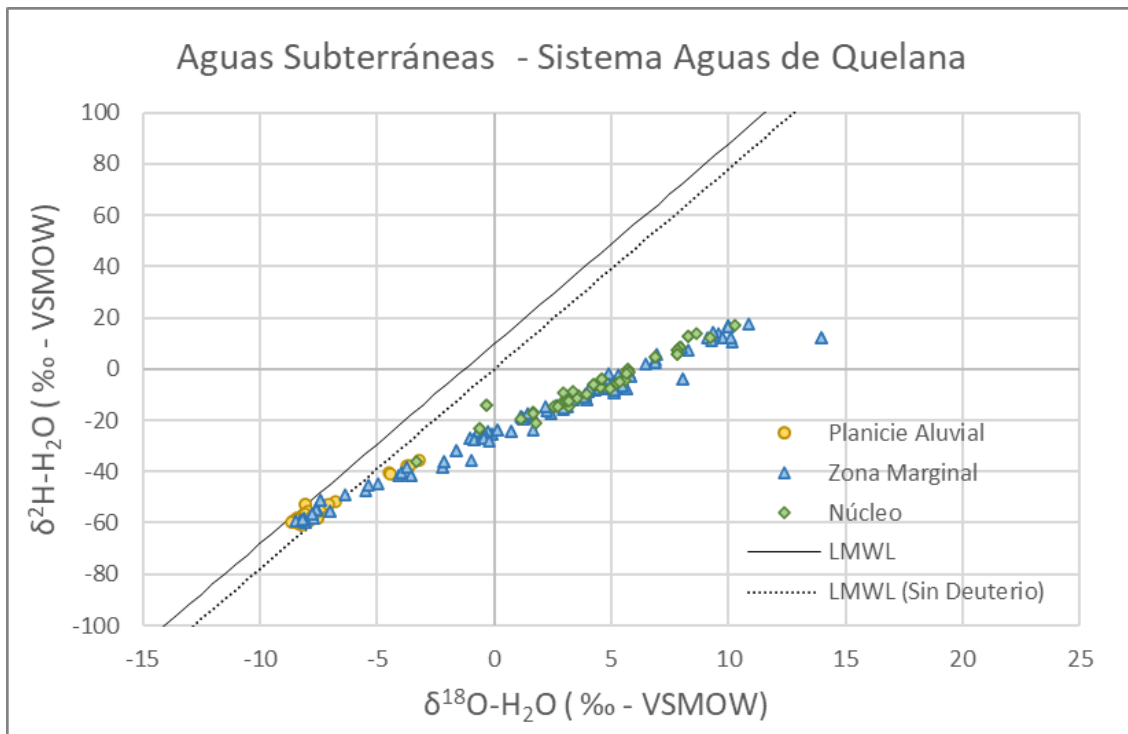
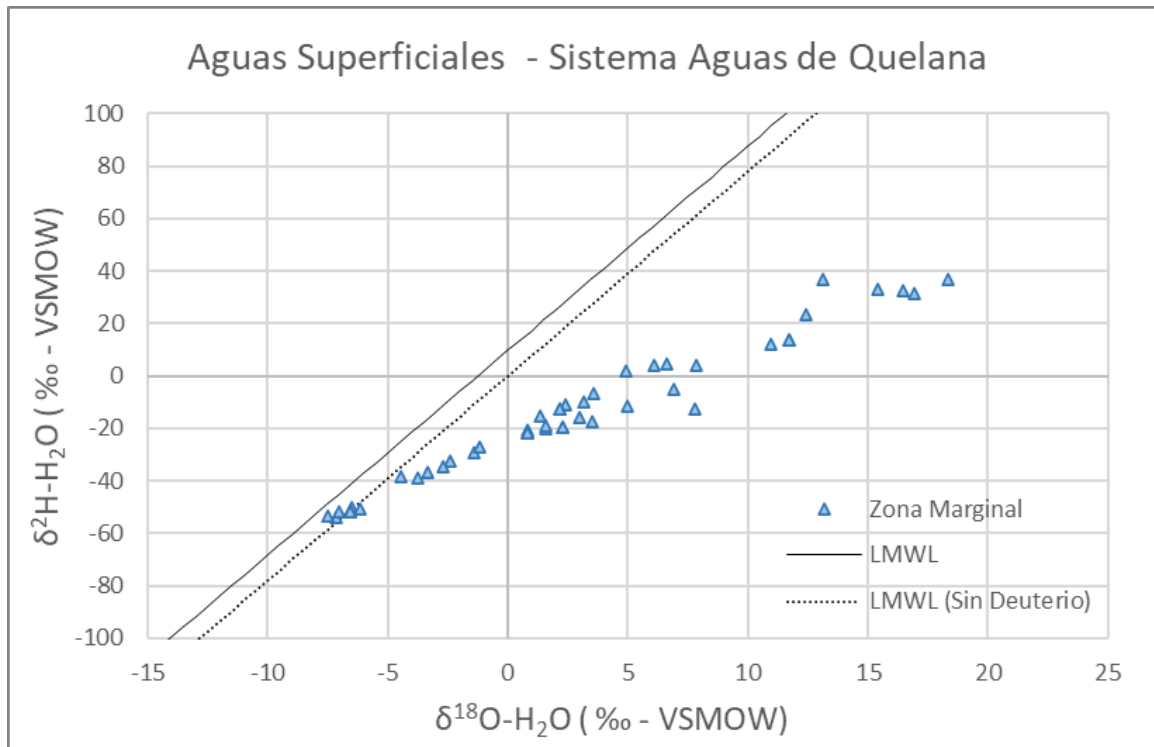


Figura 4-236. Isótopos H<sub>2</sub>O (<sup>18</sup>O y deuterio), sector aguas de Quelana en Planicie Aluvial, Zona Marginal y Núcleo



Fuente: Modificado de SQM Salar(2021d)

4.3.9.5.1.6 Sistema Peine

En el presente apartado se realiza una descripción de la información hidroquímica e isotópica disponible para el sistema Peine, caracterizando las distintas zonas según sus parámetros FQ, química e isótopos de H<sub>2</sub>O. Un mayor detalle sobre el funcionamiento del sistema Peine y los procesos que afectan a los fluidos puede consultarse en SQM Salar (2021c).

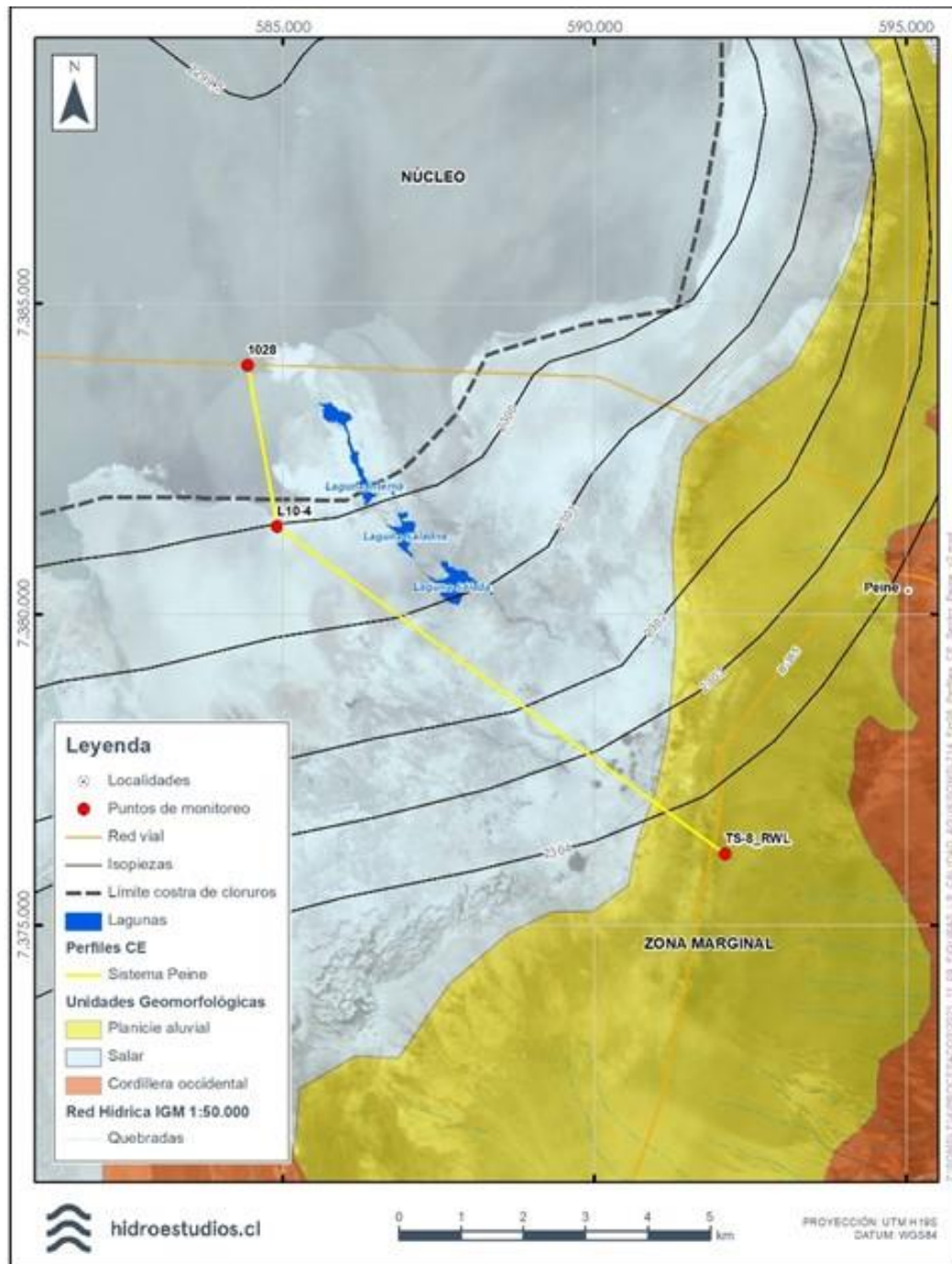
4.3.9.5.1.6.1 Parámetros Físicoquímicos

4.3.9.5.1.6.1.1 Evolución Espacial y Temporal de la Conductividad Eléctrica

La evolución espacial y temporal de la CE ha sido evaluada en el sector Peine a través del perfil mostrado en la Figura 4-237. Este perfil se extiende desde el pozo TS-8\_RWL en Planicie Aluvial, hasta el pozo 1028 en el sector Núcleo, cruzando el sistema lacustre de lagunas Salada y Saladita y el desborde Laguna Interna.



Figura 4-237. Ubicación de perfil de CE analizado en el sector Peine. Isopiezas año 2018

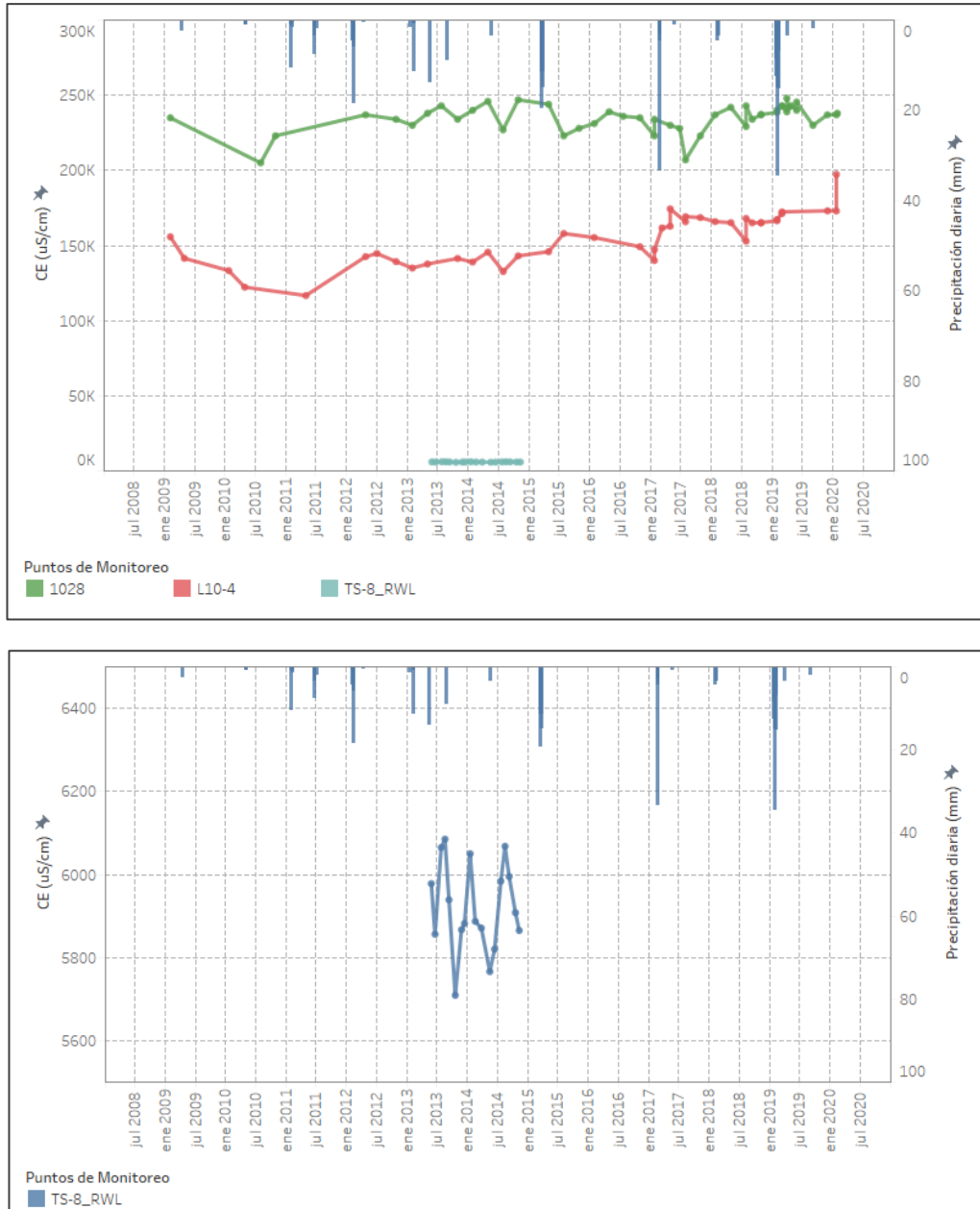


Fuente: Hidroestudios, 2021.

En la Figura 4-238 se observa un incremento de CE desde zonas de recarga hacia el núcleo del salar. En ella es posible observar que el pozo TS-8\_RWL, ubicado en el sector de recarga de la Planicie Aluvial, presenta una CE bajo 1 mS/cm correspondiente a aguas. Luego, en dirección al núcleo, el pozo L10-4 muestra valores

de 130 mS/cm. Finalmente, el pozo 1028 ubicado en el sector Núcleo muestra conductividades eléctricas del orden de 220 mS/cm, orden esperable para una salmuera. En consecuencia, la interfaz salina se encuentra ubicada probablemente entre los pozos 1028 y TS\_8\_RWL.

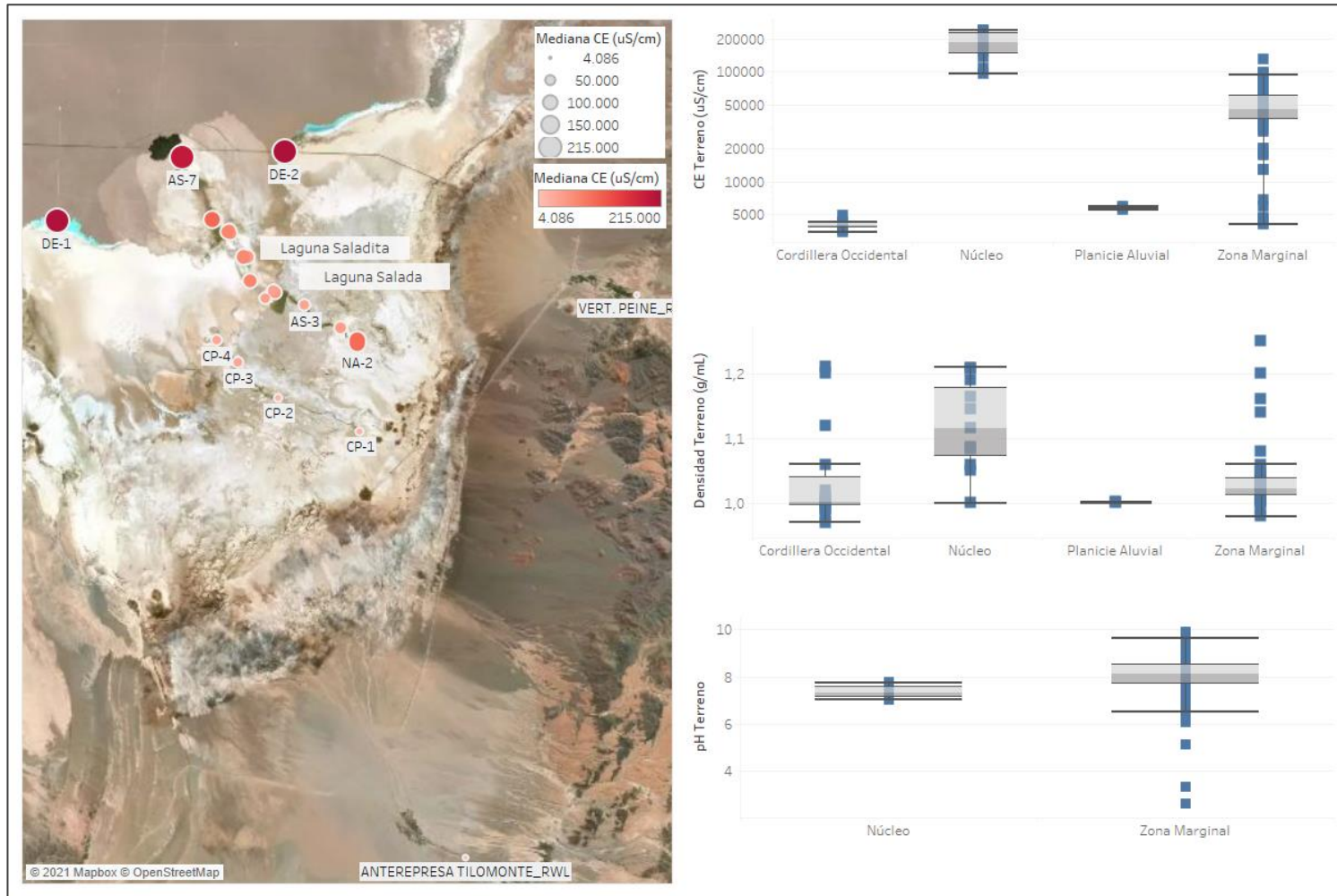
Figura 4-238. Evolución temporal de la conductividad eléctrica de terreno de sector Peine



Fuente: Hidroestudios, 2021.

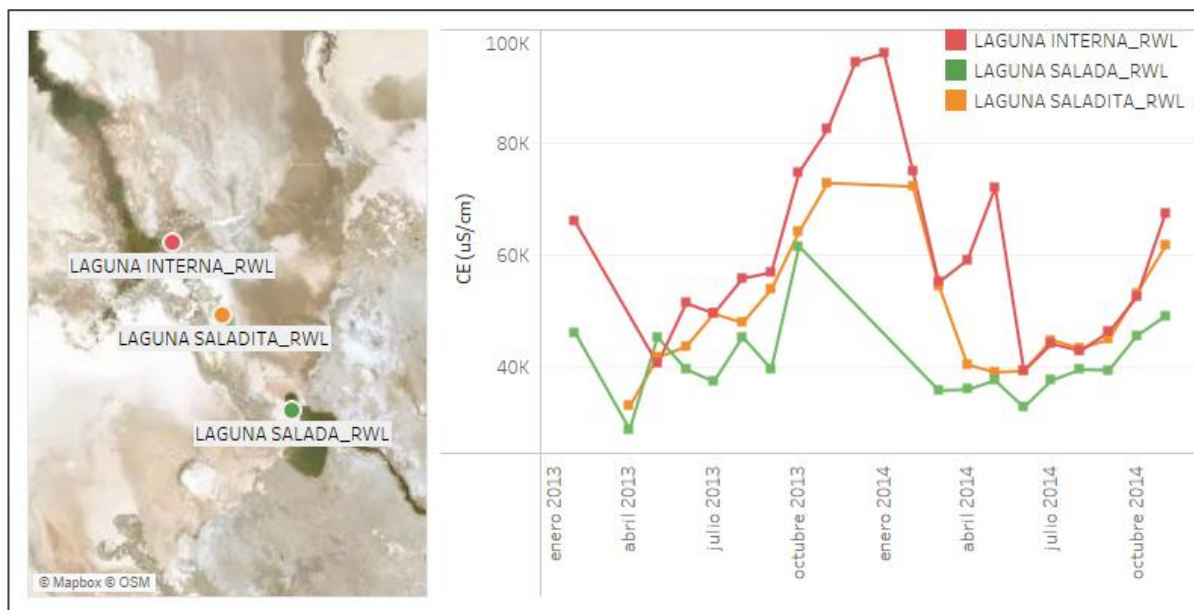
En aguas superficiales del sector Peine, se observa un aumento de la CE de los puntos de monitoreo al acercarse a la zona del Núcleo, donde se observa una mediana de valores de 210 ms/cm (Figura 4-239). La Zona Marginal, presenta un rango amplio de CE, con una mediana de CE de 46 mS/cm. Sobre esta unidad se encuentran las lagunas Salada, Saladita y el desborde Laguna Interna, alineadas en una dirección aproximada SE-NW. Por otra parte, la CE de los cuerpos superficiales, aumenta en dirección NW, al acercarse al Núcleo, con una marcada estacionalidad en sus valores, como puede observarse en la Figura 4-240

Figura 4-239 Distribución espacial de CE Terreno de aguas superficiales del sector Peine.



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-240. Evolución temporal CE Terreno en lagunas sector Peine



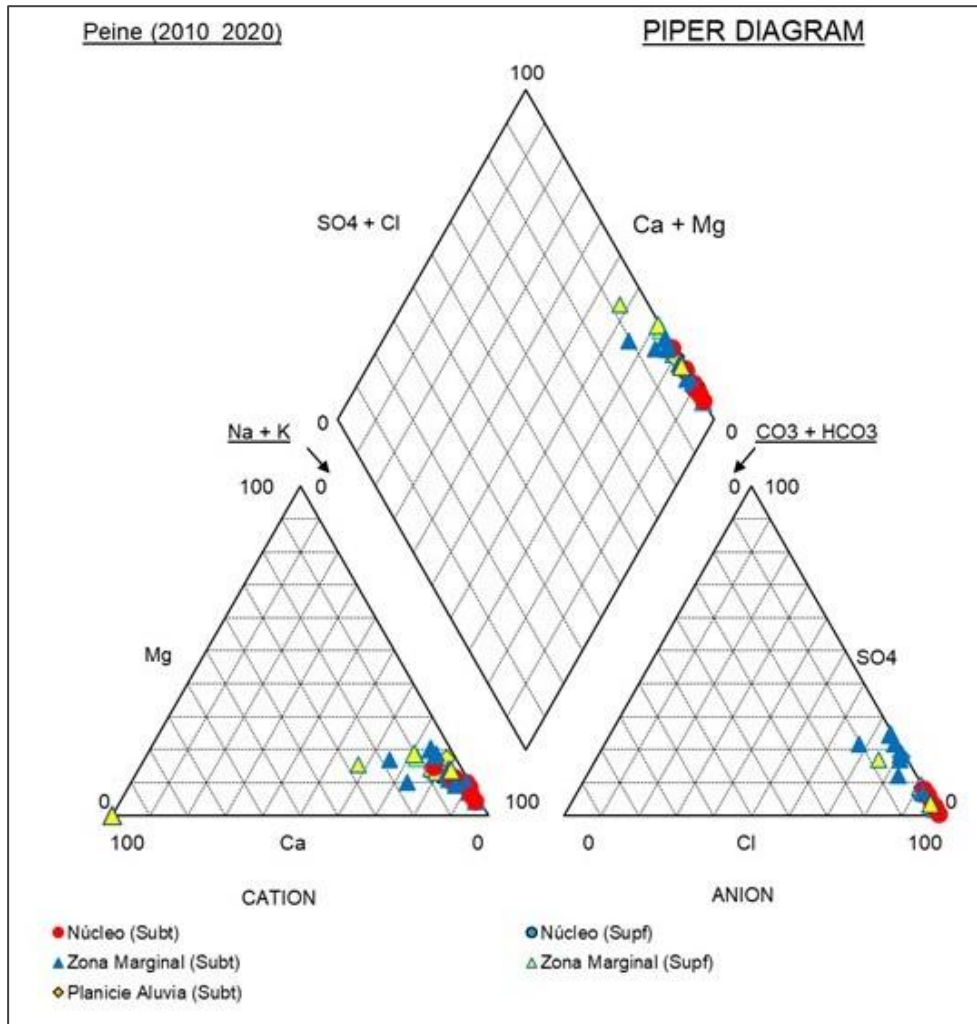
Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.9.5.1.6.2 Elementos mayoritarios

Para el Sector Peine, que comprende sectores de Planicie Aluvial, Zona Marginal y Núcleo, tanto a nivel subterráneo como superficial, se observan predominantemente aguas y salmueras de tipo clorurada sódicas (Figura 4-241). La predominancia de estos iones (Na y Cl) aumenta a medida que se avanza hacia el Núcleo, por lo que el porcentaje de otros iones presentes (como Ca o SO<sub>4</sub>) disminuye. También se observa una reducción en la proporción de HCO<sub>3</sub> y Mg, aunque dentro de un rango más acotado.



Figura 4-241. Diagrama de Piper de sector Peine por unidades geomorfológicas (2019-2020)



Fuente: Hidroestudios, 2021.

4.3.9.5.1.6.3 Isótopos estables

En la Figura 4-242 se observa que existen dos grupos de muestras para aguas subterráneas: uno localizado entre la LMWL y la LMWL sin deuterio, lo cual representa las aguas de recarga infiltradas desde la Cordillera Occidental, que han sido muy poco afectadas por evaporación, lo que sugiere que su infiltración post precipitación fue rápida. El segundo grupo, donde se ubica la mayoría de las muestras, sigue la tendencia de una línea de evaporación local (LEL), que también corresponde con una línea de mezcla entre aguas más y menos evaporadas.

El primer grupo corresponden a las muestras de la Planicie Aluvial y Zona Marginal, asociadas a la descarga provenientes de la Planicie Aluvial. En el segundo grupo, es posible identificar que los sectores presentan algunas diferencias en su signatura isotópica, siendo las aguas que están menos afectadas por procesos de evaporación y/o mezcla con agua más evaporadas, las más empobrecidas isotópicamente, localizándose

más cerca de la LMWL. Estas aguas se encuentran en el aluvial y al comienzo de la zona marginal, por lo que se concluye que el enriquecimiento aumenta al aproximarse al núcleo.

El hecho de que el extremo de la LEL se encuentre representado por fluidos de la Zona marginal y en menor medida por el núcleo, existiendo numerosas muestras del núcleo con menores enriquecimientos, sugiere que existe un flujo desde el Núcleo a las zonas próximas a la zona marginal, donde se encuentran los resultados más enriquecidos en isótopos de agua.

Por su parte, las muestras superficiales, Figura 4-242, se pueden describir en dos grupos. El primero ubicado entre la LMWL y LMWL (sin deuterio), el cual muestra un bajo enriquecimiento en O18 lo que representa una baja afectación de la evaporación. Estas aguas representan la recarga del sistema Peine. El segundo grupo está situado alineado según una LEL, el cual exhibe muestras enriquecidas en isótopos pesados, lo que significa que los cuerpos de agua se han visto afectados por evaporación.

Figura 4-242. Isótopos de H<sub>2</sub>O (<sup>18</sup>O y deuterio) Planicie Aluvial, Zona Marginal y Núcleo del sector Peine

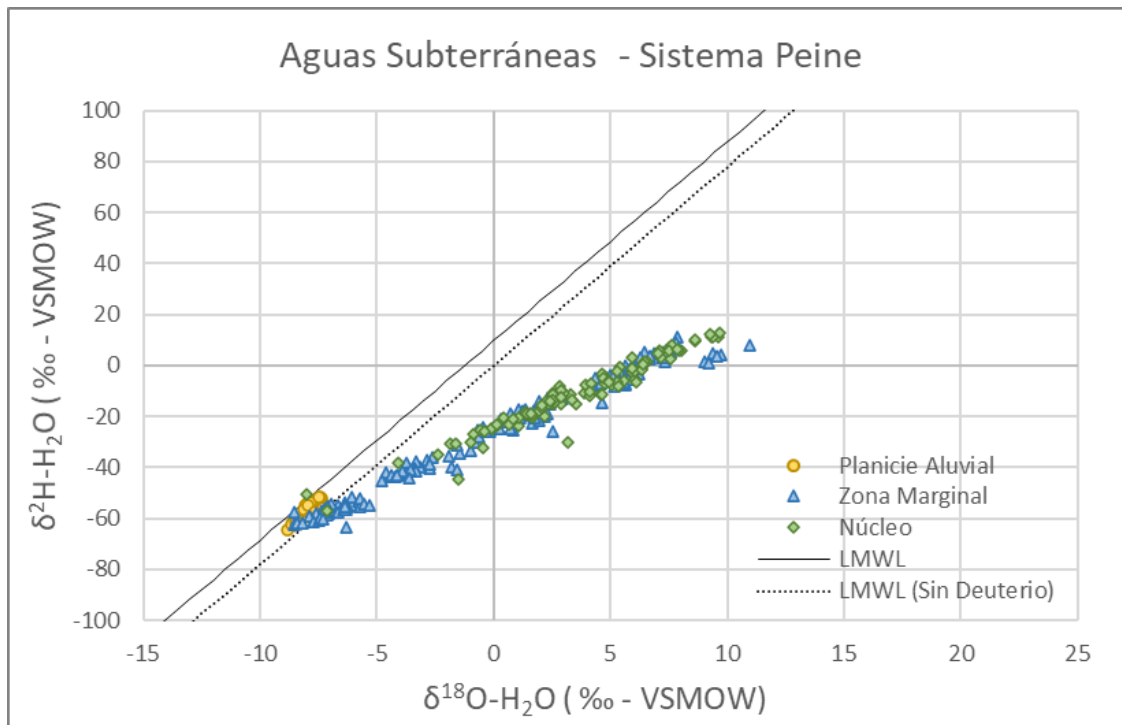
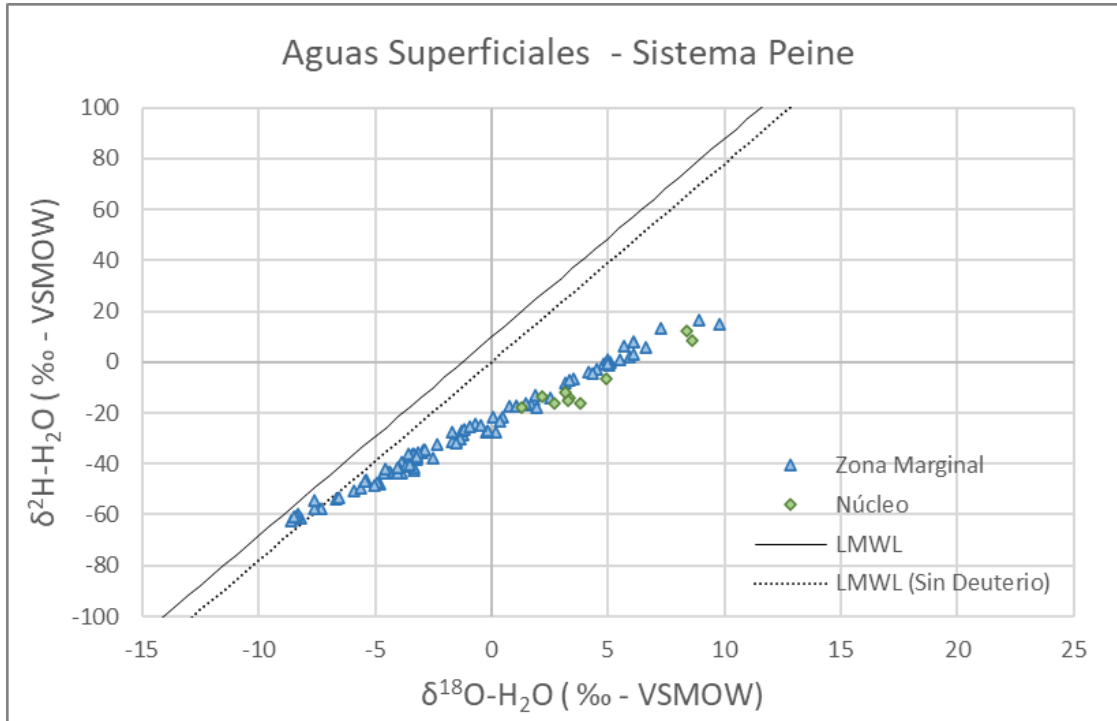


Figura 4-242. Isótopos de H<sub>2</sub>O (<sup>18</sup>O y deuterio) Planicie Aluvial, Zona Marginal y Núcleo del sector Peine

Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.9.5.1.7 Sistema Tilopozo

En el presente apartado se realiza una descripción de la información hidroquímica e isotópica disponible para el sistema Tilopozo, caracterizando las distintas zonas según sus parámetros FQ, química e isótopos de H<sub>2</sub>O. Un mayor detalle sobre el funcionamiento del sistema Tilopozo y los procesos que afectan a los fluidos puede consultarse en SQM Salar (2021f).

##### 4.3.9.5.1.7.1 Parámetros Físicoquímicos

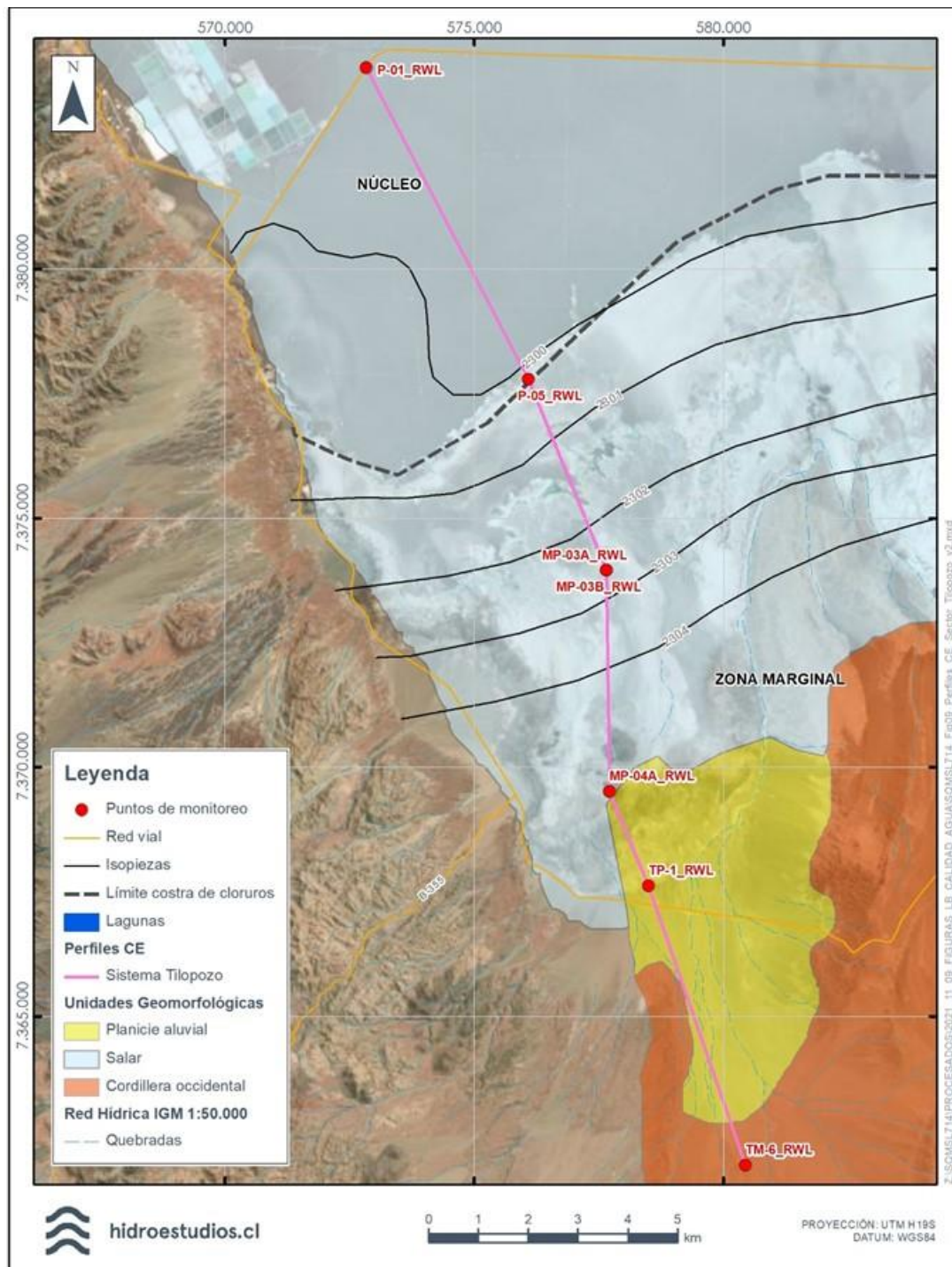
###### 4.3.9.5.1.7.1.1 Evolución Espacial y Temporal de la Conductividad Eléctrica

La evolución espacial y temporal de la CE ha sido evaluada en el sistema Tilopozo a través del perfil mostrado en la Figura 4-243, el cual es ortogonal a las isopiezas de niveles subterráneos, en este caso de dirección Sursureste a Nornoroeste. El perfil se extiende desde el pozo TM-6 de la Cordillera Occidental, hasta el pozo P-01 en el Sector Núcleo, cruzando los sistemas lacustres de lagunas La Punta y La Brava. El periodo de medición para este sector abarca desde febrero de 2013 a diciembre de 2014.

En este sector se observa con claridad dos grupos de pozos: (i) pozos ubicados en el margen sur del perfil (pozos MP-03A, MP-04A, TP-1, TM-6) con una conductividad eléctrica inferior a 10 mS/cm y (ii) pozos ubicados en el margen norte del perfil (pozos MP-03B, P-05, P-01) con una conductividad eléctrica superior a 200 mS/cm, (Figura 4-244).

Respecto a los pozos MP-03A y MP-03B perforados en el mismo punto, pero a profundidades distintas (12,5m y 30,5m respectivamente), se destaca que el pozo somero no alcanza a monitorear la interfaz salina, mientras que el profundo sí, dados los valores de CE del orden de 220 mS/cm. Al norte de MP-03A, en P-05 las CE son próximas a 220mS/cm, por lo que puede concluirse que la interfaz aflora entre MP-03A y P-05

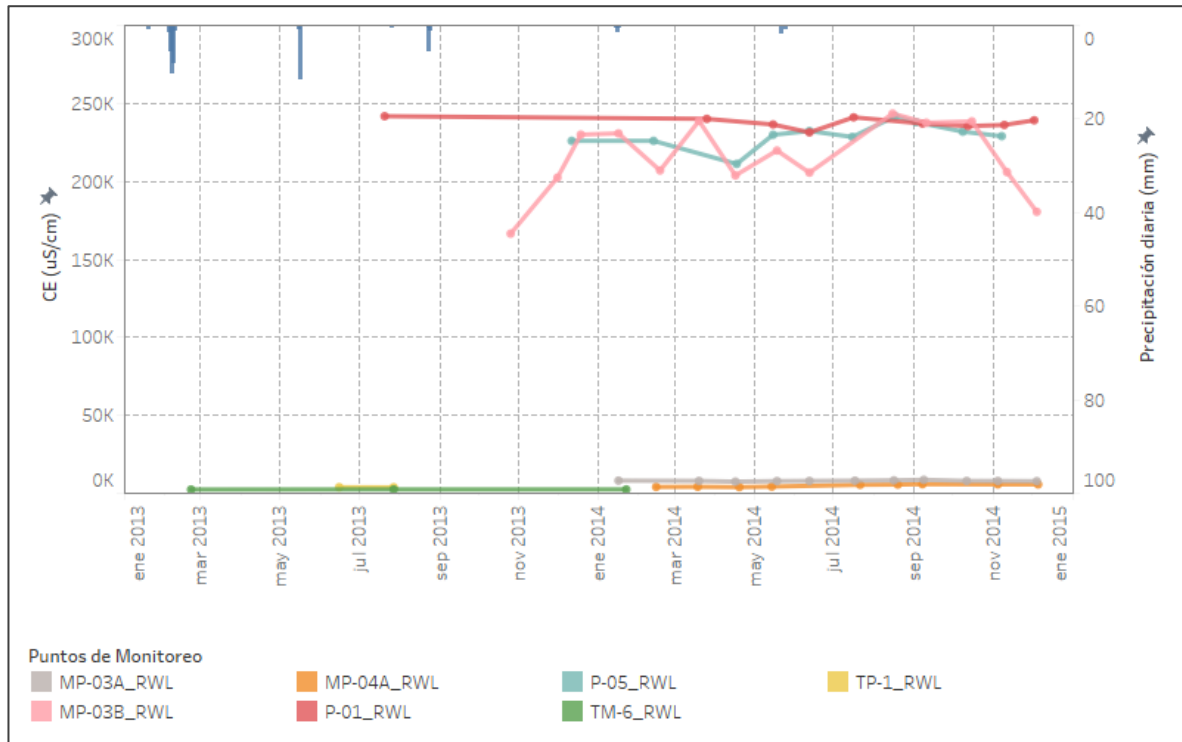
Figura 4-243. Ubicación de perfil de Conductividad Eléctrica analizado en sector Tilopozo. Isopiezas año 2018



Fuente: Hidroestudios, 2021.

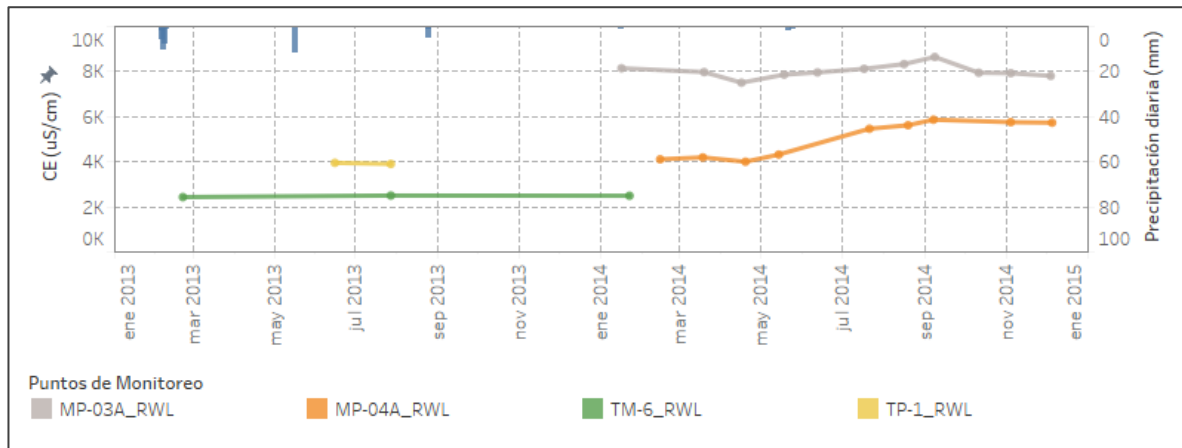


Figura 4-244. Evolución temporal de la conductividad eléctrica de terreno de sector Tilopozo.



Fuente: SQM Salar (2020a)

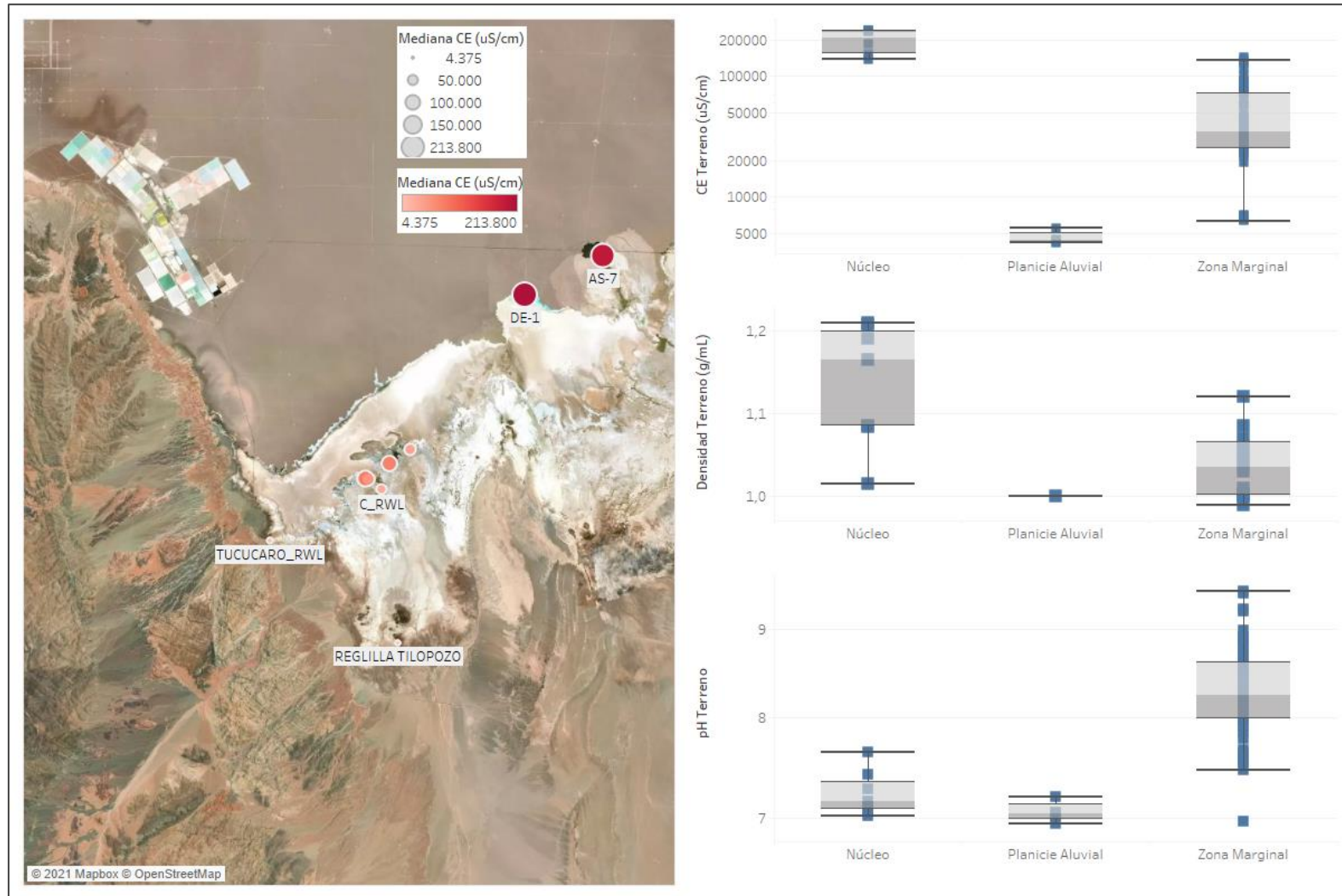
Figura 4-245. Evolución temporal de la conductividad eléctrica terreno de sector Tilopozo (acercamiento a valores bajos de CE de Figura 4-244)



Fuente: Hidroestudios, 2021.

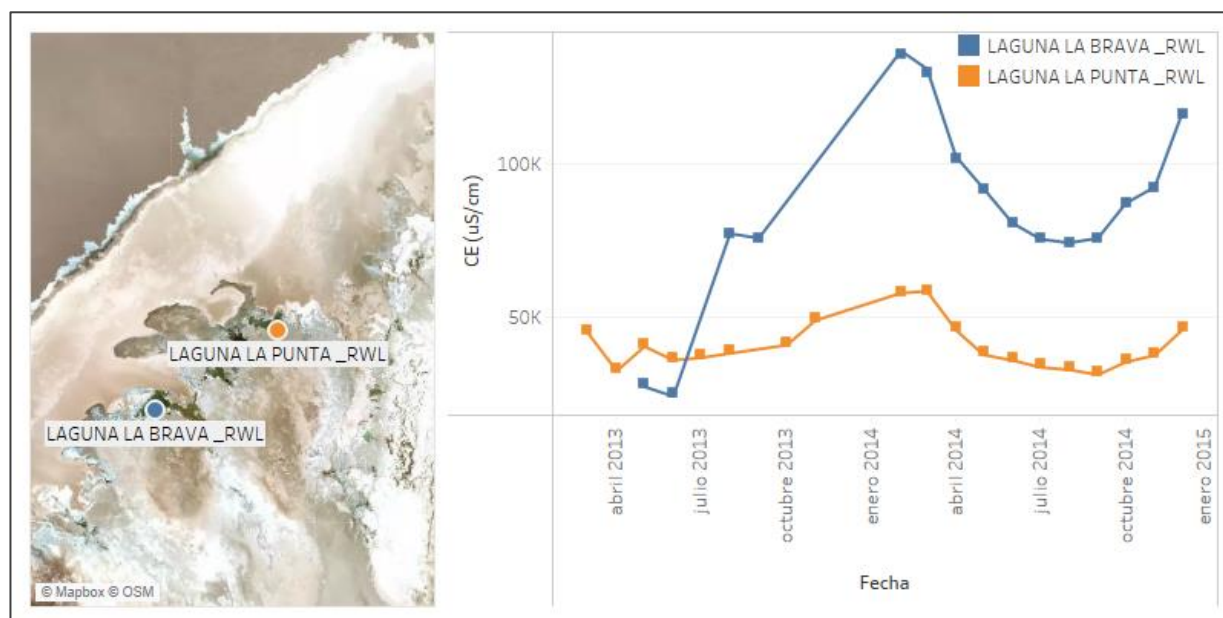
En las aguas superficiales del Sistema Tilopozo se puede observar (Figura 4-246) que presentan CE bajas en la Planicie Aluvial, características de aguas (mediana de 5 mS/cm), valores dispersos en un gran rango (desde los 20 hasta los 215 ms/cm) en la Zona Marginal, asociado a fluidos de transición de salmuera, y por último valores altos asociados a características de salmuera en el Núcleo (mediana de 210ms/cm). Además, en las lagunas del Sistema Tilopozo se reconoce una marcada estacionalidad en sus valores de CE, lo cual puede observarse en la Figura 4-247.

Figura 4-246. Distribución espacial de CE Terreno de aguas superficiales del sector Tilopozo



Fuente: Hidroestudios, 2021.

Figura 4-247. Evolución temporal CE Terreno en lagunas sector Tilopozo

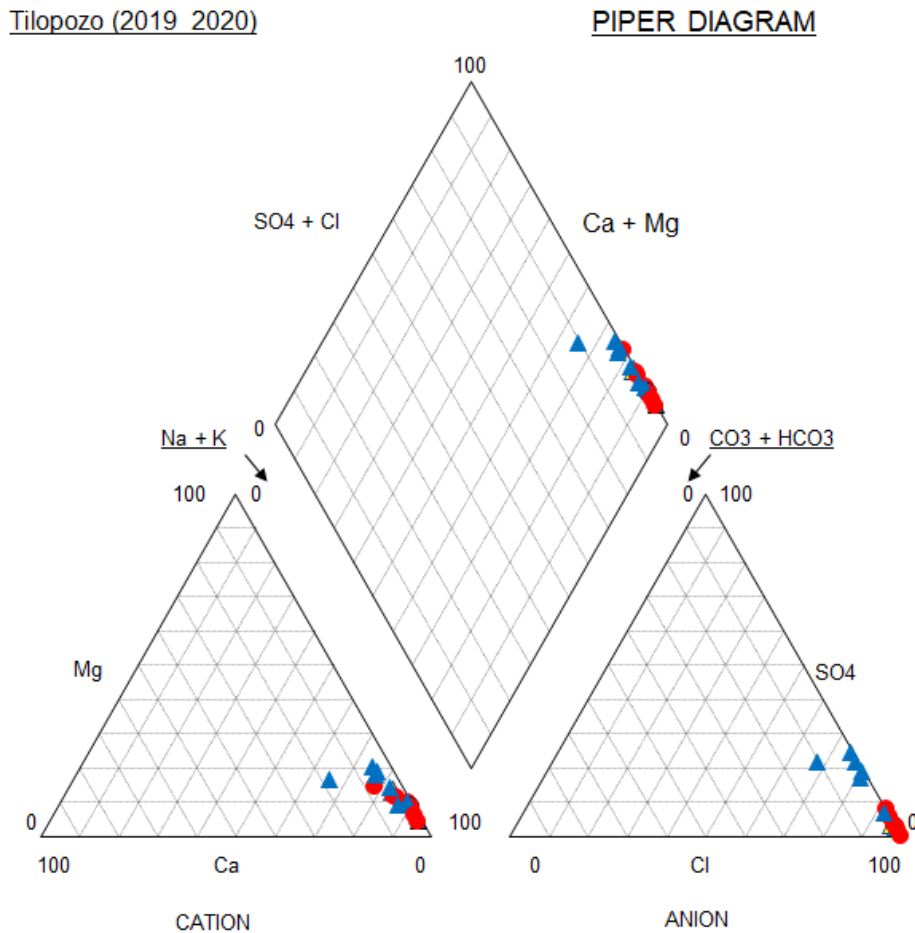


Fuente: Hidroestudios, 2021

#### 4.3.9.5.1.7.2 Elementos mayoritarios

En el sector Tilopozo, que abarca las unidades geomorfológicas Planicie Aluvial, Zona Marginal y Núcleo, tanto para el nivel subterráneo como superficial, se observan, en las lagunas La Brava y La Punta entre otras, fluidos de tipo clorurado sódico (Figura 4-250). La predominancia de estos iones (Na y Cl) aumenta a medida que se avanza hacia el Núcleo o aumenta la profundidad de medición, por lo que el porcentaje de otros iones presentes baja (como Ca, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub> o Mg).

Figura 4-248. Diagrama de Piper de sistema Tilopozo por unidades geomorfológicas (2019-2020)



Fuente: Hidroestudios, 2021.

4.3.9.5.1.7.3 Isótopos estables

En la Figura 4-249 se observa que existen dos grupos de muestras para aguas subterráneas: uno localizado entre la LMWL y la LMWL sin deuterio, lo cual representa las aguas de recarga infiltradas desde la Cordillera, que han sido muy poco afectadas por evaporación, lo que sugiere que su infiltración post precipitación fue rápida. El segundo grupo, donde se ubica la mayoría de las muestras, sigue la tendencia de una línea de evaporación local (LEL), que también corresponde con una línea de mezcla entre aguas más y menos evaporadas.

El primer grupo corresponden a las muestras de la planicie Aluvial y Zona Marginal, asociadas a la descarga provenientes de la Planicie Aluvial. En el segundo grupo, es posible identificar que los sectores presentan algunas diferencias en su signatura isotópica, siendo las aguas que están menos afectadas por procesos de evaporación y/o mezcla con agua más evaporadas, las más empobrecidas isotópicamente, localizándose más cerca de la LMWL. De esta forma, los fluidos de la Zona Marginal son más enriquecidos a medida que los fluidos se aproximan al núcleo. En este segundo grupo se incluyen también algunos puntos de la Planicie Aluvial y zona marginal, que corresponden a pozos profundos que captan aguas de la interfaz salina.



El hecho de que el extremo de la LEL se encuentre representado por unas pocas muestras del núcleo y otras de zona marginal, sugiere que existe un flujo desde el Núcleo a las zonas donde se encuentran los resultados más enriquecidos en isótopos de agua.

Por su parte, las muestras superficiales, Figura 4-249, se pueden describir en dos grupos. El primero con algunas muestras entre LMWL y LMWL (sin deuterio), el cual muestra un bajo enriquecimiento en O18 lo que representa una baja afectación de la evaporación. Estas aguas, ubicadas en Planicie Aluvial y zona marginal, representan la recarga del sistema Tilopozo, poco afectada por evaporación desde su precipitación. El segundo grupo está situado alineado según una LEL, el cual exhibe muestras enriquecidas en isótopos pesados, lo que sugiere que estos cuerpos de agua se han visto afectados por evaporación.

agua

Figura 4-249. Isótopos de H<sub>2</sub>O, <sup>18</sup>O vs deuterio en Planicie Aluvial, Zona Marginal y Núcleo

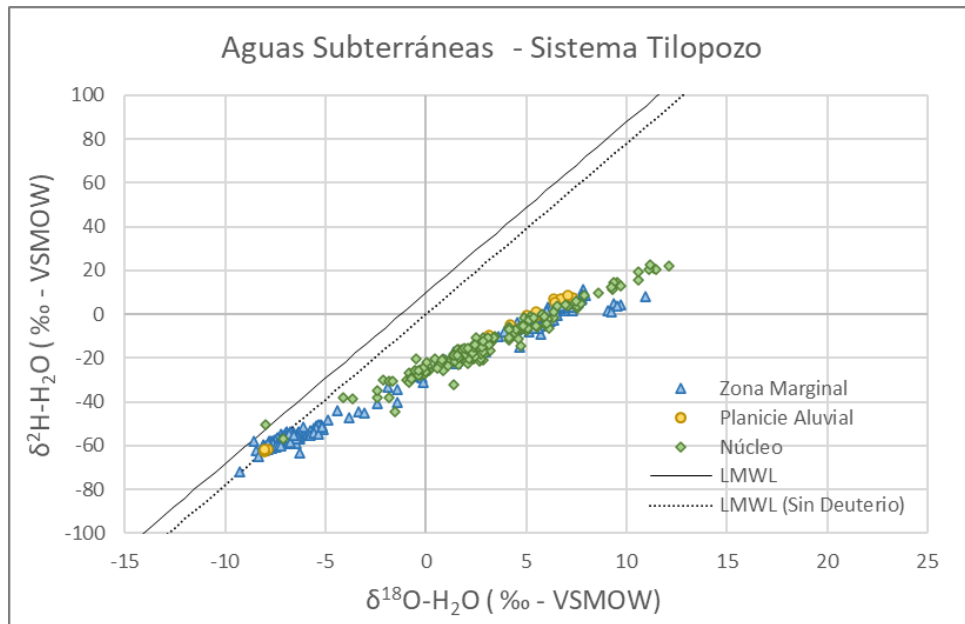
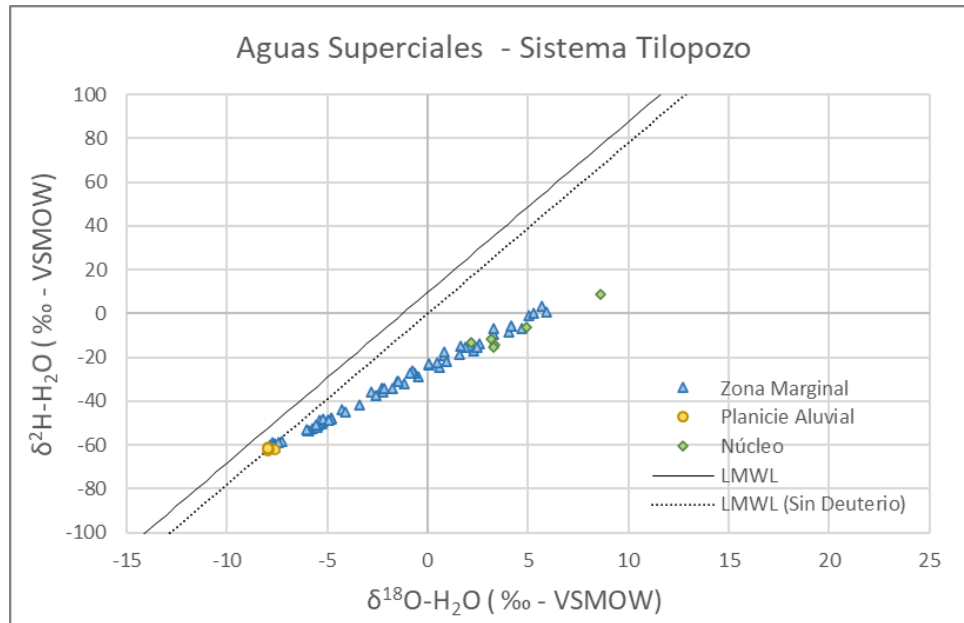


Figura 4-249. Isótopos de H<sub>2</sub>O, <sup>18</sup>O vs deuterio en Planicie Aluvial, Zona Marginal y Núcleo



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.9.5.2 Clasificación de aguas y salmueras

Luego de describir y caracterizar la calidad de los fluidos presentes en la zona de emplazamiento del Proyecto, se propone para la clasificación de los tipos de agua en el Salar de Atacama, la clasificación según Fetter modificado, presentada en el PSAH N° 28 con la subdivisión adicional de salmuera subsaturada y salmuera en equilibrio con NaCl. La correlación entre los distintos parámetros puede verse en la Tabla 4-95. La justificación de la clasificación se encuentra en SQM Salar (2021a).

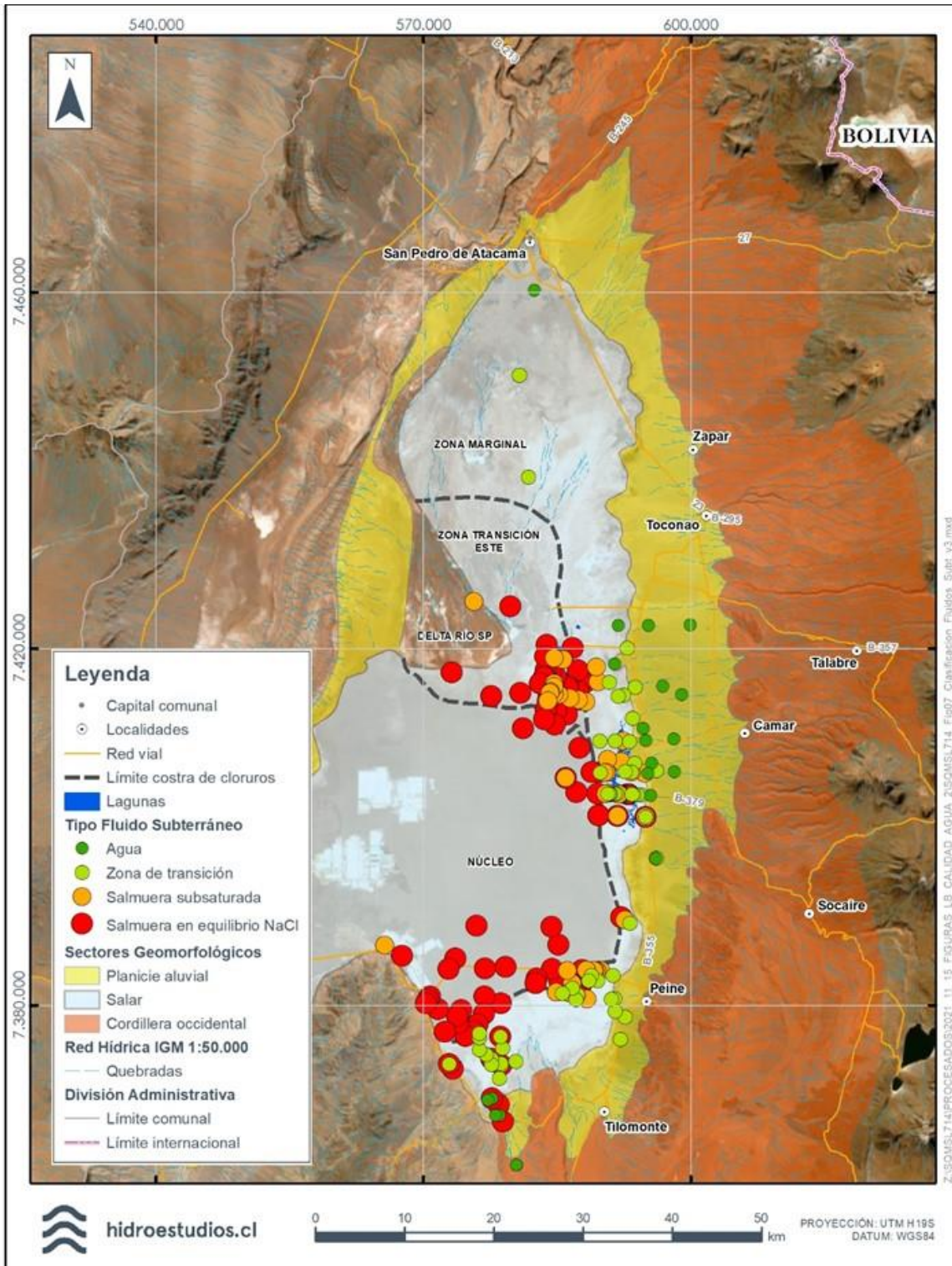
Tabla 4-95 Clasificación de fluidos

Tipo de Fluido	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Densidad ( $\text{g}/\text{mL}$ )
Agua	$<5.000 \pm 500$	$<1,004 \pm 0,002$
Zona de Transición	$126.000 \pm 13.000$	$1,065 \pm 0,002$
Salmuera Subsaturada	$214.000 \pm 21.000$	$1,2 \pm 0,002$
Salmuera en equilibrio	$>214.000 \pm 21.000$	$>1,2 \pm 0,002$

Fuente: PSAH N° 28

El resultado de la clasificación según CE para los distintos tipos de agua según unidad geomorfológica puede verse en las Figura 4-250 y Figura 4-251.

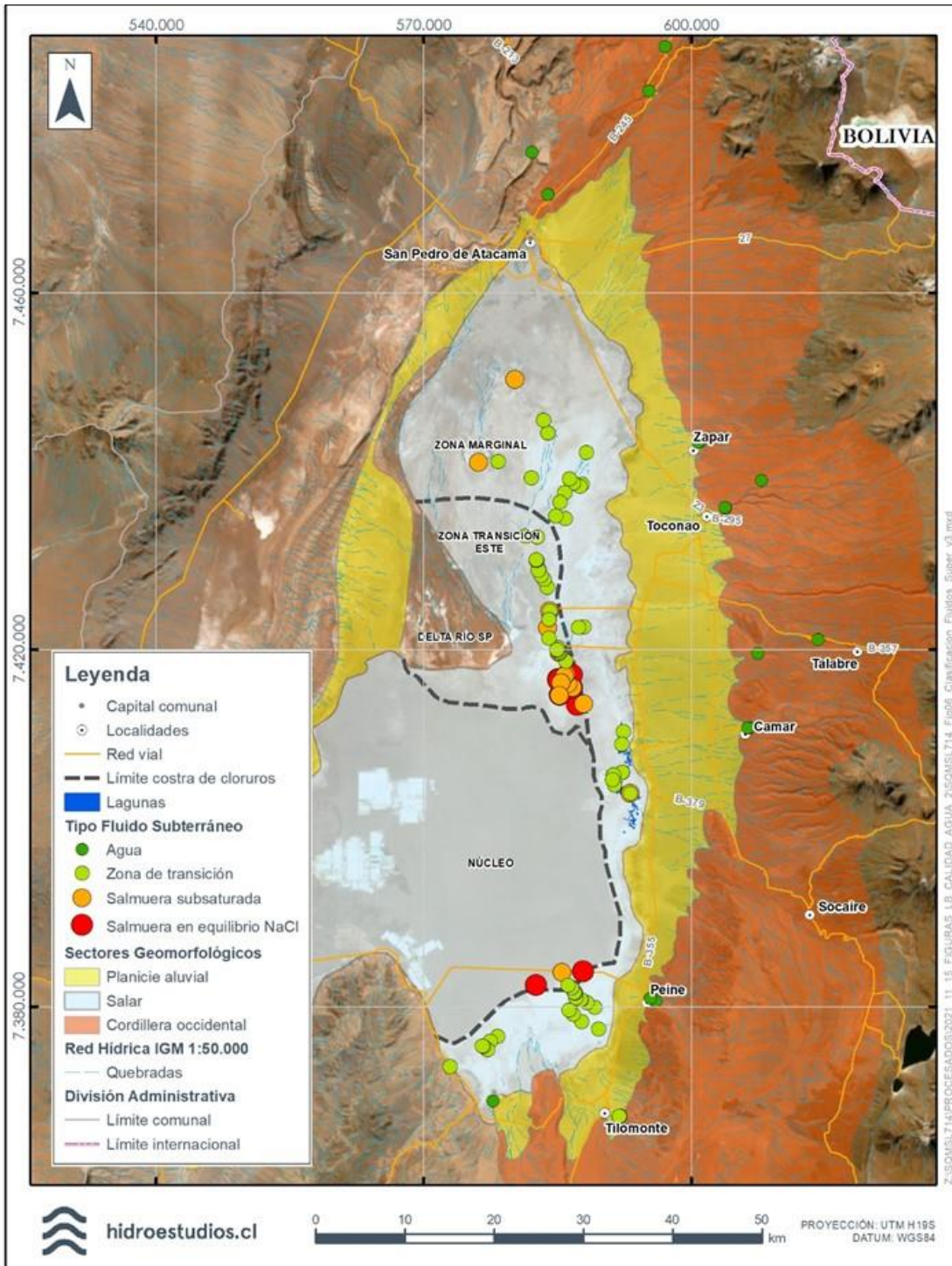
Figura 4-250. Clasificación en agua, transición y salmuera para las aguas subterráneas



Fuente: Hidroestudios, 2021.



Figura 4-251. Clasificación en agua, transición y salmuera para las aguas superficiales



Fuente: Hidroestudios, 2021.

#### 4.3.9.6 Conclusiones

- En términos de los valores medios de conductividad eléctrica por sector contextual (unidades geomorfológicas) se puede concluir lo siguiente:
  - a. Existe una marcada tendencia al aumento de la salinidad desde zonas de depósitos aluviales en dirección hacia el núcleo del salar.
  - b. En función de los valores de conductividad eléctrica se identifican tres dominios espaciales:
    - i. Zona de depósitos aluviales del margen este se registran valores medios de conductividad eléctrica en el rango de agua a agua ligeramente salobre (bajo los 5 mS/cm).
    - ii. Zona transición en la Zona Marginal en donde se encuentran los afloramientos de aguas subterráneas, cuerpos lacustres y superficies de inundación ocasional tales como Sectores Soncor, Aguas de Quelana, Peine, Tilopozo, con valores amplios de conductividad eléctrica, principalmente en el rango del agua salobre a salmuera (<10 mS/cm a 200 mS/cm, aproximadamente). Este dominio corresponde a una zona de mezcla entre aguas provenientes de los márgenes del salar y la salmuera del núcleo, en donde se presentan agua salina o fluido de transición, y salmuera subsaturada.
    - iii. Núcleo hipersalino que presenta aguas subterráneas con valores de CE del orden de 227 mS/cm, correspondiente exclusivamente a salmuera en equilibrio con NaCl.
- De los resultados obtenidos de información química se observa que tanto las aguas superficiales como subterráneas tienen composición predominantemente clorurada sódica. La zona aluvial y las quebradas ubicadas al este del Salar presentan mayores porcentajes de carbonatos y sulfatos que el resto, siendo también cloruradas sódicas.
- En función de la información isotópica se reconoce que:
  - a. En aguas y salmueras subterráneas, se distinguen dos grupos. El primer grupo corresponde a muestras que se encuentran entre la LMWL y LMWL sin deutero, que representan las aguas de recarga infiltradas desde la Cordillera Occidental hacia la zona Aluvial; que han sido levemente afectadas por evaporación, lo que sugiere que su infiltración post precipitación fue rápida. Un segundo grupo, donde se ubica la mayoría de las muestras caracterizadas a escala regional sigue la tendencia de una línea de evaporación local (LEL), y corresponde con una línea de mezcla entre aguas que se ven afectadas por evaporación y que están más y menos evaporadas.
  - b. De manera similar a las aguas subterráneas, las aguas superficiales en la Cordillera Occidental y sobre la Planicie Aluvial se alinean con la LMWL, lo que indica que estas aguas apenas han sido afectadas por evaporación. Por otra parte, en la Zona Marginal, Zona Transición y núcleo, los enriquecimientos en



isotopos pesados aumentan, representativo de mayor grado de evaporación en las aguas, siendo máximos en los cuerpos de agua terminales de cada sistema lagunar.

#### 4.3.9.7 Bibliografía

- Albemarle. (2019). Plan de Seguimiento Ambiental Hídrico (PSAH). Proyecto “Modificaciones y Mejoramiento del Sistema de Pozas de Evaporación Solar en el Salar de Atacama”. Informe Anual N° 3. Período enero – diciembre 2018.
- Amphos21. (2009a). Actualización del modelo conceptual del sector Soncor. Informe para SQM.
- Amphos21. (2009b). Hidrología del sector oriental del Salar de Atacama, Informe para SQM. Santiago.
- Amphos21. (2009c). Análisis sistemático de la información hidrológica del PSA. Santiago de Chile.
- Aravena, R., Suzuki, O., Pena, H., Pollastri, A., Fuenzalida, H., & Grilli, A. (1999). Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile. *Applied Geochemistry*, 14(4), 411-422.
- Custodio, E., & Llamas, M. (2001). *Hidrología Subterránea*, segunda edición.
- DICTUC. (2009). PSAH. Proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama. Informe N° 5. Santiago de Chile.
- Fock, A. (2011). Estudio del acuífero aluvial del borde este del salar de Atacama, entre quebradas Camar y Socaire, comuna San Pedro de Atacama, II Región de Antofagasta, Chile. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea y Universitat Politècnica de Catalunya.
- Garcés, I., López, P. L., Auqué, L. F., Chong, G., Vallés, V., & Gimeno, M. J. (1996). Características Geoquímicas Generales del Sistema Salino del Salar de Llamara (Chile). *Estudios Geológicos* 52, 23-35.
- Geodatos. (2000). Estudio geofísico mediante trasiente electromagnético (TEM) y nano-TEM. Proyecto borde este Salar de Atacama.
- Geodatos. (2011). Estudio geofísico de Transiente Electromagnético TEM y nanoTEM. Proyecto: Soncor-Tocónao, Salar de Atacama. SLM-NX-1 de Peine.
- Geodatos. (2013). Toconao-Este Salar de Atacama. SQM SALAR S.A.
- Geodatos. (2013a). Apéndice A: Estudio Geofísico NantoTEM y TEM. Proyecto Sector Sur Salar de Atacama. [Informe]. - Región de Antofagasta, Chile. Informe para Rockwood Lithium.
- Geodatos. (2013b). Toconao-Este Salar de Atacama. SQM SALAR S.A.
- Geodatos. (2014). Estudio geofísico mediante MT y TEM. Proyecto borde oriental cuenca Salar de Atacama. para ICASS LTDA - Dirección General de Aguas.
- Geodatos. (2017). Estudio geofísico de Resistividad Métodos TEM y NanoTEM. Borde Este Salar de Atacama, Sectores de Quelana y Soncor, San Pedro de Atacama, Región de Antofagasta, Chile. SQM Salar S.A.
- Geohidrología. (2011). Origen de las aguas del sistema Soncor. Santiago de Chile.
- Golder Associates. (2017a). Informe n°16 Plan de Alerta Temprana para el acuífero Monturaqui-Negrillar-Tilopozo, para Minera Escondida.
- Golder Associates. (2017b). Línea de base Hidrogeología, Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Monturaqui.

Hidroestudios (2021). Informe de Investigación Activación Fase II. Indicadores de estado L1-5 y L1-G4. Plan de Contingencias RCA 226/2006 SQM Salar S.A.

IDAEA-CSIC. (2018). Informe de investigación producto de la activación del plan de contingencia en los puntos L1-5 y Reglilla L1-G4. Barcelona.

SGA. (2015). Estudio Hidrogeológico y Modelo Numérico Sector Sur del Salar de Atacama (Anexo 1). Para Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Modificaciones del Sistema de Pozas de Evaporación solar en el Salar de Atacama de Rockwood Lithium. Santiago, Chile.

SQM Salar (2020a), Sección 4.0 – Línea de Base, Acápite 4.5 – Calidad de Aguas Superficiales y Subterráneas - Actualización Plan de Alerta Temprana y Seguimiento Ambiental, Salar de Atacama. EIA desistido.

SQM Salar (2020b), Informe N° 28 del Plan de Seguimiento Ambiental Hidrogeológico (PSAH) proyecto cambios y mejoras de la operación minera en el Salar de Atacama.

SQM Salar (2021a), Modelo Hidrogeológico Conceptual Regional del Salar de Atacama.

SQM Salar (2021b), Modelo Conceptual Hidrogeológico Borde Este

SQM Salar (2021c), Modelo Conceptual Hidrogeológico Peine

SQM Salar (2021d), Modelo Conceptual Hidrogeológico Quelana

SQM Salar (2021e), Modelo Conceptual Hidrogeológico Soncor

SQM Salar (2021f), Modelo Conceptual Hidrogeológico Tilopozo