



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**EXPLORACIÓN EN ROCA Y EN NIVELES PROFUNDOS DEL
RELLENO SEDIMENTARIO: LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
DE LOS ANDES-SAN FELIPE**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

MATÍAS NICOLÁS LUNA AGÜERO

PROFESORA GUÍA:
LINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
IGOR AGUIRRE ARANEDA
BENOÎT VIGUIER

Este trabajo fue parcialmente financiado por la
fundación CSIRO Chile Research

SANTIAGO DE CHILE
2023

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geólogo

POR: Matías Nicolás Luna Agüero

FECHA: 2023

PROFESORA GUÍA: Linda Daniele

PROFESOR CO-GUÍA: Igor Aguirre

**EXPLORACIÓN EN ROCA Y EN NIVELES PROFUNDOS DEL
RELLENO SEDIMENTARIO: LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS
DE LOS ANDES-SAN FELIPE**

La prolongada sequía que afecta a Chile Central pone en un escenario complejo la disponibilidad y gestión de los recursos hídricos. En especial van adquiriendo protagonismo las aguas subterráneas a medida que la disponibilidad superficial disminuye. En el seno de unas acciones orientadas a mitigar la situación de estrés hídrico en la cuenca del Aconcagua, la fundación CSIRO Chile Research desarrolla un proyecto financiado por CORFO cuyo objetivo es determinar zonas de potencial interés para la exploración de acuíferos más profundos que aquellos que son típicamente explotados en el acuífero aluvial.

En el presente Trabajo de Título, realizado en el marco del proyecto de CSIRO, se realiza una revisión de los antecedentes hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, geofísicos e hidrometeorológicos en el sector de Los Andes-San Felipe. Esto con el fin de evaluar la presencia de acuíferos emplazados en profundidad y su conexión hidráulica con las aguas subterráneas más someras, que suelen ser las más explotadas en el valle. Con el fin de obtener información química actualizada de las aguas subterráneas también se realizó una campaña de muestreo hidrogeoquímico.

En el presente estudio se proponen cinco perfiles hidrogeológicos (PL1 a PL5) en los principales sitios de interés para el estudio de aguas subterráneas en roca y en sedimento en Los Andes-San Felipe. En estos lugares, los registros estratigráficos y composicionales descartan la existencia de aislamiento hidráulico entre las unidades hidrogeológicas someras (A, B y C) y profundas (D, E1 y E2), las cuales incluyen roca fracturada. De acuerdo a los datos analizados, las aguas subterráneas de la zona son de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, presentan una química homogénea y edades jóvenes del orden de décadas. Una parte de las muestras profundas es de tipo $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$, pero esto no marca una tendencia generalizada. Las aguas de tipo mixto a $\text{SO}_4\text{-Ca}$, así como las muestras con una alta concentración de Cl ($> 50 \text{ mg/l}$) y NO_3 ($> 10 \text{ mg/l}$), tienden a posicionarse cerca del río Aconcagua. También se observa un aumento en el contenido de nitratos de las muestras tomadas en el presente estudio (9-58 mg/l) en comparación a las mediciones previas a 2010 (0-19 mg/l), lo cual indica una probable contaminación antrópica relacionada con la intensa actividad agrícola de la zona. La composición de las aguas subterráneas está controlada por la interacción agua-roca, en especial, la disolución de silicatos tales como las plagioclasas cálcicas y, en menor medida, la disolución de carbonatos y sulfatos, proceso que tiene mayor influencia sobre las aguas superficiales (ríos y esteros de la zona), las cuales son de tipo $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ y se infiltran al acuífero aluvial, influyendo su composición.

*"Que no está muerto lo que yace eternamente,
y con el paso de los eones extraños, incluso la muerte puede morir"
Abdul Alhazred*

*A mis queridos padres,
Cristina y Benjamín*

Agradecimientos

A la profe Linda por haberme guiado en este largo proceso, por su inmensa disposición y por todo el apoyo que me dio. A Igor por haberme ayudado y apoyado mucho durante mi trabajo en CSIRO. A Benoît por su gran disposición. Y a la Blanca por haberme ayudado un montón con la montaña de trámites que tuve que hacer con la U.

A Felipe, Axel, Matthias y Jorge, por su gran compañerismo y por hacer de la campaña de terreno una muy bonita experiencia. Al equipo de CSIRO, en especial, Karen, por su amabilidad, cordialidad y por haberme brindado la oportunidad de trabajar con ellos.

A toda la gente que conocí en la FCFM por su fuerte compañerismo, apoyo y cariño: Mario H., Cristián B., la gente de Tobalava, Gusetales y Geodude, personas geniales con quienes compartí varios semestres en Geo, todos súper motivados y apañadores. En especial, agradezco a Martín, angelik, vitoko, romy, libe, vane, ignana y tomy (los mantitos), con quienes compartimos bonitos momentos dentro y fuera de la U, incluyendo unas suculentas vacaciones.

A toda mi familia y amigos. En especial al peke, monal, puego, pan, naya, warko (chubaks), xino, diño y barty (mis mejores amigos del berna), quienes siempre han estado ahí apoyándome y apañando. Finalmente, a mis papás, por todo su apoyo y por haberme ayudado con todas las dificultades que enfrenté durante la carrera. Por todo el esfuerzo que han hecho por mí en estos tiempos difíciles, siempre impulsándome a avanzar y mejorar.

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Formulación del problema	1
1.2	Objetivos	3
1.2.1	Objetivo general.....	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	Hipótesis de trabajo	3
2	Área de estudio	4
2.1	Ubicación y rutas de acceso.....	4
2.2	Marco geológico	5
2.2.1	Depósitos no consolidados	5
2.2.2	Rocas estratificadas	7
2.2.3	Rocas intrusivas	7
2.3	Marco estructural	8
2.4	Hidrología e hidrogeología	11
2.5	Hidrometeorología.....	11
2.5.1	Climograma	13
2.5.2	Curvas de variación estacional	13
2.5.3	Clasificación climática de Köppen-Geiger	16
3	Metodología	18
3.1	Revisión de antecedentes.....	19
3.1.1	Catastro de captaciones	19
3.1.2	Hidrogeología.....	21
3.1.2.1	Definición unidades hidrogeológicas	21
3.1.2.2	Distribución unidades hidrogeológicas	23
3.1.2.3	Piezometría.....	26
3.1.2.4	Propiedades hidráulicas	27
3.1.3	Hidrogeoquímica	27
3.1.3.1	Recopilación de datos	27
3.1.3.2	Estimación del total de sólidos disueltos.....	30
3.1.3.3	Validación de datos	31
3.2	Campaña hidrogeoquímica	32
3.2.1	Selección de puntos a muestrear	32
3.2.1.1	Definición de criterios.....	32

3.2.1.2 Selección preliminar	34
3.2.1.3 Refinamiento de la selección	34
3.2.2 Equipos y materiales para el muestreo	37
3.2.3 Trabajo de terreno.....	39
3.2.4 Métodos analíticos	40
3.3 Análisis e interpretación de resultados	40
3.3.1 Hidrogeología.....	40
3.3.1.1 Geometría del basamento	40
3.3.1.2 Registros estratigráficos y distribución de unidades	41
3.3.1.3 Mapa de isopiezas.....	42
3.3.1.4 Perfiles hidrogeológicos	43
3.3.2 Hidrogeoquímica	46
3.3.2.1 Validación de datos	46
3.3.2.2 Características fisicoquímicas	47
3.3.2.3 Clasificación de las aguas.....	47
3.3.2.4 Procesos que controlan la química de las aguas	48
3.3.2.5 Matriz de correlación	48
3.3.2.6 Mapas de distribución.....	49
3.3.2.7 Procesos de interacción agua-roca	49
4 Resultados.....	50
4.1 Hidrogeología	50
4.1.1 Geometría del basamento.....	50
4.1.2 Registros estratigráficos y distribución de unidades.....	52
4.1.3 Mapa de isopiezas	55
4.1.4 Perfiles hidrogeológicos	57
4.1.4.1 Fallas principales	58
4.1.4.2 Perfiles generales (PG): unidades principales del valle ..	59
4.1.4.3 Perfiles locales (PL): aguas subterráneas en roca fracturada y en niveles permeables cerca del basamento	66
4.2 Hidrogeoquímica	74
4.2.1 Características fisicoquímicas	74
4.2.2 Clasificación de las aguas	76
4.2.3 Procesos que controlan la química de las aguas.....	79
4.2.4 Matriz de correlación.....	79
4.2.5 Mapas de distribución	81

5	Discusión	83
5.1	Hidrogeología	83
5.2	Hidrogeoquímica	85
6	Conclusiones	95
7	Bibliografía	97
8	Anexos	106
	Anexo A. Elaboración de climograma y curvas de variación estacional.	106
	Anexo B. Estaciones meteorológicas y fluviométricas operativas al 2018 en el sector de Los Andes-San Felipe (fuente: SNIA, DGA).....	108
	Anexo C. Estadísticas de dispersión de las precipitaciones acumuladas mensuales (mm) registradas en las estaciones meteorológicas operativas al 2018 en Los Andes-San Felipe.	109
	Anexo D. Estadísticas de dispersión de los caudales medios mensuales (m ³ /s) registrados en las estaciones fluviométricas operativas al 2018 en Los Andes-San Felipe.	111
	Anexo E. Perfiles geológicos propuestos por la DOH (2009) en Los Andes-San Felipe.	112
	Anexo E-1. Perfil AA'	112
	Anexo E-2. Perfil BB'	113
	Anexo E-3. Perfil CC'	114
	Anexo E-4. Perfil DD'.....	115
	Anexo F. Base de datos hidrogeoquímica: muestras de pozos (n°1- n°45) y agua superficial (n°46-n°53).	116
	Anexo F-1. Identificación y ubicación de los puntos con hidrogeoquímica disponible en Los Andes-San Felipe.....	116
	Anexo F-2. Características de habilitación y fechas de muestreo de los puntos con hidrogeoquímica disponible en Los Andes-San Felipe. .	118
	Anexo F-3. Parámetros fisicoquímicos y constituyentes mayoritarios en los puntos con hidrogeoquímica disponible en Los Andes-San Felipe.	120
	Anexo G. Características principales de los pozos de la base de datos hidrogeoquímica.	122
	Anexo H. Lista de pozos con registro estratigráfico disponible en Los Andes-San Felipe.....	123
	Anexo I. Resultados del balance iónico. Las últimas dos columnas a la derecha indican si se cumplen los criterios citados en el texto.	125
	Anexo J. Registro estratigráfico y perfil de habilitación de los pozos con cribado instalado en roca.....	126

Anexo K. Isopiezas del presente estudio (período 1998-1999) versus isopiezas de la DOH (2009) (período octubre de 1990-enero de 1991).	131
Anexo L. Diagramas de Stiff de las estaciones DGA (muestras n°46 a n°53) en Los Andes-San Felipe.....	132

Índice de tablas

Tabla 1. Unidades hidrogeológicas definidas en la zona de estudio.....	22
Tabla 2. Coordenadas de las estaciones TEM y puntos intermedios del perfil "Z1P13" de la DOH (2006).....	26
Tabla 3. Error admisible del balance iónico en función de la CE (Custodio & Llamas, 1976).....	31
Tabla 4. Error admisible del balance iónico en función de la suma de aniones (Crites <i>et al.</i> , 2000, como se citó en Gómez, 2009).	32
Tabla 5. Clasificación de las captaciones según la profundidad del cribado. ..	33
Tabla 6. Matriz de criterios empleada para refinar la selección de puntos a muestrear en la campaña de muestreo hidrogeoquímico.	35
Tabla 7. Recipientes utilizados para el muestreo de aguas subterráneas.	39
Tabla 8. Clasificación de colores para las categorías de cribado definidas.....	48
Tabla 9. Características de las principales fallas descritas en la zona de estudio.....	58
Tabla 10. Matriz de correlación de los principales parámetros de la base de datos hidrogeoquímica (considerando solo aguas subterráneas).	80

Índice de figuras

Figura 1. Mapa de ubicación y rutas de acceso al sector de Los Andes-San Felipe, Región de Valparaíso, Chile.	4
Figura 2. Mapa geológico del sector de Los Andes-San Felipe. Figura editada de Bustamante <i>et al.</i> (2012).	6
Figura 3. Principales formaciones y estructuras geológicas descritas en torno a la zona de estudio. Figura tomada de Machuca (2017).	9
Figura 4. Evolución de la Cuenca de Abanico entre los 32-33°S del Eoceno Medio-Oligoceno al Mioceno Temprano. Figura tomada de Machuca (2017)..	10
Figura 5. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA operativas en el sector de Los Andes-San Felipe.	12
Figura 6. Climograma de la estación Vilcuya. Ppmm: precipitación media mensual. Tmm: temperatura media mensual.	14
Figura 7. Precipitaciones medias mensuales (Ppmm) del período 2000-2017 en las estaciones meteorológicas operativas en Los Andes-San Felipe.	14
Figura 8. Curvas de variación estacional de las precipitaciones acumuladas mensuales (Ppam) en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio..	15
Figura 9. Curvas de variación estacional de los caudales medios mensuales (Qmm) en las estaciones fluviométricas de la zona de estudio.	17
Figura 10. Esquema de colores estandarizado para representar las características hidrogeológicas y la presencia de aguas subterráneas en las formaciones geológicas. Figura editada de Struckmeier & Margat (1995).....	23
Figura 11. Mapa de ubicación de los perfiles propuestos en los estudios de la DOH (2006) y DOH (2009).	24
Figura 12. Mapa de ubicación de los pozos y estaciones con hidrogeoquímica disponible en Los Andes-San Felipe.....	29
Figura 13. Mapa de ubicación de los puntos seleccionados para la campaña de muestreo hidrogeoquímico y perfiles geofísicos inicialmente propuestos por la fundación CSIRO Chile Research.....	36
Figura 14. Fotografías de las principales herramientas y materiales utilizados en la campaña de muestreo hidrogeoquímico efectuada con CSIRO.	38
Figura 15. Manteo real (μ_r) y manteo aparente (μ_a) de una falla intersectada por el plano vertical de un perfil.	44

Figura 16. Mapa de la profundidad del basamento en la zona de estudio.	51
Figura 17. Mapa de ubicación de los pozos de interés con estratigrafía disponible y trazas de los perfiles geológicos propuestos por la DOH (2009) en Los Andes-San Felipe.	53
Figura 18. Mapa de distribución de las unidades hidrogeológicas definidas en el sector de Los Andes-San Felipe.	54
Figura 19. Mapa de isopiezas del período 1998-1999 en la zona de estudio.	56
Figura 20. Mapa de ubicación de los perfiles propuestos en este estudio y en los estudios de la DOH (2006) y DOH (2009).	57
Figura 21. Perfil hidrogeológico general 1 (PG1) propuesto en la zona de estudio.	60
Figura 22. Perfil hidrogeológico general 2 (PG2) propuesto en la zona de estudio.	61
Figura 23. Perfil hidrogeológico general 3 (PG3) propuesto en la zona de estudio.	62
Figura 24. Perfil hidrogeológico general 4 (PG4) propuesto en la zona de estudio.	63
Figura 25. Perfil hidrogeológico general 5 (PG5) propuesto en la zona de estudio.	64
Figura 26. Perfil hidrogeológico general 6 (PG6) propuesto en la zona de estudio.	65
Figura 27. Perfil hidrogeológico local 1 (PL1) propuesto en la zona de estudio.	67
Figura 28. Perfil hidrogeológico local 2 (PL2) propuesto en la zona de estudio.	68
Figura 29. Perfil hidrogeológico local 3 (PL3) propuesto en la zona de estudio.	69
Figura 30. Perfil hidrogeológico local 4 (PL4) propuesto en la zona de estudio.	70
Figura 31. Perfil hidrogeológico local 5 (PL5) propuesto en la zona de estudio.	71
Figura 32. Pozos con estratigrafía y perfiles cerca de (a) PL4 y (b) PL5.	73

Figura 33. Gráficos de caja y bigotes (boxplots) de los parámetros fisicoquímicos medidos en las aguas subterráneas.	75
Figura 34. Gráficos de caja y bigotes (boxplots) de los parámetros fisicoquímicos medidos en las aguas superficiales.	75
Figura 35. Diagrama de Piper con la química de las aguas subterráneas y las aguas superficiales muestreadas en la zona de estudio.	77
Figura 36. Diagramas de Stiff de las aguas subterráneas y las aguas superficiales muestreadas en la zona de estudio.	78
Figura 37. Diagrama de Gibbs de las aguas de Los Andes-San Felipe.	80
Figura 38. Mapa de distribución de la concentración de (a) Cl y (b) NO ₃ en las aguas muestreadas entre 1965-2018. CL: Calle Larga. C: Curimón. R: Rinconada. SE: San Esteban. SF: San Felipe. SM: Santa María. LA: Los Andes.	82
Figura 39. Gráfico de (a) Ca vs SO ₄ y (b) Ca+Mg versus HCO ₃ +SO ₄	87
Figura 40. Gráfico de Ca/Mg versus Cl.	88
Figura 41. Gráfico de (a) Ca versus HCO ₃ y (b) Na versus HCO ₃ – Ca.	90
Figura 42. Perfil de profundidad de (a) NO ₃ y (b) SO ₄ . Las rectas verticales (barras de error) indican el rango de profundidad del cribado de cada pozo.	92

1 Introducción

1.1 Formulación del problema

El problema fundamental en torno al recurso hídrico es que, desde la antigüedad, se le ha atribuido un carácter infinito. La cantidad de agua que existe a nivel mundial se estima en unos 1400 millones de km³, volumen de carácter invariable donde menos de un 3% corresponde a agua dulce, la cual además se encuentra en condiciones de contaminación debido a su continua sobreexplotación (Rey, 2010). Son diversos los factores que influyen en esta problemática y complejizan la gestión sustentable del recurso, entre ellos: el crecimiento demográfico, el aumento de la demanda, el cambio climático y el deterioro de la calidad de las aguas causado por actividades antrópicas como, por ejemplo, la agricultura y la minería (e. g. Zalidis *et al.*, 2002; Younger & Wolkersdorfer, 2004; Iglesias *et al.*, 2005; Ochieng *et al.*, 2010).

En Chile, diferentes estudios (e. g. Escenarios Hídricos 2030 [EH2030], 2018; Garreaud *et al.*, 2020) señalan que las últimas décadas, y en especial, desde 2010, se ha producido un incremento de las sequías. Lo anterior se ha visto reflejado en la reducción de las reservas de nieve y en la disminución de los caudales de ríos y esteros, lo que a su vez se ha traducido en un déficit de la cantidad de agua disponible para los sectores productivos (agrícola e industrial), los distintos ecosistemas y el consumo humano. A todo lo anterior, se añade el empeoramiento de la calidad de las aguas y el aumento de la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos de carácter extremo, como lo señala el Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2016).

En la zona central de Chile, entre la Región de Valparaíso (río Aconcagua) y la Región del Maule (río Biobío), el estudio de EH2030 (2018) reveló una tendencia al incremento de la evapotranspiración potencial. También se observa una reducción importante de las precipitaciones, las cuales son indispensables para la agricultura de secano y la actividad forestal, actividades muy desarrolladas en las regiones afectadas. Garreaud *et al.* (2015) señalan que en el período 2010-2014, al que denominan período de "megasequía", en las regiones de Coquimbo y Valparaíso se alcanzó un déficit promedio de un 70% en los caudales de los ríos y 25% en las precipitaciones en los sectores precordilleranos.

En este contexto destaca la Dirección General de Aguas (DGA), organismo estatal que se encarga de la administración del recurso hídrico a nivel nacional mediante la gestión y constitución de los derechos de aprovechamiento de agua. En materias de gestión, tanto la DGA, en Chile, como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), a nivel latinoamericano, señalan que se requieren mejoras en los aspectos legales

relativos a la administración del recurso hídrico y a la prevención de su contaminación, así como la cuantificación de su disponibilidad real (Quintana, 2008).

En la Región de Valparaíso, la situación de escasez hídrica es especialmente acentuada en el valle del río Petorca producto del cultivo de paltos (Facchini & Laville, 2018). Más hacia el sur, en la cuenca del río Aconcagua, la demanda de derechos de agua ha incrementado en el tiempo: en agosto de 2015, la DGA registró un total de 3.389 derechos de agua subterránea otorgados por un caudal total de 35.665 l/s y 1.098 derechos de agua superficial (cauces) otorgados por un caudal total de 448.395 l/s (DGA, 2015). Estos derechos están a nombre de diferentes solicitantes tales como empresas agrícolas, centrales hidroeléctricas, dueños particulares, entre otros. Entre ellos destaca la empresa Esva S.A., principal encargada del abastecimiento de agua potable para los habitantes de la región.

Frente a este marco de estrés hídrico se han propuesto diferentes iniciativas para mejorar la situación, entre las que se encuentra la exploración de aguas subterráneas más profundas. El proyecto "Exploración de aguas subterráneas profundas y acuíferos periféricos en cuencas de la Región de Valparaíso", desarrollado por la fundación CSIRO Chile Research entre 2018 y 2020 en el marco del Programa CORFO "Plan de Inversiones Estratégicas en Recursos Hídricos para la Competividad de la Meso-Región Norte Chile", se diseñó para explorar y evaluar la existencia de acuíferos más profundos que usualmente no son explotados en la región. En el proyecto se planteó como hipótesis que estos acuíferos podrían encontrarse aislados hidráulicamente de los más someros, permitiendo su manejo con miras al abastecimiento de contingencia en períodos de extrema escasez hídrica de manera que no se afecten las reservas de agua más someras.

En el marco del proyecto de CSIRO nace el presente Trabajo de Título denominado "Exploración en roca y en niveles profundos del relleno sedimentario: las aguas subterráneas de Los Andes-San Felipe". Este trabajo tiene como principal objetivo caracterizar potenciales acuíferos emplazados a profundidades cercanas al basamento en el sector de Los Andes-San Felipe, en roca fracturada y en sedimento, así como evaluar su conexión hidráulica con las aguas subterráneas más someras.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de esta memoria es evaluar la presencia de aguas subterráneas a profundidades cercanas al basamento en el sector de Los Andes-San Felipe, tanto en sedimento como en roca fracturada, y determinar su conexión hidráulica con las aguas subterráneas más someras.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar la hidrogeoquímica de los acuíferos existentes en la depresión de Los Andes-San Felipe.
2. Determinar la conexión hidráulica entre las unidades hidrogeológicas emplazadas a baja profundidad y aquellas cercanas al basamento.
3. Proponer sitios de interés para una futura exploración de aguas subterráneas en roca fracturada y en niveles sedimentarios confinados a profundidades cercanas al basamento.

1.3 Hipótesis de trabajo

En el presente estudio se planteó como hipótesis de trabajo la existencia de dos sistemas de acuíferos en el sector de Los Andes-San Felipe, los cuales constituyen posibles recursos hídricos que se encuentran hidráulicamente aislados entre sí: por un lado, un acuífero libre de recarga local y tiempo de residencia acotado (unidades hidrogeológicas A, B y C), donde no existe flujo subterráneo vertical hacia las unidades hidrogeológicas más profundas; y, por otro lado, un sistema de acuíferos emplazados a profundidades cercanas al basamento, en sedimentos (unidad hidrogeológica D) y/o en roca fracturada, cuyas aguas poseen un mayor tiempo de residencia. Esta hipótesis se origina de las diferencias granulométricas existentes entre las distintas unidades, donde la unidad hidrogeológica D, que es la más profunda en la secuencia sedimentaria, presenta el mayor contenido de finos (limos/arcillas), los cuales podrían imponer cierto nivel de aislamiento entre las unidades sobreyacentes y las aguas subterráneas en roca. Este aislamiento, en caso de verse confirmada la hipótesis, debiera reflejarse en las aguas subterráneas como una variación en la hidrogeoquímica o en los parámetros hidráulicos.

2 Área de estudio

2.1 Ubicación y rutas de acceso

La cuenca del río Aconcagua se ubica en la Región de Valparaíso (Chile) entre las latitudes $32^{\circ}20'S$ - $33^{\circ}07'S$ y las longitudes $71^{\circ}31'O$ - $70^{\circ}00'O$. Esta cuenca se localiza en el extremo sur de la zona de los valles transversales, abarcando un área de unos 7.340 km^2 y exhibiendo un rumbo O-E. El área de estudio se ubica en la cabecera del valle del río Aconcagua, concretamente, en la depresión circular donde se hallan las ciudades de San Felipe y Los Andes (Figura 1). Sus principales vías de acceso son la Ruta E-71 (que accede desde el norte a través de San Felipe), la Ruta 60 (que accede desde el oeste por San Felipe y desde el este por El Guape) y la Ruta 57 o Autopista Los Libertadores (que accede desde el sur por Auco).

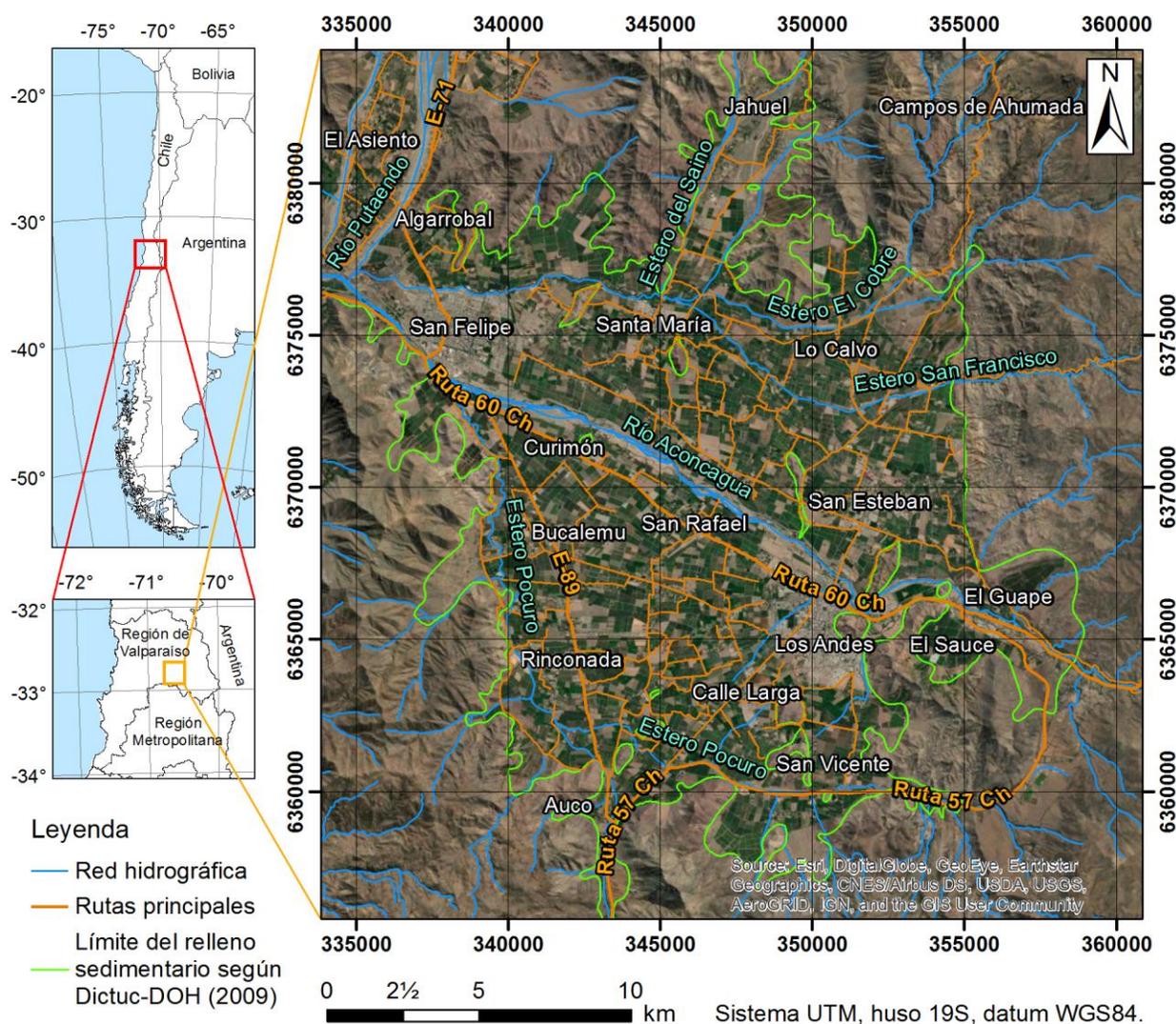


Figura 1. Mapa de ubicación y rutas de acceso al sector de Los Andes-San Felipe, Región de Valparaíso, Chile.

2.2 Marco geológico

La geología de superficie propuesta de forma más reciente para la zona de estudio corresponde al "Mapa 1: Geología del Área de Jahuel" de escala 1:50.000 publicado por el Sernageomin en el estudio de Bustamante *et al.* (2012) (Figura 2). Este estudio presenta un mayor nivel de detalle en comparación al mapa geológico de escala 1:250.000 publicado anteriormente por el Sernageomin en las "Hojas Quillota y Portillo" (Rivano *et al.*, 1993), introduciendo áreas con diferentes tipos de alteración hidrotermal. Cabe mencionar que estos dos mapas presentan diferencias significativas en cuanto a la cobertura de la formación Abanico en la zona de estudio. En concreto, el área que fue definida como la formación Pelambres y las áreas más orientales de la formación las Chilcas (Rivano *et al.*, 1993) fueron reasignadas a la formación Abanico y la formación Lo Valle (Bustamante *et al.*, 2012). A continuación se describen las unidades definidas en la publicación de Bustamante *et al.* (2012).

2.2.1. Depósitos no consolidados

Estos depósitos corresponden a secuencias sedimentarias no consolidadas que cubren las zonas bajas del valle. Los depósitos identificados en la zona de estudio se clasifican como (Bustamante *et al.*, 2012):

- Depósitos fluviales actuales (Qf): corresponden a una secuencia de gravas y ripios arenosos que cubren el lecho del río Aconcagua.
- Depósitos aluviales (Qa): corresponden a sedimentos depositados por efecto de las escorrentías que descienden de las zonas altas del valle.
- Depósitos aluviales-coluviales (Qac): corresponden a sedimentos generados por cursos menores de agua en el valle.
- Depósitos coluviales (Qc): corresponden a material detrítico grueso que conforma conos de deyección de alta pendiente en las principales quebradas del valle.
- Depósitos fluviales antiguos (Qfa): corresponden a sedimentos continentales ubicados entre 3-50 m sobre el cauce actual del río Aconcagua.
- Depósitos de terrazas fluviales antiguas (Qtfa): corresponden a conglomerados y gravas arenosas con espesores de 10-40 m. Estos se observan sobre los 950 m s. n. m. en el sector suroriental de la zona de estudio, en las laderas del río Aconcagua y el estero Pocuro.

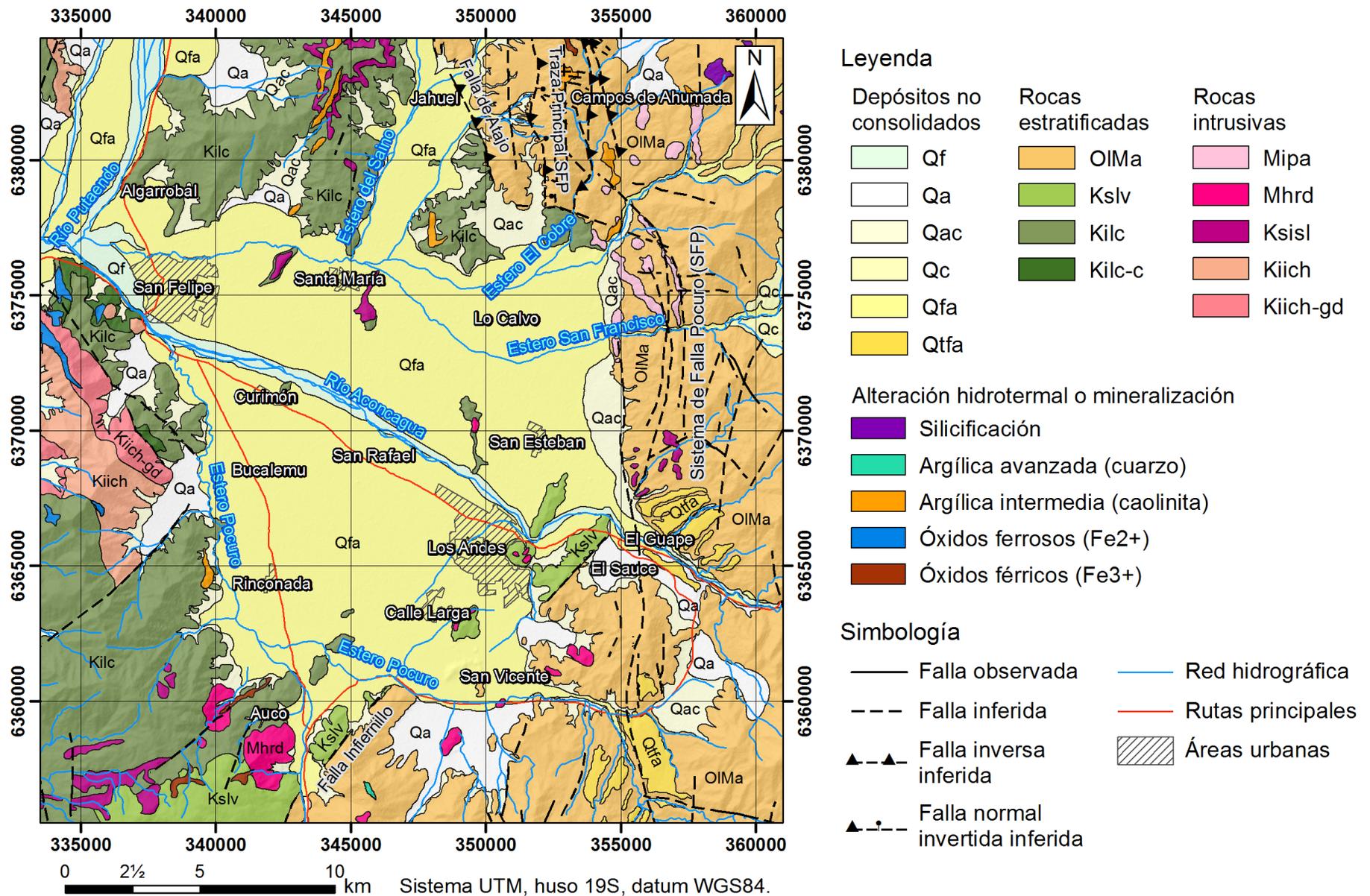


Figura 2. Mapa geológico del sector de Los Andes-San Felipe. Figura editada de Bustamante *et al.* (2012).

2.2.2. Rocas estratificadas

En la zona de estudio se reconocen tres formaciones principales (Bustamante *et al.*, 2012):

- Formación Abanico (OIMa): corresponde a una secuencia volcanosedimentaria del Oligoceno-Mioceno Inferior (Aguirre, 1960). Esta formación se extiende de norte a sur en el sector oriental de la zona de estudio, sobreyaciendo a la formación Lo Valle por contacto tectónico mediante la Zona de Falla Pocuro (ZFP). En la zona de estudio se compone de lavas andesíticas, andesíticas-basálticas y andesíticas-dacíticas con intercalaciones de tobas de lapilli y brechas tobáceas.
- Formación Lo Valle (Kslv): corresponde a una secuencia esencialmente piroclástica del Cretácico Superior (Thomas, 1958), la cual presenta intercalaciones de lavas y secuencias sedimentarias continentales fluviales y lacustres. Esta formación se extiende en dirección SO-NE al oeste de la Falla Infiernillo, aflorando también al este de Los Andes. Subyace a la formación Abanico por contacto tectónico mediante la ZFP. Hacia la base presenta conglomerados y areniscas fluviales rojas con intercalaciones de tobas, mientras que hacia el techo presenta tobas pumíceas y litocristalinas, tobas soldadas, tobas de lapilli y brechas tobáceas dacíticas y andesíticas.
- Formación las Chilcas (Kilc): corresponde a una secuencia volcanosedimentaria continental del Cretácico Inferior (Thomas, 1958), la cual se extiende de norte a sur en el sector occidental de la zona. Esta formación se compone de base a techo por:
 - Calizas fosilíferas (Kilc-c).
 - Conglomerados gruesos compuestos por clastos volcánicos bien redondeados de composición andesítica (andesitas porfíricas y afaníticas) y una matriz arenosa de color rojizo.
 - Areniscas rojizas a pardas de grano medio intercaladas con tobas, lavas andesíticas brechosas rojas y lavas basálticas grises-negras.

2.2.3. Rocas intrusivas

En la zona de estudio se reconocen cuatro unidades intrusivas principales (Bustamante *et al.*, 2012):

- Intrusivo Portezuelo Azufre (Mipa): corresponde a un conjunto de pórfidos dioríticos a riódacíticos con tamaños de hasta 2 km². Estos se encuentran alineados a la ZFP en el sector noreste de la zona de estudio, al norte del estero San Francisco.

- Intrusivos hipabisales riódacíticos (Mhrd): corresponden a cuerpos con morfología de domos de colores grises a rosados con tamaños de hasta 4 km². Estos se encuentran, principalmente, al sur del río Aconcagua, en el sector de Auco y Santa Teresa de Los Andes.
- Intrusivo San Lorenzo (Ksisl): corresponde a un conjunto de pórfidos dioríticos con tamaños de hasta 6 km². Estas rocas afloran al norte de Santa María, al este de San Esteban y al suroeste de Auco.
- Intrusivo Chalinga (Kiich): corresponde a un conjunto de cuerpos dioríticos que conforman un stock de unos 25 km², presentando en ciertos sectores facies granodioríticas y mineralización de magnetita (áreas designadas como "Kiich-gd"). Estas rocas se encuentran al suroeste de la ciudad de San Felipe.

2.3 Marco estructural

De acuerdo a Rivano *et al.* (1993), la zona de Los Andes-San Felipe representa la transición entre un dominio estructural central y otro cordillerano, donde las formaciones geológicas se encuentran divididas por diversas estructuras geológicas (Figura 3). En el Frente Cordillerano Andino se han descrito múltiples estructuras geológicas de orientación aproximada N-S y áreas de alteración hidrotermal, las cuales en su conjunto forman la Zona de Falla Pocuro (ZFP). Estas estructuras habrían controlado la extensión de la Cuenca de Abanico hasta el Oligoceno Superior-Mioceno Inferior, época en que dio inicio un proceso de inversión tectónica (Charrier *et al.*, 2007; Muñoz *et al.*, 2014), induciendo un fuerte plegamiento de los depósitos sedimentarios y la hipotética inversión de las fallas limítrofes de la Cuenca de Abanico (Figura 4).

Durante este proceso, se habrían desarrollado estructuras paralelas y oblicuas a la ZFP (Charrier *et al.*, 1996; Charrier *et al.*, 2002; Farías *et al.* 2008). De acuerdo a Troncoso (2014), la brechización y alteración de la ZFP habrían inducido el desarrollo de un sistema imbricado de vergencia oeste conformado por la Falla Cariño Botado y la Falla San Esteban: la traza de la primera coincidiría con la ZFP, mientras que la segunda sería una falla ciega ubicada unos kilómetros al oeste, y entre ambas estructuras se habría generado una zona de depresión tectónica. En Taucare *et al.* (2022) se señala que la cementación de cuarzo-laumontita en los núcleos de las fallas normales de la ZFP aumentaría su resistencia mecánica frente a la reactivación, proponiendo que la propagación de las fallas inversas durante la fase compresiva de la cuenca se habría dado, preferentemente, en las zonas de debilidad mecánica existentes entre las estructuras de la ZFP (donde se concentran las fracturas).

De acuerdo a Bustamante *et al.* (2012), la ZFP demarca el límite entre las rocas mesozoicas (al oeste) y cenozoicas (al este), con estructuras de rumbo N-S a N20°O (Campbell, 2005) y un desplazamiento vertical del orden de decenas a cientos de metros: Aguirre (1960) señaló desplazamientos de hasta 2.000 m al este de Los Andes. Entre las estructuras descritas en torno a la depresión de Los Andes-San Felipe se reconocen: en el margen sur, la Falla Infiernillo (Fock, 2005), la Zona de Falla Chacabuco (Fock, 2005) y la Falla Algarrobo (Machuca, 2017), que corresponden a fallas inversas de orientación NE-SO y vergencia oeste; en el margen oriental, diversas estructuras de rumbo aproximado N-S tales como la falla San Francisco (Taucare *et al.*, 2022) y otras estructuras de la ZFP; al norte de la depresión, algunas estructuras de orientación aproximada N-S como la falla Campos de Ahumada (Taucare *et al.*, 2022). En la zona también se han descrito estructuras oblicuas a las trazas principales de la ZFP (Campbell, 2005), tales como la falla Jahuel al norte de la depresión (Taucare *et al.*, 2022), la falla Termas El Corazón en el margen oriental (Taucare *et al.*, 2022) y la falla El Quisquerío en el margen sur (Machuca, 2017).

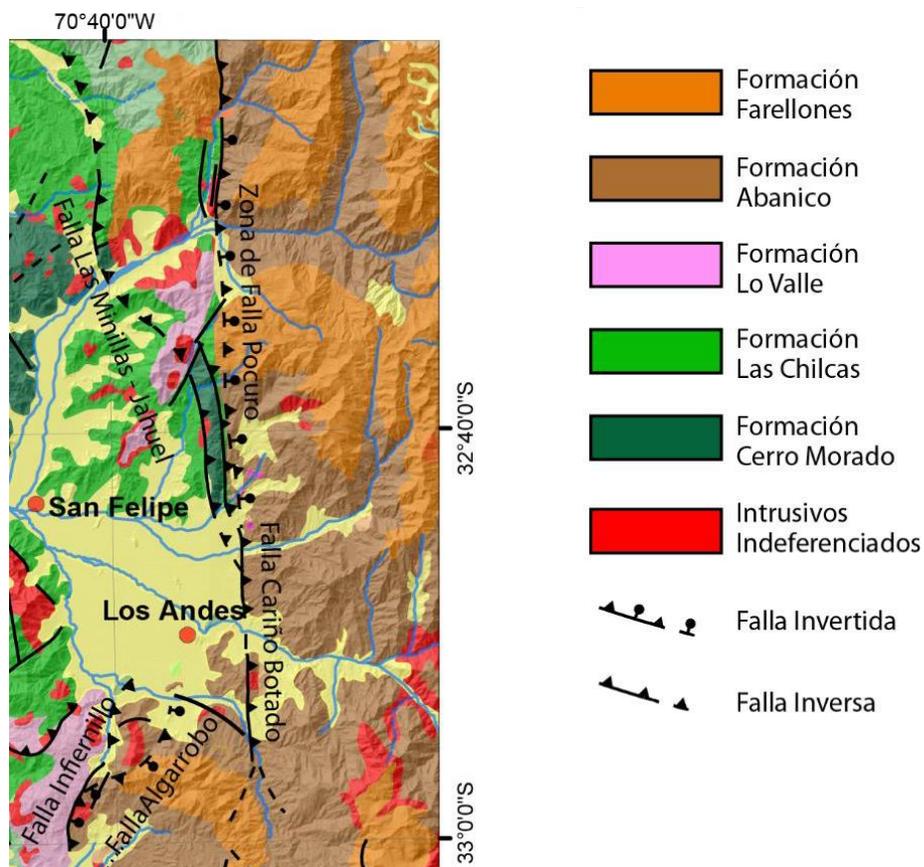
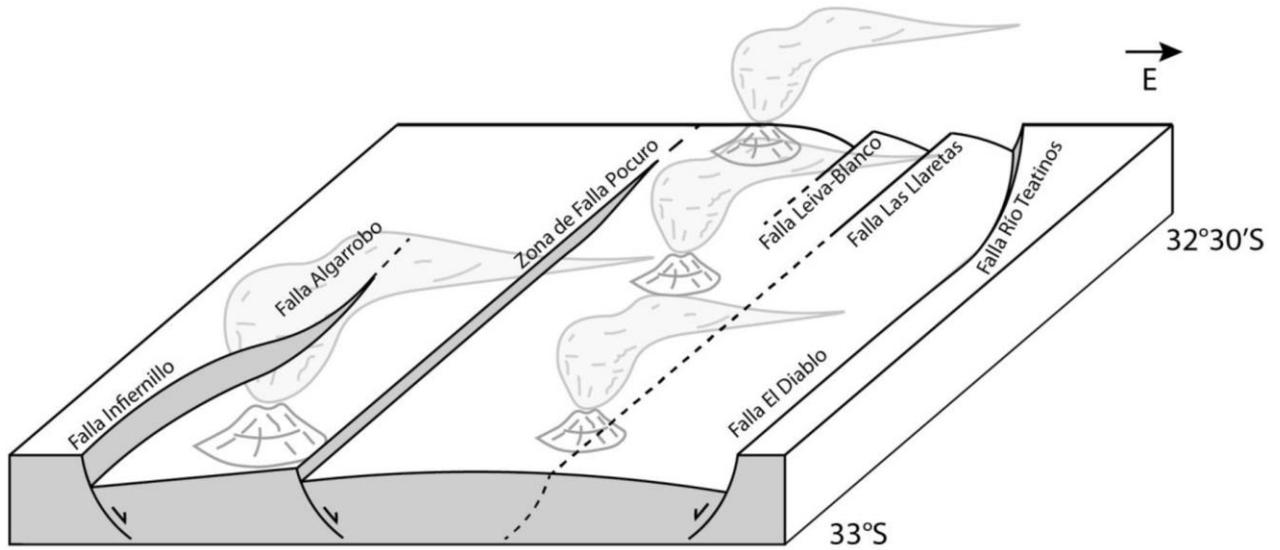


Figura 3. Principales formaciones y estructuras geológicas descritas en torno a la zona de estudio. Figura tomada de Machuca (2017).

Eoceno Medio-Oligoceno



Mioceno Temprano

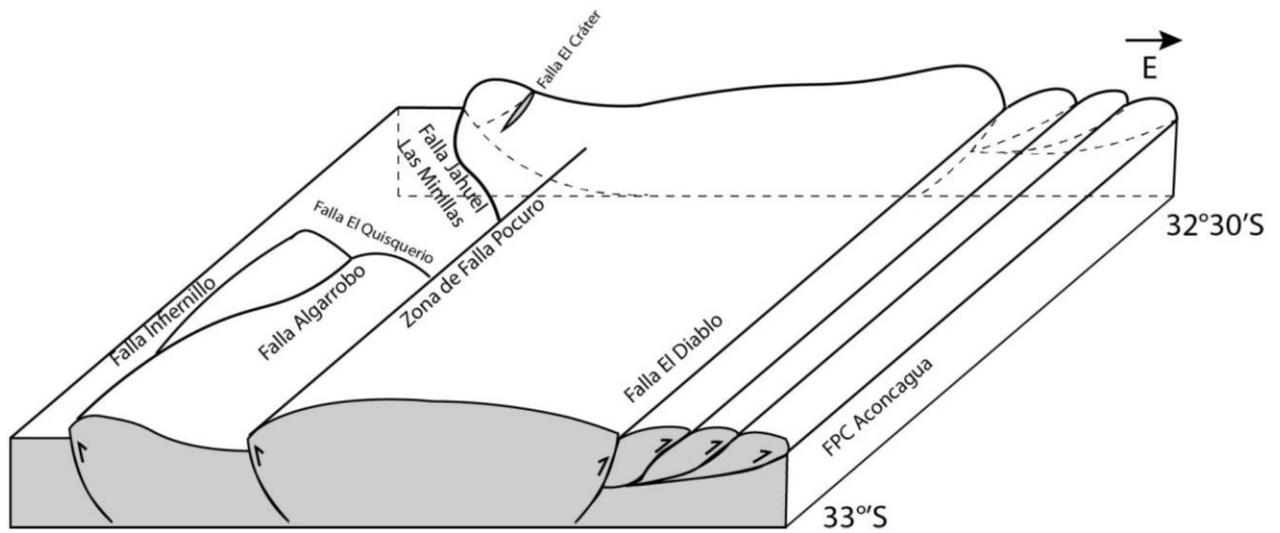


Figura 4. Evolución de la Cuenca de Abanico entre los 32-33°S del Eoceno Medio-Oligoceno al Mioceno Temprano. Figura tomada de Machuca (2017).

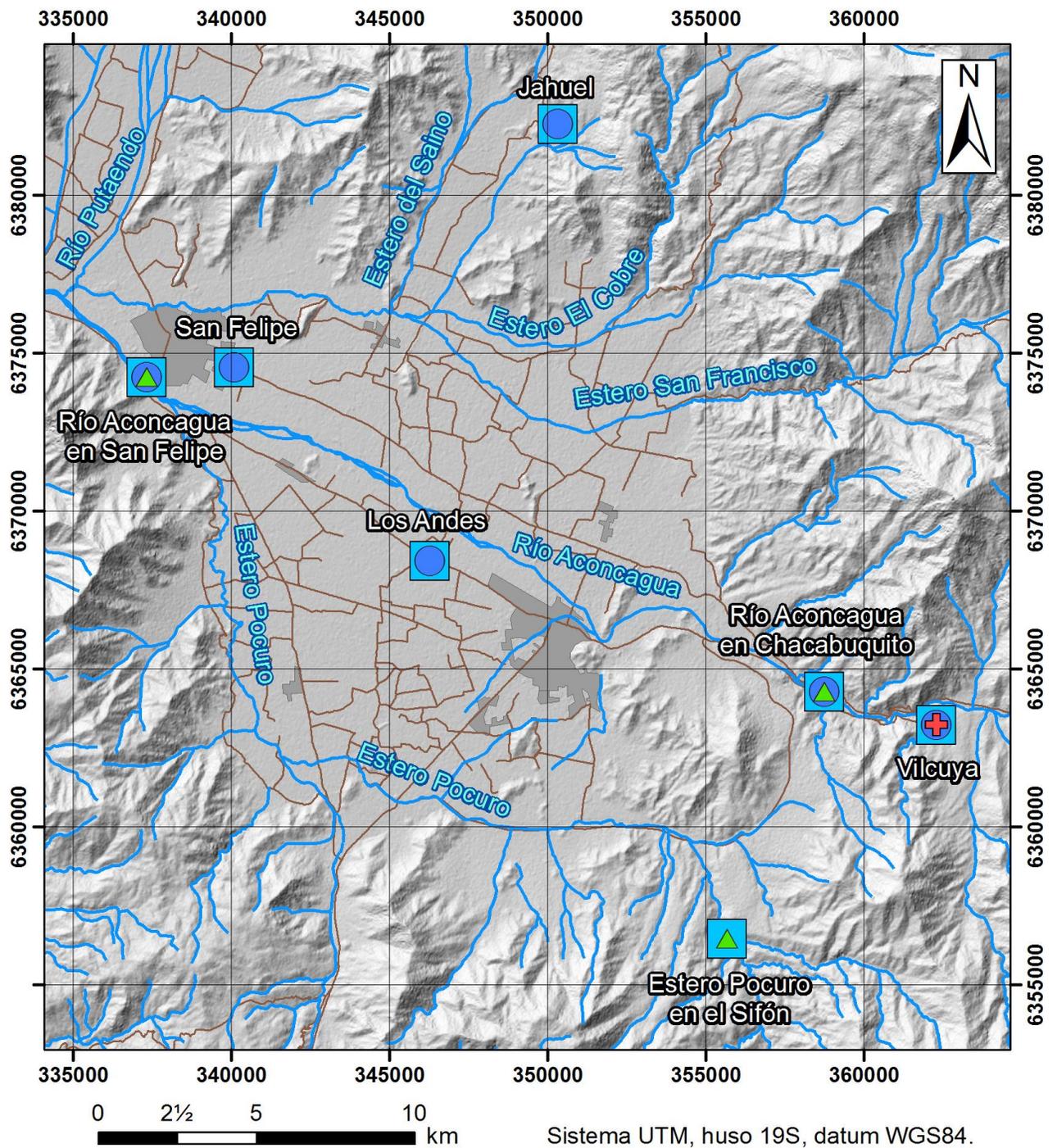
2.4 Hidrología e hidrogeología

El río Aconcagua se origina en la confluencia de los ríos Juncal y Blanco, a una cota cercana a los 1.430 m s. n. m. en la Cordillera Principal, y presenta una extensión aproximada de 140 km hasta el punto de desembocadura al norte de Concón. Este río posee una orientación general O-E que cambia localmente a N-S en el sector de Llay-Llay y La Calera-Quillota, recibiendo el aporte de diferentes tributarios tales como el río Colorado, el estero Pocuro, el río Putaendo y el estero Limache. En las secciones media y alta de la cuenca, donde se halla la zona de estudio, el río Aconcagua presenta un régimen predominantemente nival, lo que se refleja en un aumento significativo del caudal durante los meses de primavera a causa del deshielo en la cordillera (DGA, 2004a).

Los acuíferos reconocidos en la cuenca se distribuyen en torno a los cauces de los ríos Aconcagua y Putaendo, donde el flujo subterráneo tiende a seguir la misma dirección de estos cauces. En la cuenca se distinguen dos unidades hidrogeológicas principales (DGA, 2004b): la más somera compuesta por material fluvial de alta permeabilidad (gravas y arenas), con una gran capacidad de almacenamiento (estimada cualitativamente en 15%) y valores de transmisividad en el rango 1500-5000 m²/día (Dirección de Obras Hidráulicas [DOH], 1998); y la más profunda compuesta por material de granulometría más fina (arenas limosas-arcillosas), con bajo coeficiente de almacenamiento y transmisividades cercanas a 250 m²/día (DOH, 1998). Pese a tener menores valores de transmisividad, las captaciones que explotan la segunda unidad en general presentan buenos rendimientos y, en algunos casos, alcanzan valores de transmisividad de 700 m²/día (DGA, 2004b).

2.5 Hidrometeorología

En el sector de Los Andes-San Felipe, la DGA cuenta con una red hidrométrica conformada por seis estaciones meteorológicas y tres estaciones fluviométricas (Figura 5). Estas efectúan mediciones periódicas, permitiendo establecer una visión general de las condiciones hidrometeorológicas que gobiernan la zona de estudio. A continuación se describen los principales aspectos derivados de los registros históricos de las estaciones meteorológicas, así como la clasificación climática establecida para la zona. El proceso de recolección de datos y la elaboración de los gráficos se detalla en el Anexo A.



Leyenda

- | | |
|--|---|
| ■ Estación DGA | Parámetros medidos: |
| — Red hidrográfica | + Temperatura |
| — Red vial | ▲ Caudal |
| ■ Áreas urbanas | ● Precipitaciones |

Figura 5. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA operativas en el sector de Los Andes-San Felipe.

2.5.1 Climograma

En la Figura 6 se muestra el climograma de la estación Vilcuya, localizada unos 12 km al este de Los Andes. En este gráfico se observa que la temperatura media mensual presenta una variación anual moderada, mostrando una diferencia máxima de 11 °C entre el mes más frío (julio) y el más cálido (enero). La precipitación acumulada anual registrada en la estación alcanza los 345,2 mm (promedio entre 1964-2018), donde alrededor del 78% de las precipitaciones ocurren entre los meses de mayo y agosto. En las cinco estaciones meteorológicas restantes, las precipitaciones medias mensuales (promedios históricos de precipitaciones acumuladas mensuales) son levemente inferiores a las de la estación Vilcuya, pero exhiben la misma tendencia a lo largo del año. Lo anterior se ilustra en la Figura 7, donde se muestran las precipitaciones medias mensuales del período 2000-2017.

2.5.2 Curvas de variación estacional

La Figura 8 muestra las curvas de variación estacional de las precipitaciones acumuladas mensuales registradas en las seis estaciones meteorológicas de la zona. En estos gráficos, cada curva (20%, 50% y 80%) representa una cierta probabilidad de excedencia (PE), la cual corresponde a la probabilidad de que se igualen o superen las precipitaciones del eje vertical. En las estaciones *Río Aconcagua en San Felipe* (Figura 8b) y *Río Aconcagua en Chacabuquito* (Figura 8e) se observa cierto grado de bimodalidad, el cual podría ser atribuido al corto periodo de registro en comparación a las demás estaciones (Anexo B).

De acuerdo a los registros de las estaciones, sobre el 90% de las precipitaciones se concentran en el período comprendido entre mayo y septiembre, alcanzando precipitaciones acumuladas anuales en el rango de 179-345 mm. Cabe mencionar que en los gráficos de la Figura 8 no se observa un efecto orográfico acentuado. El Anexo C muestra un resumen de las estadísticas de dispersión de las precipitaciones acumuladas mensuales medidas en la zona de estudio.

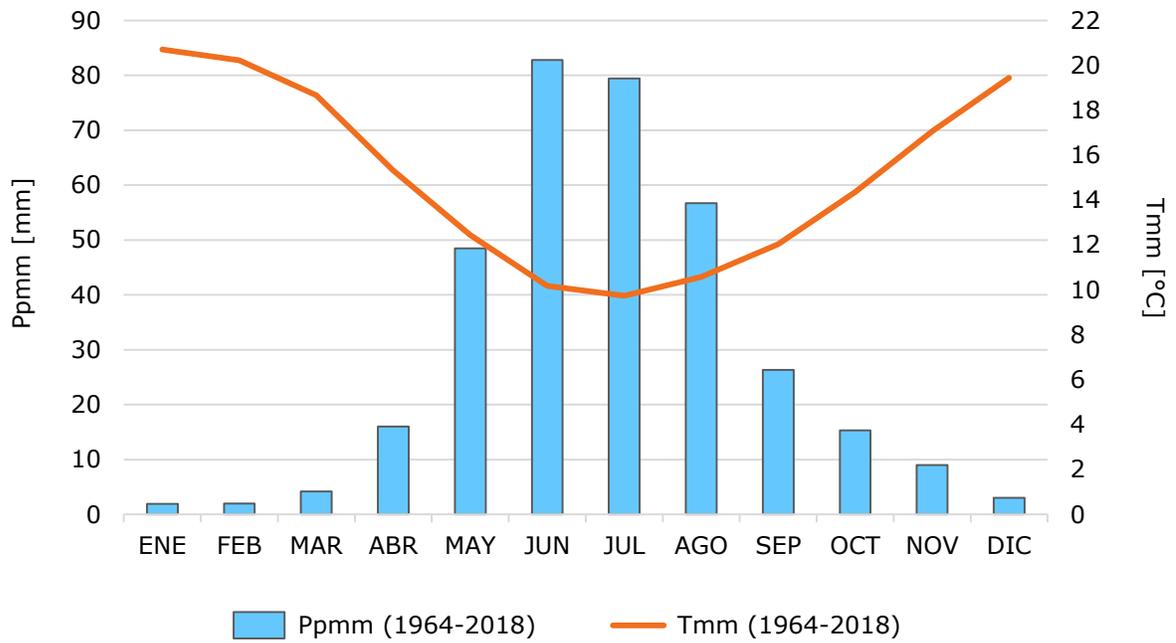


Figura 6. Climograma de la estación Vilcuya. Ppmm: precipitación media mensual. Tmm: temperatura media mensual.

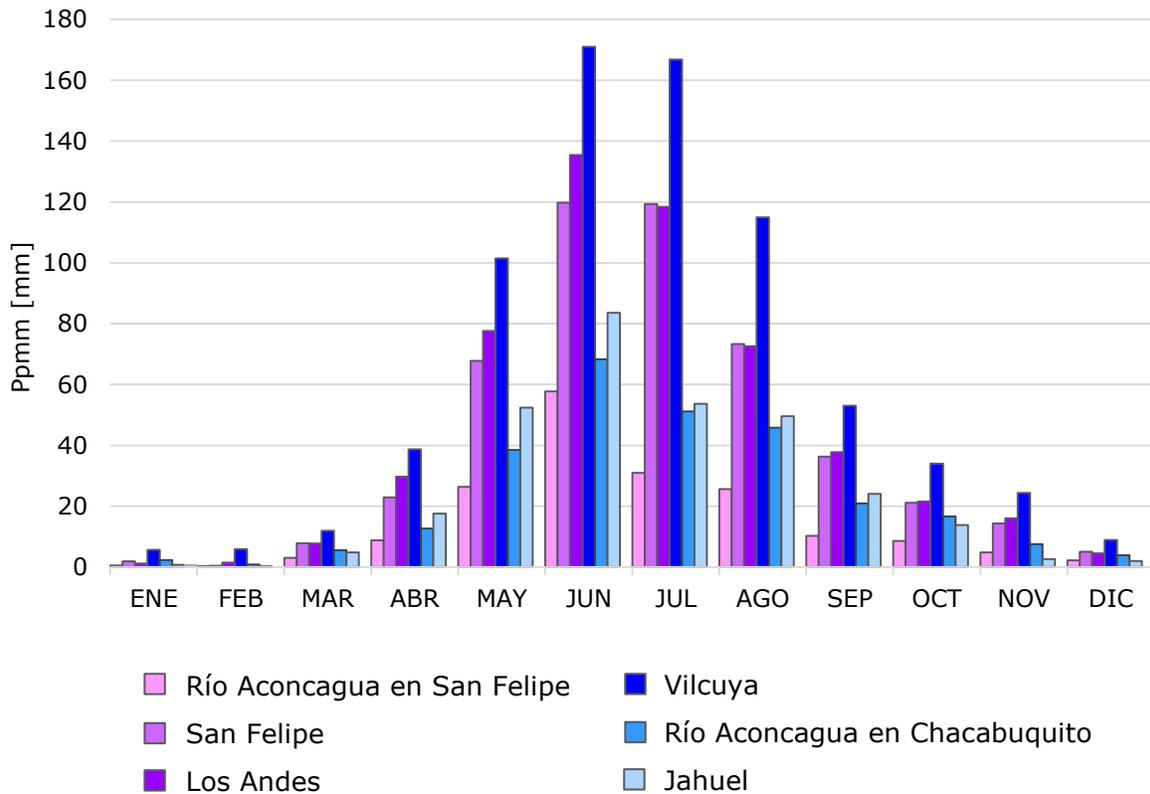


Figura 7. Precipitaciones medias mensuales (Ppmm) del período 2000-2017 en las estaciones meteorológicas operativas en Los Andes-San Felipe.

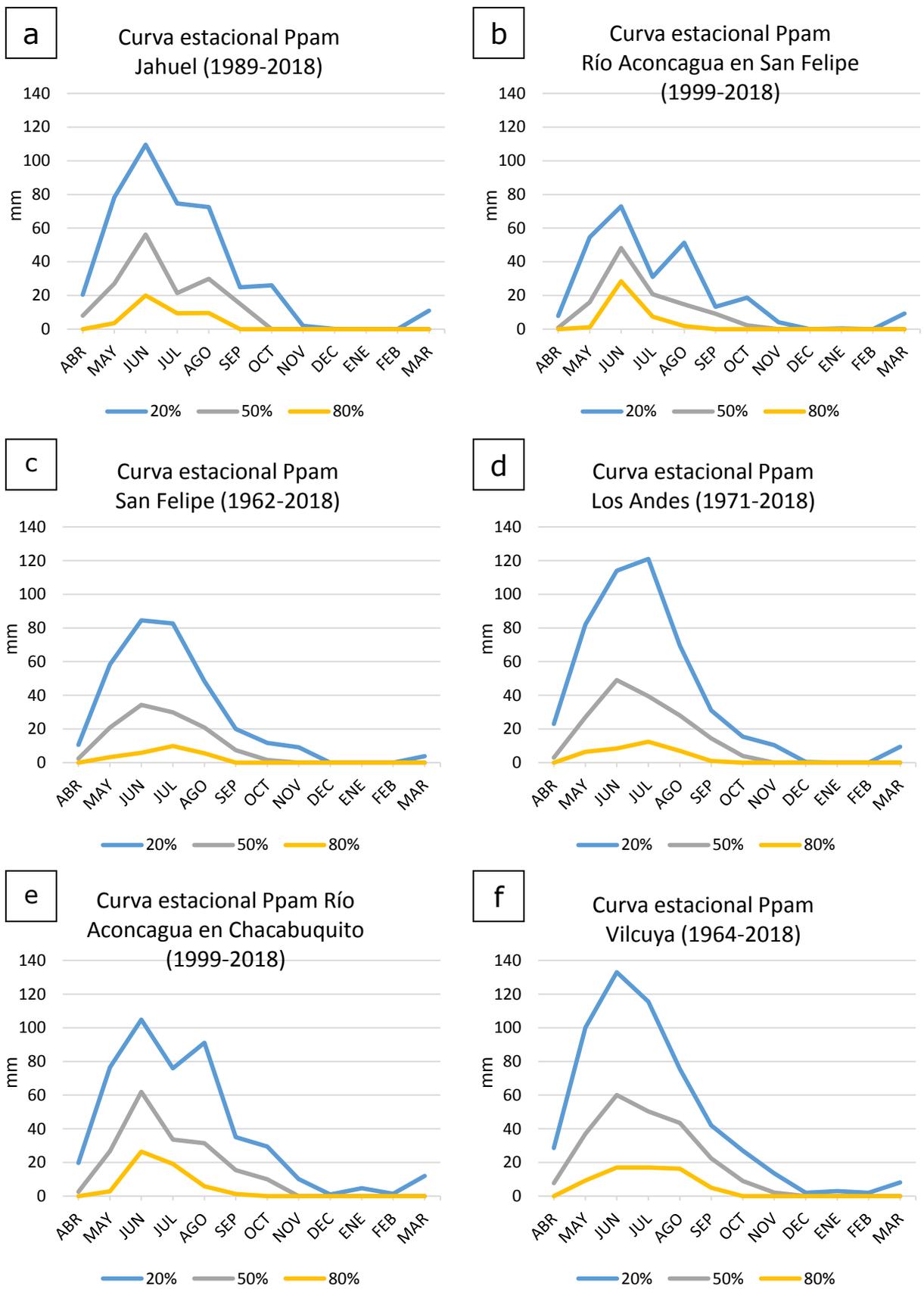


Figura 8. Curvas de variación estacional de las precipitaciones acumuladas mensuales (Ppam) en las estaciones meteorológicas de la zona de estudio.

La Figura 9 muestra las curvas de variación estacional de los caudales medios mensuales registrados en las tres estaciones fluviométricas de la zona. En estos gráficos, cada curva (5%, 20%, 50%, 80% o 95%) representa una cierta PE, la cual corresponde a la probabilidad de que se igualen o superen los caudales del eje vertical. De acuerdo a los gráficos A y B, el río Aconcagua presenta un régimen nival, donde las mayores crecidas se registran entre los meses de noviembre y enero producto del deshielo primaveral. Por otro lado, los menores caudales medios mensuales se registran en el trimestre marzo-mayo, que corresponde al período de estiaje. En el caso del estero Pocuro, el gráfico C indica un régimen mixto de tipo pluvio-nival, esto es, se producen crecidas producto de las precipitaciones (durante el período invernal) y también debido al deshielo primaveral.

De acuerdo a los registros de las estaciones, los caudales medios mensuales del río Aconcagua varían aproximadamente entre 6.100-76.600 l/s (1936-2018), con un caudal anual promedio aproximado de 25.700 l/s. El estero Pocuro, por su parte, presenta caudales medios mensuales que varían aproximadamente entre 300-1.500 l/s (1930-2018), con un caudal anual promedio aproximado de 900 l/s. El Anexo D muestra un resumen de las estadísticas de dispersión de los caudales medios mensuales medidos en la zona de estudio.

2.5.3 Clasificación climática de Köppen-Geiger

De acuerdo a Sarricolea *et al.* (2017), la zona de estudio presenta dos climas asociados a las dos geomorfologías predominantes. A continuación, se describen las principales características de ambos tipos de clima.

En las zonas bajas del valle, el clima se define como BSk(s) en la clasificación de Köppen-Geiger, es decir, corresponde a un clima semiárido frío con verano seco: "BS" indica un clima seco semiárido; "k" indica una temperatura media anual inferior a 18 °C; "(s)" indica que la precipitación de invierno (en centímetros) es menor o igual a dos veces la temperatura media anual en grados Celsius (Rioseco & Tesser, 2005).

En las zonas altas (sector cordillerano), el clima se define como Csb(h) en la clasificación de Köppen-Geiger, es decir, corresponde a un clima mediterráneo (verano cálido) con influencia de montaña: "C" indica un clima templado; "s" indica que la precipitación del mes más seco (en verano) es inferior a un tercio de la precipitación del mes más lluvioso (en invierno); "b" indica que la temperatura media mensual del mes más cálido es menor a 22 °C y al menos cuatro meses tienen temperaturas medias mensuales sobre 10 °C; "(h)" indica que la temperatura media anual supera los 18 °C (Rioseco & Tesser, 2005).

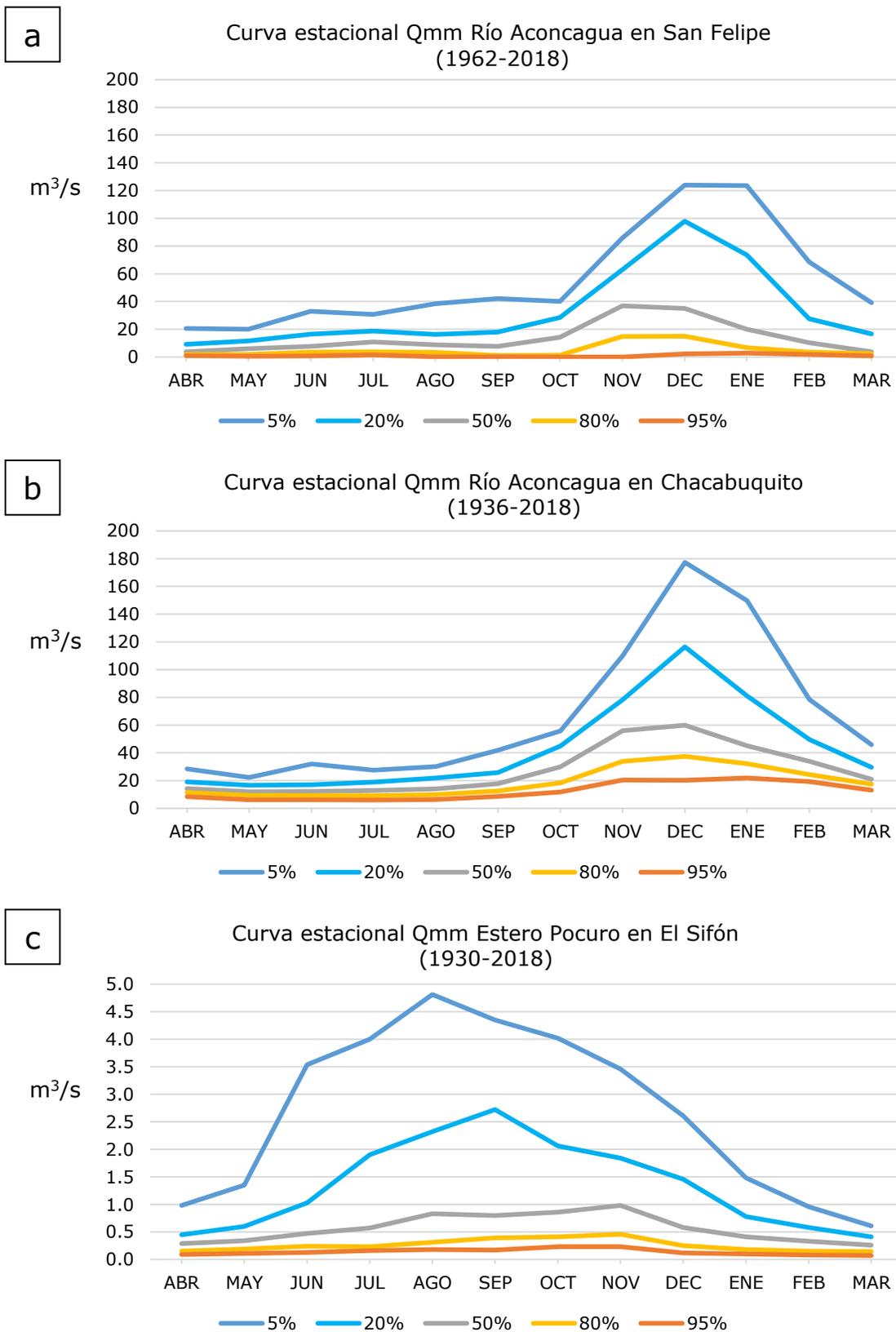


Figura 9. Curvas de variación estacional de los caudales medios mensuales (Qmm) en las estaciones fluviométricas de la zona de estudio.

3 Metodología

La metodología del presente Trabajo de Título se divide en tres etapas principales, las cuales se introducen a continuación.

1. Revisión de antecedentes.

Esta primera etapa consistió en la revisión de la literatura disponible en el sector de Los Andes-San Felipe y la recopilación de información pertinente para comprender la hidrogeología general del valle del río Aconcagua. Para ello se elaboró un catastro de captaciones, recolectando los datos de los pozos de captación y observación disponibles en la zona. También se efectuó una recopilación de información geológica (formaciones, estructuras, alteraciones), hidrogeológica (unidades, piezometría, propiedades hidráulicas), geofísica (perfiles TEM y gravimétricos interpretados) e hidrogeoquímica. En paralelo a esto se realizó una revisión de los datos hidroquímicos e hidrometeorológicos registrados en las estaciones de la red hidrométrica de la DGA (en adelante, "estaciones DGA") operativas en la zona de estudio.

2. Campaña hidrogeoquímica.

Esta segunda etapa consistió en el desarrollo de una campaña de muestreo hidrogeoquímico de las aguas subterráneas en el sector de Los Andes-San Felipe. Esto con el fin de contar con datos hidrogeoquímicos actuales de la zona. Esta campaña consideró una etapa de trabajo preterreno (selección de puntos a muestrear y gestión de equipos y materiales para el muestreo), trabajo en terreno (reconocimiento y muestreo de pozos) y trabajo posterreno (análisis de las muestras efectuado por CSIRO).

3. Análisis e interpretación de resultados.

En esta tercera etapa se presentan los datos recopilados en las áreas de hidrogeología e hidrogeoquímica, integrando los antecedentes recolectados y analizando los contrastes con estudios previos. Los resultados incluyen una propuesta de cinco perfiles hidrogeológicos en sitios de potencial interés para el estudio de acuíferos emplazados a profundidad cercana al basamento, en roca fracturada y en sedimento. También se caracterizan químicamente las aguas de la zona, se establecen los principales procesos que controlan la composición de estas y se evalúa la hipótesis de trabajo propuesta.

A continuación se describen en más detalle las metodologías empleadas en el presente Trabajo de Título.

3.1 Revisión de antecedentes

3.1.1 Catastro de captaciones

Con el fin de elaborar una base de datos con la información hidrogeológica de los pozos existentes en el sector de Los Andes-San Felipe se consultaron tres fuentes principales:

- El registro público de derechos de aprovechamientos de aguas subterráneas de la DGA, Ministerio de Obras Públicas (MOP). En adelante, "catastro de derechos de agua de la DGA" o "catastro DGA".
- El catastro de pozos CORFO del estudio de la DOH (2006).
- Los pozos del estudio de la DOH (2009) que alcanzan el basamento.

Para la primera fuente, se descargó el registro público de derechos de aprovechamiento de agua concedidos y solicitados en la Región de Valparaíso, disponible en el sitio web de la DGA (dga.mop.gob.cl), en el menú Consulta sobre Derechos de Agua > Derechos de Aguas registrados en la DGA > Listado de derechos concedidos por región > V Región de Valparaíso. Cabe mencionar que este catastro fue descargado el día 8 de octubre de 2018, por lo que no considera aquellos derechos que fueron publicados y/o formalizados en fechas posteriores.

Tras descargar el catastro de derechos de agua de la DGA, este fue filtrado para excluir todas las captaciones localizadas fuera de la depresión de Los Andes-San Felipe. En términos hidrográficos, se trabajó exclusivamente con los pozos localizados en las porciones medias-bajas de las Subsubcuencas "Estero Quilpué", "Río Aconcagua entre río Colorado y río Putaendo" y "Estero Pocuro", las cuales forman parte de la Subcuenca "Aconcagua Medio", la que a su vez forma parte de la Cuenca del Río Aconcagua (Benítez, 1978).

Una vez filtrado el catastro de derechos de agua de la DGA, se procedió a identificar y extraer la información de interés de cada pozo del listado resultante. Para ello se consultó la página web de la DGA (dga.mop.gob.cl), la cual ofrece acceso a todos los expedientes de derechos de aprovechamiento de aguas tramitados en la DGA. Los documentos están en formato PDF y contienen toda la documentación legal asociada al trámite de formalización del derecho de aprovechamiento de aguas de cada pozo, además de ciertos datos pertinentes para el presente estudio. En total se pudieron conseguir los registros estratigráficos y las características de habilitación (rango de profundidad del cribado) de 79 pozos (uno de ellos en trámite) y algunos datos adicionales (nivel estático y/o permeabilidad) de otros 27 pozos sin registro estratigráfico. En concreto, la base de datos se constituyó con los siguientes campos:

- Datos administrativos:
 - Código del expediente del derecho de aprovechamiento de aguas.
 - Ubicación (coordenadas) y nombre de la captación (en los casos donde el expediente presenta información de más de un pozo).
 - Nombre o identificación del solicitante.
- Características de la captación:
 - Profundidad total de perforación.
 - Registro estratigráfico (indicando si se perforó la roca).
 - Perfil de habilitación (indicando la profundidad mínima y máxima del cribado).
 - Caudal otorgado.
- Estudios y mediciones:
 - Pruebas de bombeo con gasto variable y constante (capturas).
 - Niveles estáticos (con fecha de medición).
 - Transmisividad y coeficiente de almacenamiento (indicando el método de cálculo o la fuente del dato).
 - Análisis fisicoquímicos y/o granulométricos (capturas).

Para la segunda fuente, correspondiente al catastro de pozos CORFO del estudio de la DOH (2006), se consiguieron los registros estratigráficos y las características de habilitación (rango de profundidad del cribado) de 36 pozos. Cabe mencionar que esta información fue empleada por dicho estudio en la interpretación de su campaña geofísica, obteniéndose los perfiles hidrogeológicos que son usados como línea de base en la presente memoria. La ubicación de estos perfiles se muestra en la Figura 11.

Para la tercera fuente, correspondiente a los pozos del estudio de la DOH (2009) que alcanzan a perforar el basamento, se pudieron conseguir los registros estratigráficos de 4 pozos, donde solo uno de ellos contaba con las características de habilitación indicando el rango de profundidad del cribado.

3.1.2 Hidrogeología

3.1.2.1 Definición unidades hidrogeológicas

Para comprender la hidrogeología general del valle, así como estandarizar su representación en pozos y perfiles, se efectuó una revisión de la literatura disponible identificando las principales unidades hidrogeológicas definidas en el sector de Los Andes-San Felipe. Con este fin se abordaron los estudios de la Comisión Nacional de Riego (CNR, 1979), DOH (1998), DOH (2006) y DOH (2009), los cuales trabajan con una definición similar de unidades hidrogeológicas en el valle del río Aconcagua.

En la Tabla 1 se describen las unidades hidrogeológicas principales empleadas en la literatura para representar los acuíferos existentes en el valle del río Aconcagua, particularmente, en el sector de Los Andes-San Felipe (unidades hidrogeológicas A, B, C y D). También se definieron otras nueve unidades para categorizar de forma más precisa la información estratigráfica recolectada en las captaciones de la zona, a saber: las unidades S y RA, que indican la presencia de suelo (S) o relleno artificial (RA) en los primeros metros de perforación; la unidad Qac, correspondiente a depósitos aluviales-coluviales sin relación con las demás unidades; las unidades hidrogeológicas L1 y L2, que corresponden a niveles de granulometría gruesa intercalados entre los estratos de la unidad hidrogeológica D; y las unidades hidrogeológicas E1, E2, E3 y E4, que indican la presencia de roca en cuatro condiciones diferentes en los tramos finales de los pozos que alcanzan el basamento. En la Tabla 1 las unidades fueron descritas de techo a base en el siguiente orden: S/RA, Qac, A, B, C, D, L1/L2 y E1/E2/E3/E4.

Los criterios utilizados para diferenciar los cuatro tipos de roca definidos fueron: (1) el estado de la roca (fracturada o fresca); (2) el contenido de arcillas (cuando la roca presenta meteorización o fracturas); y (3) la presencia de cribado instalado a la profundidad de la roca. El tercer punto se utilizó como un indicador de la permeabilidad de la roca, asociando la presencia de cribado a una permeabilidad moderada o alta. Esto fue especialmente útil en aquellos casos donde el registro estratigráfico del pozo no especificaba el estado o condición de la roca.

La simbología de colores empleada en la Tabla 1 obedece la propuesta de Struckmeier & Margat (1995). En ese estudio se sugiere representar las formaciones con colores en función de sus características hidrogeológicas y la presencia de aguas subterráneas. De este modo, se facilita la lectura de los mapas o perfiles con información hidrogeológica. En la Figura 10, la propuesta de colores planteada por Struckmeier & Margat (1995) es representada como un triángulo invertido, donde el potencial de los acuíferos disminuye hacia el vértice inferior del triángulo (Nkhoma & Bäumle, 2007).

Tabla 1. Unidades hidrogeológicas definidas en la zona de estudio.

Unidad*	Descripción
S/RA	Suelo (tierra vegetal, materia orgánica y/o material carbonoso) o relleno artificial (antepozo, tapa de cemento y/o escombros).
Qac	Sedimentos de granulometría fina compuestos por limos arenosos a arcillosos.
A	Sedimentos de granulometría heterogénea compuestos por arenas medias a gravas finas (< 30%) y una abundante matriz de arcillas, limos y arenas finas (> 50%).
B	Sedimentos de granulometría gruesa a media compuestos por ripios gravillentos y una matriz arenosa que presenta escasos limos arcillosos.
C	Sedimentos de granulometría muy heterogénea compuestos por gravas medias a arenas finas y una matriz limosa moderadamente arcillosa.
D	Sedimentos de granulometría fina compuestos por arenas limosas con abundante matriz de arcilla (> 50%).
L1/L2	Sedimentos de granulometría gruesa a media compuestos por ripios gravillentos a arenas medias y una matriz arenosa fina con escaso contenido arcilloso.
E1	Basamento rocoso: roca fracturada.
E2	Basamento rocoso: roca meteorizada con un bajo contenido de arcillas y/o permeabilidad moderada a alta.
E3	Basamento rocoso: roca meteorizada con un alto contenido de arcillas y/o muy baja permeabilidad.
E4	Basamento rocoso: roca fresca.

* Los colores de las unidades fueron asignados en función del sistema de clasificación de acuíferos propuesto por Struckmeier & Margat (1995).

En la Figura 10, los colores azul y celeste representan materiales no consolidados, donde el flujo de agua subterránea es de tipo intergranular, mientras que los colores verdosos representan acuíferos compuestos por roca fracturada o kársticos. En ambos casos, los tonos oscuros representan recursos de gran extensión y productividad, mientras que los tonos claros representan (a) recursos de carácter local o discontinuo y de productividad moderada o (b) recursos de gran extensión y baja productividad. En el caso de las formaciones que albergan un recurso hídrico muy limitado o de carácter muy local se utiliza un color café claro. Finalmente, para las formaciones que carecen por completo de aguas subterráneas (acuífugos) se emplea el color café oscuro (Struckmeier & Margat, 1995).

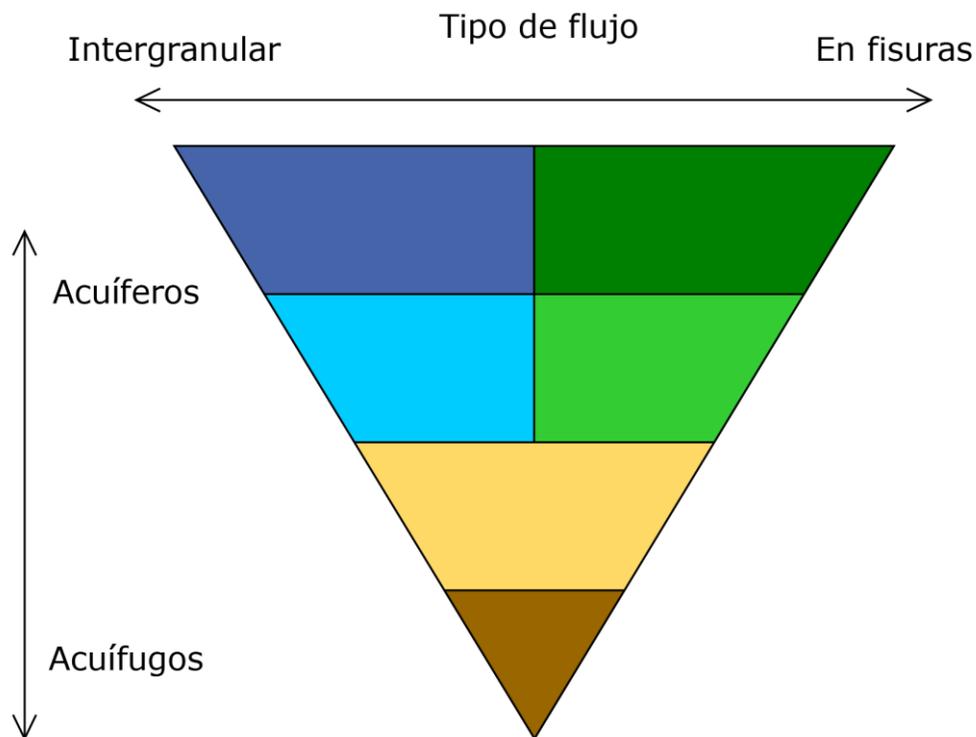
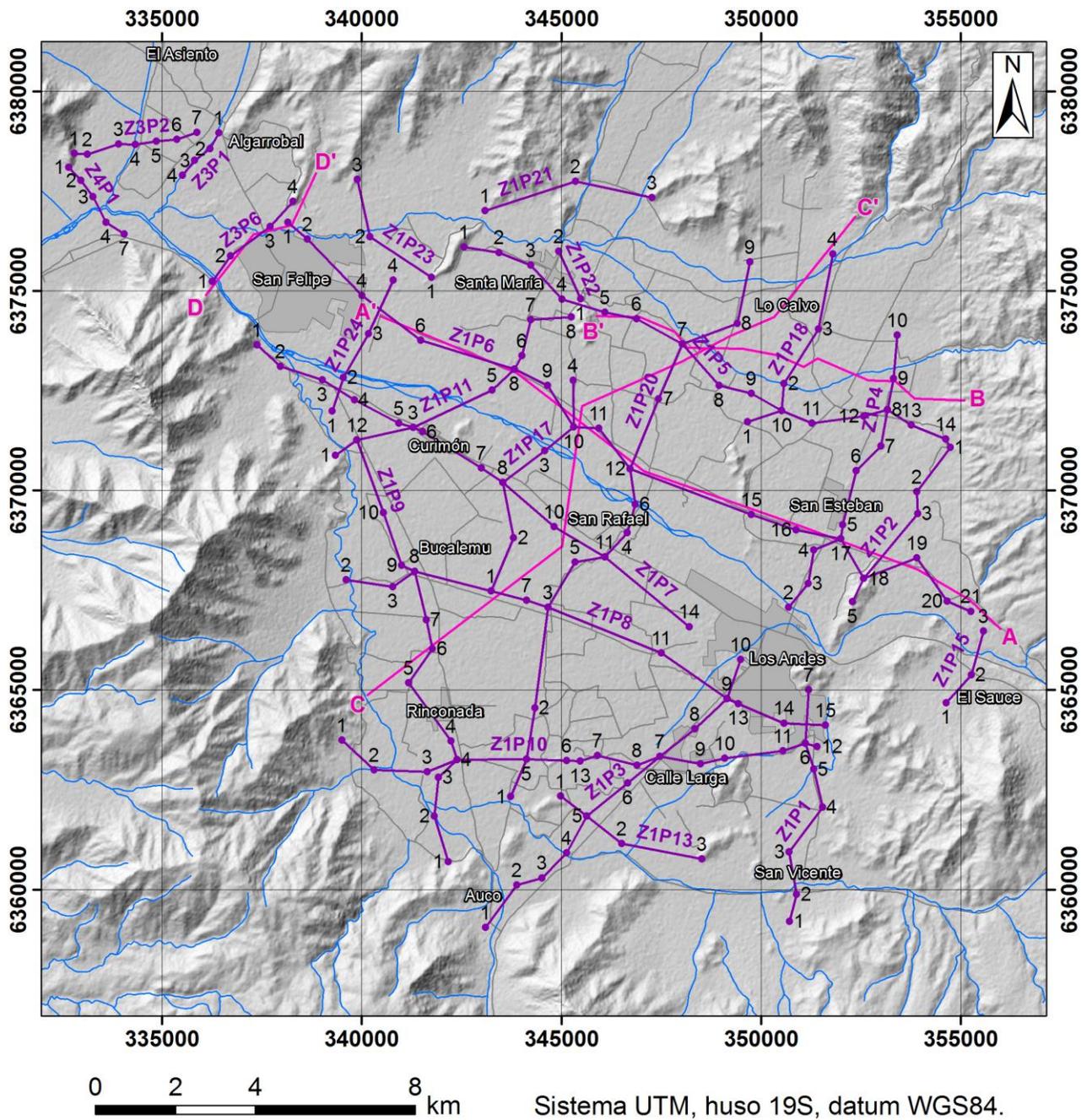


Figura 10. Esquema de colores estandarizado para representar las características hidrogeológicas y la presencia de aguas subterráneas en las formaciones geológicas. Figura editada de Struckmeier & Margat (1995).

3.1.2.2 Distribución unidades hidrogeológicas

Para estudiar la distribución y profundidad de las distintas unidades hidrogeológicas definidas en el sector de Los Andes-San Felipe (Tabla 1), se realizó una revisión de la información geofísica interpretada en estudios anteriores de la zona. Para esta tarea se utilizó como principal referencia el estudio de la DOH (2006), en el cual se realizó una campaña geofísica consistente en el levantamiento de perfiles gravimétricos y de transiente electromagnético (TEM) a lo largo del valle del río Aconcagua.

De forma complementaria, se analizaron los perfiles geológicos propuestos por la DOH (2009) (Anexo E), en el cual se utilizó el trabajo de la DOH (2006) como antecedente (en particular, la información de los puntos TEM). Todo esto con el fin de contrastar las tendencias estratigráficas observadas en los perfiles de la DOH (2009) con la distribución espacial de unidades hidrogeológicas propuesta por la DOH (2006). La Figura 11 muestra la ubicación de los perfiles propuestos en ambos estudios y la localización de las estaciones TEM en el estudio de la DOH (2006). A continuación se describe a grandes rasgos la campaña geofísica efectuada por la DOH (2006).



Leyenda

- Red hidrográfica
- Red vial
- Áreas urbanas
- Estación TEM Ingedos-DOH (2006)
- Perfil Ingedos-DOH (2006)
- Perfil Dictuc-DOH (2009)

Figura 11. Mapa de ubicación de los perfiles propuestos en los estudios de la DOH (2006) y DOH (2009).

En la campaña de la DOH (2006), en primer lugar, se empleó el método gravimétrico para poder determinar la profundidad del basamento de la zona. Los perfiles de la campaña fueron trazados entre puntos donde aflora la roca fundamental. Además, para complementar los resultados obtenidos, se utilizó la profundidad de la roca registrada en los pozos. Cabe mencionar que, si bien el método gravimétrico permite estimar el espesor total de la secuencia sedimentaria que sobreyace al basamento, no proporciona información adicional acerca de la misma. En segundo lugar, se empleó el método TEM para volver a determinar la profundidad del basamento de la zona e interpretar las unidades geoelectricas existentes, las que fueron correlacionadas con las unidades hidrogeológicas definidas en el valle. De la misma manera que para los perfiles gravimétricos, en la mayoría de los perfiles TEM los extremos se fijaron en puntos donde aflora la roca.

Posteriormente, sobre la base de los perfiles TEM, se elaboraron perfiles hidrogeológicos interpretados en función de la geofísica y los registros estratigráficos de los pozos. La información de los perfiles interpretados por la DOH (2006) fue extraída a partir de las figuras de dicho estudio empleando el programa Engauge Digitizer. En cada perfil se extrajeron los siguientes datos de las estaciones TEM y de los puntos intermedios localizados cada 500 m (incluidos para aumentar la densidad de información): la ubicación en el mapa (coordenadas este y norte expresadas en el sistema UTM, huso 19S, datum PSAD56), la cota de la topografía (m s. n. m.), la cota de los contactos entre unidades hidrogeológicas (m s. n. m.), la cota del basamento (m s. n. m.) y la distancia horizontal desde el extremo izquierdo del perfil.

Las coordenadas de las estaciones TEM, expresadas originalmente en el datum PSAD56, fueron re proyectadas al datum WGS84 con el software ArcMap (versión 10.4.1). Para ello se aplicó la transformación geográfica "PSAD_1956_To_WGS_1984_16", la cual se utiliza en el área continental chilena comprendida entre las latitudes 26°S y 36°S (Esri, 2021). Las coordenadas de los puntos intermedios (intercalados cada 500 m) se calcularon trigonométricamente a partir de las coordenadas de las estaciones TEM adyacentes y la distancia horizontal en el perfil, esto aprovechando que cada par consecutivo de estaciones define una línea recta. En concreto, se aplicaron las siguientes fórmulas (ver ejemplo en la Tabla 2):

$$E = E1 + (D - D1) \frac{E2 - E1}{D2 - D1}$$

$$N = N1 + (D - D1) \frac{N2 - N1}{D2 - D1}$$

Tabla 2. Coordenadas de las estaciones TEM y puntos intermedios del perfil "Z1P13" de la DOH (2006).

Estación TEM	Distancia horizontal en el perfil [m]	Sistema UTM, 19S, PSAD56	
		Este [m]	Norte [m]
1	0	345186	6362666
	500	345584	6362363
5	826	345843	6362166
	1000	345980	6362058
	1500	346373	6361747
2	D1 = 1942	E1 = 346720	N1 = 6361473
	2000	346777	6361462
	2500	347268	6361368
	D = 3000	E = 347759	N = 6361275
3	3500	348251	6361181
	D2 = 3986	E2 = 348728	N2 = 6361090

La información recopilada en esta etapa permitió esbozar una vista preliminar de la distribución espacial de las unidades hidrogeológicas definidas en la zona. En particular, los datos geofísicos extraídos del estudio de la DOH (2006) permitieron estudiar la variación del espesor sedimentario en distintos sectores de la zona de estudio. Por otro lado, la información contenida en los perfiles propuestos por la DOH (2006) fue utilizada en etapas posteriores del presente trabajo como línea de base para la propuesta de perfiles hidrogeológicos, sirviendo como complemento para los registros estratigráficos recolectados.

3.1.2.3 Piezometría

Con el objetivo de estudiar la superficie freática y/o piezométrica de las aguas subterráneas de la zona de estudio se consultaron tres fuentes de datos: (1) el catastro de derechos de agua de la DGA, (2) el catastro de pozos CORFO en el estudio de la DOH (2006) y (3) los pozos de observación la red hidrométrica de la DGA. Los datos recolectados fueron empleados en la elaboración de mapas de isopiezas, los que fueron contrastados con mapas de trabajos anteriores en la zona, especialmente, con el mapa de la DOH (2009).

En la primera fuente, para cada pozo se extrajo el nivel estático de la prueba de bombeo registrada en el expediente de derecho de agua del pozo. En total se consiguieron los niveles de 105 pozos, donde 29 de ellos contaban con dos mediciones. Cabe mencionar que 5 de los 134 niveles registrados no contaban con fecha de medición. En la segunda fuente, se ocupó el nivel estático indicado en el esquema de habilitación y estratigrafía de cada captación, consiguiendo así los niveles de 36 pozos, pero solo 3 de ellos con la

fecha de medición. En ambas fuentes, para cada medición se descontó la altura de la tapa del pozo con respecto al nivel del terreno (siempre que existiera este dato). En la tercera fuente, se extrajeron las series de datos mensuales completas de los pozos de observación de la red hidrométrica de la DGA a través del sitio web snia.dga.cl/BNAConsultas/. En total se consiguieron 2.073 mediciones efectuadas en 12 pozos de observación. Estos pozos tienen la ventaja de presentar mediciones periódicas de los niveles estáticos en la zona de estudio. Sin embargo, en el sitio web consultado no se indicaba la profundidad ni las características de habilitación de los pozos.

3.1.2.4 Propiedades hidráulicas

En paralelo a la recolección de datos piezométricos, se realizó una búsqueda de información relativa a las propiedades hidráulicas de los acuíferos en la zona de estudio. Por un lado, la búsqueda se enfocó en las propiedades generales atribuidas a las distintas unidades hidrogeológicas definidas. Lo anterior con el fin de caracterizar las distintas unidades del valle, así como examinar las diferencias existentes entre ellas. Por otro lado, durante la elaboración del catastro de captaciones, se recolectaron los datos puntuales de decenas de pozos del catastro de derechos de agua de la DGA cuyas propiedades hidráulicas (disponibles en los expedientes de derechos) fueron calculadas a partir de los registros de las pruebas de bombeo o estimadas como valores referenciales del estudio de la DOH (1998).

3.1.3 Hidrogeoquímica

3.1.3.1 Recopilación de datos

Con el fin de elaborar una base de datos hidrogeoquímica representativa de los acuíferos de la zona de estudio se realizó una búsqueda y recopilación de los datos disponibles en el sector. La información recopilada fue consultada a partir de cuatro fuentes principales:

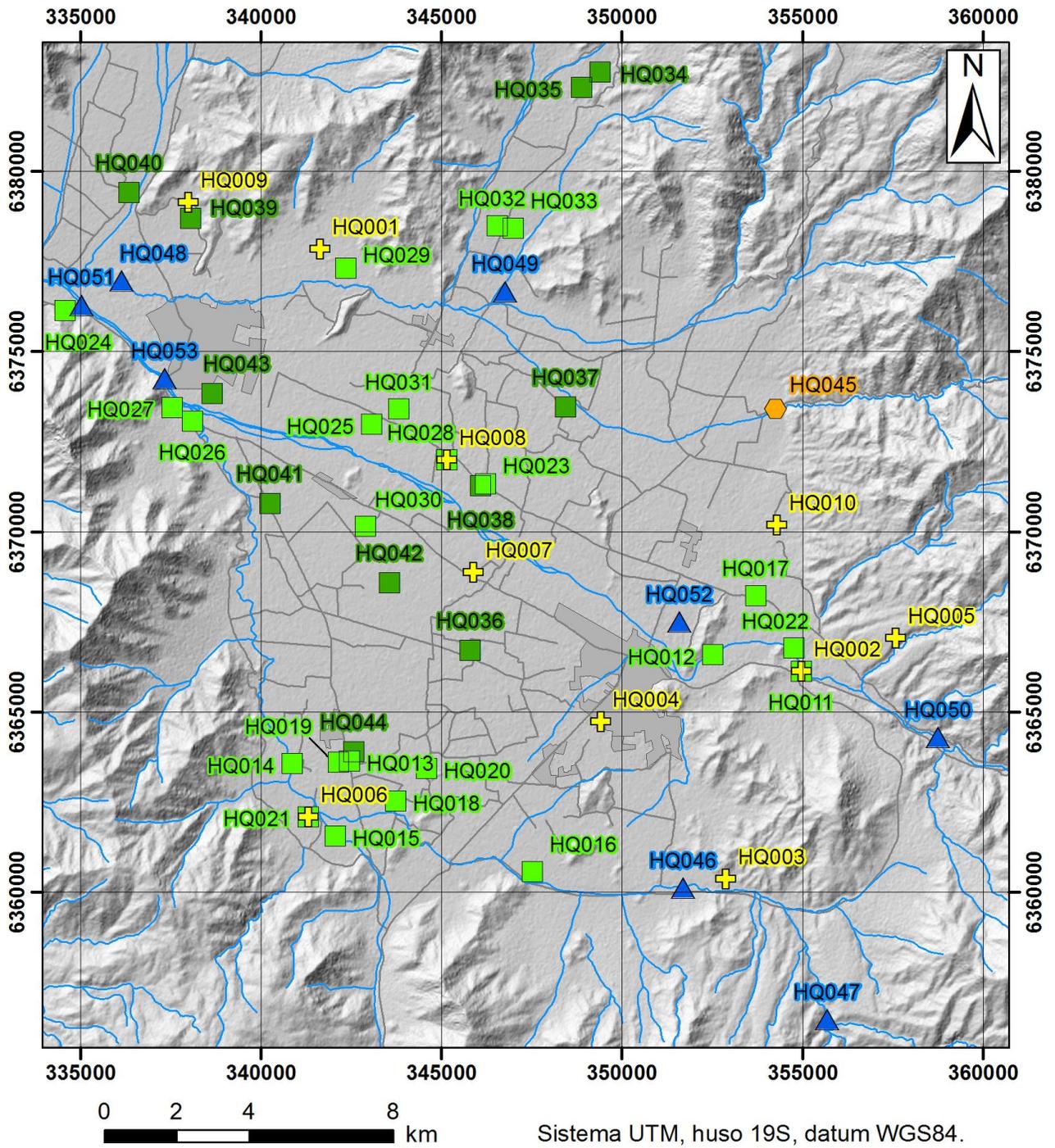
1. El catastro de derechos de agua de la DGA.
2. El estudio de CORFO (1969) denominado "Hidrogeología del Valle del Aconcagua. Informe preliminar".
3. Las estaciones de monitoreo de la calidad química de las aguas pertenecientes a la red hidrométrica de la DGA, MOP (en adelante, "estaciones DGA").
4. Los sistemas de Agua Potable Rural (APR), administrados por la DOH.

La Figura 12 muestra la ubicación de los 53 puntos con hidrogeoquímica disponible, donde 3 pares de muestras comparten pozo: n°2 con n°11, n°6 con n°21 y n°8 con n°28. En el mapa se incluyeron también las muestras de la campaña hidrogeoquímica. La identificación, coordenadas y características de cada punto muestreado se detallan en el Anexo F-1 y el Anexo F-2. Los valores medidos se muestran en el Anexo F-3. Este último incluye los principales parámetros fisicoquímicos y los constituyentes químicos que poseen mínimo 30 mediciones: Mg, Ca, Na, K, HCO₃, CO₃, Cl, F, SO₄ y NO₃.

La primera y principal fuente de datos empleada para poblar la base de datos hidrogeoquímica fue el catastro de derechos de agua de la DGA. Este catastro se obtuvo en línea a través del sitio web de la DGA (*dga.mop.gob.cl*) en el menú Consulta sobre Derechos de Agua > Derechos de Aguas registrados en la DGA > Listado de derechos concedidos por región > V Región de Valparaíso. La data hidrogeoquímica de los pozos se obtuvo de los expedientes de derechos de aguas disponibles en el mismo sitio web. En total se lograron recolectar los datos de 23 pozos del catastro cuyos análisis fisicoquímicos fueron realizados entre los años 1989 y 2009.

La segunda fuente de datos fue el estudio de CORFO denominado "Hidrogeología del Valle del Aconcagua. Informe preliminar", el cual fue publicado en el año 1969. En este estudio se elaboró una base de datos hidrogeoquímica para el valle del río Aconcagua, la cual incluyó 11 pozos en el sector de Los Andes-San Felipe cuyos análisis fueron realizados entre los años 1963 y 1969. Estas 11 muestras fueron incluidas en la base de datos del presente estudio para contrastarlas con la hidrogeoquímica más reciente.

Como tercera fuente se emplearon las estaciones DGA, las cuales recolectan muestras de ríos y esteros (en adelante, "muestras de agua superficial" o "aguas superficiales"), obteniendo información química de las aguas de los principales cauces de la zona de estudio. Las muestras de agua superficial fueron incluidas en la base de datos para contar con información hidroquímica de la zona, permitiendo comparar la hidroquímica de los distintos sectores del valle, así como contrastar con la química de las aguas subterráneas. Cabe destacar que todas las estaciones DGA han realizado mediciones de forma periódica, pero han presentado algunos lapsos de tiempo en que han estado inoperativas.



Leyenda

- | | |
|------------------|-----------------------------|
| Red hidrográfica | Fuente de los datos: |
| Red vial | Terreno CSIRO |
| Áreas urbanas | Catastro DGA |
| | CORFO (1969) |
| | Estación APR |
| | Estaciones DGA |

Figura 12. Mapa de ubicación de los pozos y estaciones con hidrogeoquímica disponible en Los Andes-San Felipe

Los registros de las estaciones DGA se encuentran disponibles en un portal web desarrollado por la DGA en el marco del proyecto “Sistema Nacional de Información del Agua” (SNIA). La descarga de estos registros se efectuó en la página web *snia.dga.cl/BNAConsultas/*, donde se encontró un total de 8 estaciones con reportes de la calidad química de las aguas en el sector de Los Andes-San Felipe, los cuales fueron efectuados entre los años 1968 y 2018. Cabe destacar que en todas las estaciones DGA se dejó de medir el bicarbonato (HCO_3) en el año 2006. Por lo anterior, las mediciones realizadas después de ese año no fueron consideradas en la base de datos hidrogeoquímica. Finalmente, se optó por trabajar con las mediciones más recientes de cada estación que incluyeran todos los constituyentes mayoritarios. De esta manera, se obtuvieron 8 series de datos cuyos análisis fueron efectuados entre los años 1981 y 2006.

Como cuarta y última fuente de consulta se emplearon los sistemas de Agua Potable Rural (APR), los cuales son construcciones de carácter privado administrados por la DOH. Pese a que el acceso a la información de estos pozos se encuentra muy restringido, en el sitio web *snia.dga.cl/BNAConsultas/* es posible obtener la identificación y ubicación de estas captaciones. Sin embargo, los análisis fisicoquímicos no se encuentran disponibles en esta página web. Por lo anterior, estos datos fueron solicitados directamente a la DOH mediante correo electrónico.

Finalmente, en la zona de estudio se encontró registro de solo dos APR operativas: APR El Higueral y APR El Pimiento. De estas dos estaciones solo se consiguieron los análisis fisicoquímicos de la primera, en donde faltan las medidas de varios de los constituyentes mayoritarios. Pese a lo anterior, y dado que la estación se encuentra en un sector que carece de datos hidrogeoquímicos (Figura 12), se optó por utilizar de igual manera sus mediciones como complemento para la base de datos hidrogeoquímica.

3.1.3.2 Estimación del total de sólidos disueltos

Tras la recopilación de datos hidrogeoquímicos, se aplicó una regresión lineal entre la conductividad eléctrica (CE) y el total de sólidos disueltos (TSD) para estimar el TSD en las muestras sin medición de este parámetro. Esta regresión es factible dado que entre ambos parámetros existe una relación de proporcionalidad directa dada por la ecuación $\text{TSD} = f \cdot \text{CE}$ (e. g. Singh & Kalra, 1975; Rodier, 1990; Hubert & Wolkersdorfer, 2015). En esta ecuación, la constante de proporcionalidad f suele utilizarse como un factor de conversión para estimar el TSD a partir de la correcta medición de la CE. Cabe mencionar que el valor de f es variable y depende del tipo de agua, el lugar de muestreo, la estación del año, entre otros factores (Van Niekerk *et al.*, 2014). Por lo anterior, el ajuste lineal fue utilizado solo como una estimación.

Finalmente, para la regresión se emplearon los datos de 21 pozos pertenecientes al catastro de derechos de agua de la DGA (muestras n°11 a n°31) (Anexo F-3), siendo estos los únicos que contaban con las mediciones de TSD y la CE. Tras aplicar la regresión, se obtuvo un factor de conversión $f = 0,74$ y un coeficiente de determinación $r^2 = 0,87$. Este último valor confirma que existe un alto grado de asociación lineal entre los parámetros TSD y CE. Concretamente, cerca del 87% de la variabilidad del parámetro TSD queda explicada por el modelo obtenido ($TSD = 0,74 CE$).

3.1.3.3 Validación de datos

Para evaluar la validez de los datos hidrogeoquímicos recopilados se empleó el método del balance iónico. Este método se basa en el cálculo de la diferencia entre la suma de los cationes y la suma de los aniones, ambos grupos medidos en miliequivalentes por litro (meq/l). Para realizar este cálculo se suelen utilizar los constituyentes mayoritarios del agua. En este caso, los cationes considerados fueron el Ca, Mg, Na y K, mientras que los aniones fueron el HCO_3 , CO_3 , Cl, SO_4 y NO_3 . Finalmente, el error asociado al balance iónico queda dado por la siguiente ecuación:

$$\text{Error [\%]} = 100 \cdot \frac{\sum \text{Cationes [meq/l]} - \sum \text{Aniones [meq/l]}}{\sum \text{Cationes [meq/l]} + \sum \text{Aniones [meq/l]}}$$

El rango de error admisible para poder aceptar o rechazar una muestra hidrogeoquímica depende de la CE (Custodio & Llamas, 1976) o de la suma de los aniones expresados en miliequivalentes por litro (Crites *et al.*, 2000, como se citó en Gómez, 2009). En el primer caso, a menor CE mayor es el error aceptable en el balance iónico. Esto se debe a que al disminuir la CE, existe una mayor dificultad en la medición debido a los límites de detección (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2015). En la Tabla 3 se muestra el error admisible en función de la CE y en la Tabla 4 se muestran los rangos de error admisibles en función de la suma de aniones.

Para el presente estudio se optó por establecer un error admisible máximo de 10% en el balance iónico. Lo anterior tanto para los datos hidrogeoquímicos recopilados como para los resultados de las mediciones de la campaña hidrogeoquímica realizada en el presente trabajo.

Tabla 3. Error admisible del balance iónico en función de la CE (Custodio & Llamas, 1976).

CE [$\mu S/cm$]	50	200	500	≥ 2000
Error aceptable [%]	± 30	± 10	± 8	± 4

Tabla 4. Error admisible del balance iónico en función de la suma de aniones (Crites *et al.*, 2000, como se citó en Gómez, 2009).

Suma aniones [meq/l]	0-3	3-10	10-800
Error aceptable [%]	±0,2	±2	±5

3.2 Campaña hidrogeoquímica

Posterior a la revisión y recopilación de antecedentes, el presente estudio contempló el desarrollo de una campaña de muestreo de las aguas subterráneas en el sector de Los Andes-San Felipe. Lo anterior con el fin de complementar la base de datos hidrogeoquímica elaborada en etapas anteriores, añadiendo así información actualizada de los acuíferos de la zona (parámetros fisicoquímicos y constituyentes mayoritarios y minoritarios). Esta campaña fue gestionada y realizada en colaboración con la Fundación CSIRO Chile Research a fines de 2018.

Durante la planificación inicial de la campaña, se planteó como objetivo lograr un muestreo selectivo de las unidades hidrogeológicas, esto es, seleccionar y muestrear grupos de pozos con cribado instalado a distinta profundidad. Lo anterior con el fin de evaluar si en la zona de estudio existe una diferenciación química de las aguas subterráneas en función de la profundidad, lo que permitiría discernir la existencia de algún tipo de aislamiento entre las aguas subterráneas presentes en sedimentos someros, sedimentos profundos (cerca del basamento) y en roca fracturada, tal como lo plantea la hipótesis de trabajo. A continuación se describen las cuatro tareas principales realizadas durante la campaña hidrogeoquímica.

3.2.1 Selección de puntos a muestrear

La selección de pozos para el muestreo de aguas subterráneas se llevó a cabo en tres etapas, las cuales se describen a continuación.

3.2.1.1 Definición de criterios

En esta primera etapa se definieron diferentes criterios para garantizar que la selección de pozos cumpliera con determinados requerimientos. Como primera medida, se definieron distintos grupos de captaciones en función de la profundidad del cribado apuntando a lograr un muestreo selectivo de las aguas subterráneas presentes a distinta profundidad. Durante la revisión de los expedientes del catastro de derechos de agua de la DGA, se observó que la mayoría de los pozos posee un sistema de captación muy amplio en términos de su extensión vertical (Anexo G).

Lo anterior se debe a que estas captaciones son pozos de producción que buscan maximizar su rendimiento. Consecuentemente, para clasificar de mejor manera estos pozos se utilizaron categorías superpuestas entre sí (Tabla 5). También se incluyó la categoría "CH0: Superficial" para representar las muestras de agua superficial (estaciones DGA).

Tabla 5. Clasificación de las captaciones según la profundidad del cribado.

Clasificación del sistema captante	Rango de profundidad del cribado
CH0: Superficial	Sin cribado. El agua se capta directamente de ríos/esteros en las estaciones DGA
CH1: Somero	0-60 m
CH2: Somero-Intermedio	0-100 m
CH3: Intermedio	55-100 m
CH4: Intermedio-Profundo	50-150 m
CH5: Profundo	> 80 m

Como segunda medida, se estableció una serie de criterios referidos a la disponibilidad de información, las características de las captaciones y sus clasificaciones (Tabla 5). Los criterios considerados fueron:

- Disponibilidad del registro estratigráfico.
- Disponibilidad del perfil de habilitación (esquema del sistema captante).
- Caudal de extracción alto. Durante la campaña, por limitaciones de tiempo, se optó por trabajar solo con los pozos de caudales concedidos sobre 20 l/s, esto es, cerca del 9% del total de pozos de la región (analizados para el proyecto de CSIRO) y 62% de los pozos de la zona de estudio. Los pozos de caudales inferiores a 20 l/s fueron revisados una vez finalizada la campaña.
- Distribución espacial homogénea (para pozos de igual clasificación).
- Cercanía con un pozo seleccionado de clasificación lejana.
- Cercanía con algún perfil geofísico propuesto por CSIRO (Figura 13).
- Presencia de niveles estratigráficos impermeables que impongan un aislamiento hidráulico entre los sedimentos poco profundos y aquellos emplazados a profundidades cercanas al basamento.

3.2.1.2 Selección preliminar

En esta segunda etapa se utilizó la información recolectada del catastro derechos de agua de la DGA y se aplicaron los criterios de selección definidos en la primera etapa para elaborar dos listas preliminares de pozos. Se apuntó a seleccionar un total de 22 pozos para el muestreo: 14 pozos prioritarios (lista 1) y 8 pozos opcionales (lista 2). La lista 2 se definió en caso de no obtener el permiso para muestrear algún pozo de la lista 1.

Los pozos a muestrear se escogieron de forma tal que presentaran una distribución espacial homogénea a lo largo de la zona de estudio, privilegiando aquellos pozos localizados cerca de los perfiles geofísicos propuestos por CSIRO. Cabe mencionar que, en conformidad con los requerimientos de CSIRO, la cantidad de pozos para el muestreo de aguas subterráneas fue fijada en 5 pozos de categoría CH1/CH2 y 15 pozos de categoría CH4/CH5 repartidos entre el valle del río Aconcagua (entre las ciudades de Los Andes y Quillota), el valle de Llay-Llay y el valle del río Putaendo. En particular, en el sector de Los Andes-San Felipe, se estableció un máximo de 2-3 muestras de categoría CH1/CH2 y 5-10 muestras de categoría CH4/CH5.

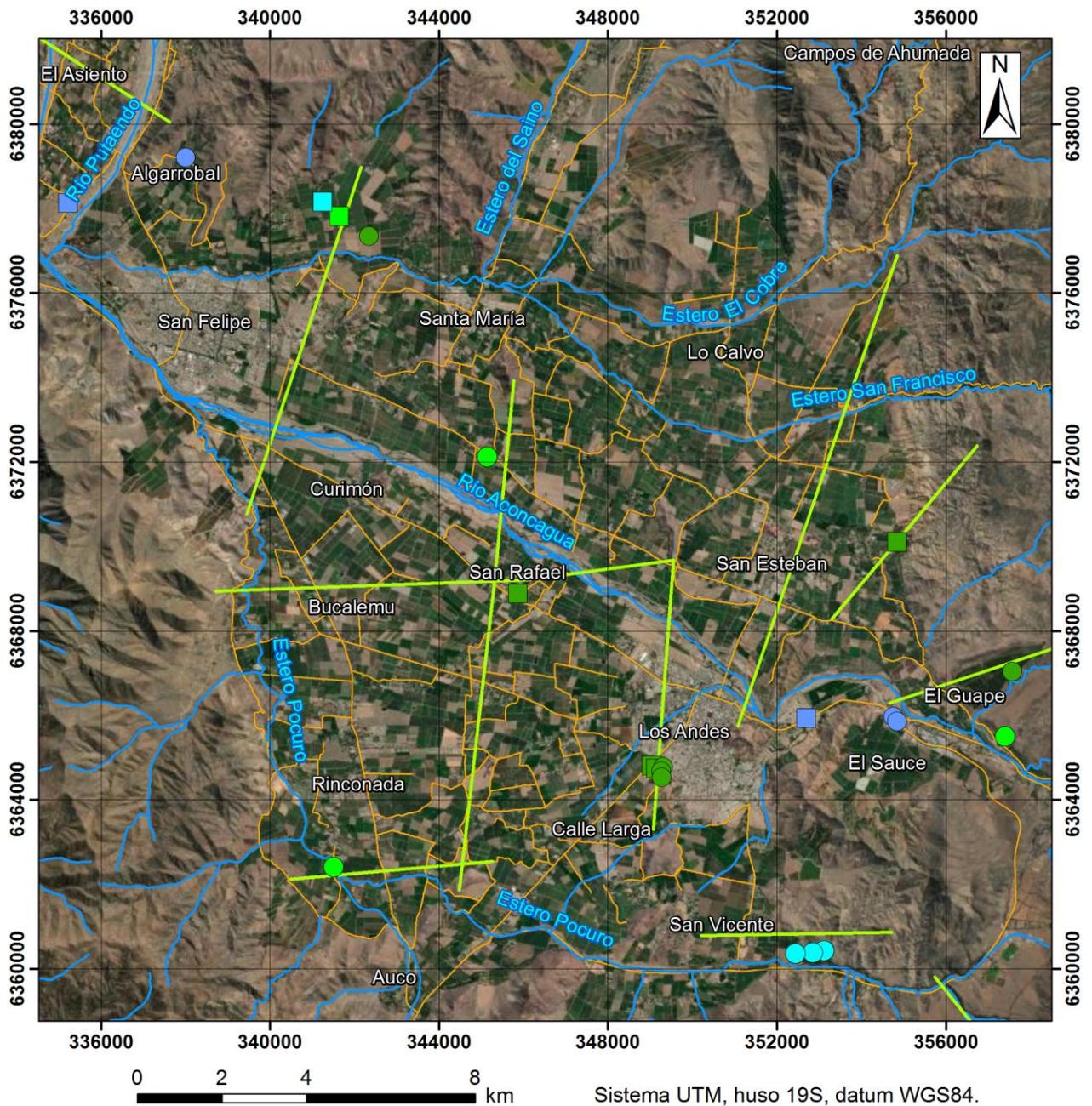
3.2.1.3 Refinamiento de la selección

En esta tercera etapa se empleó una matriz de criterios para clasificar todos los pozos de la zona en función de su conveniencia para el muestreo. Esto permitió comparar los pozos mejor clasificados por la matriz con las listas elaboradas manualmente en la etapa previa. La aplicación de la matriz de criterios se realizó mediante un programa elaborado en *Visual Basic for Applications* (VBA) en *Microsoft Excel*. La función de este programa fue asignar un puntaje parcial a cada pozo según el nivel de cumplimiento de cada criterio, donde el puntaje final fue calculado como la suma de los puntajes parciales otorgados en cada criterio.

La Tabla 6 muestra los criterios empleados y la asignación de puntajes (los puntajes varían entre -100 y 100 puntos, donde los valores negativos penalizan los pozos con características desfavorables). Las ponderaciones fueron asignadas de acuerdo a la importancia de cada criterio, sumando en total 100% entre todos los criterios. Como resultado, tras clasificar los pozos con la matriz de criterios, se optó por reemplazar tres pozos seleccionados en la categoría CH4/CH5 (de la lista prioritaria original) por otros mejor calificados. En el caso de los pozos de categoría CH1/CH2, las listas originales no sufrieron modificaciones. Las listas definitivas incluyeron un total de 22 pozos con las siguientes categorías: 5 pozos someros (CH1); 4 pozos someros-intermedios (CH2); 4 pozos intermedios-profundos (CH4); 9 pozos profundos (CH5). La ubicación de estos pozos y las trazas de los perfiles geofísicos propuestos por CSIRO se muestran en la Figura 13.

Tabla 6. Matriz de criterios empleada para refinar la selección de puntos a muestrear en la campaña de muestreo hidrogeoquímico.

Criterios		Pozos CH1-CH2		Pozos CH4-CH5		
		Puntaje	Ponderación [%]	Puntaje	Ponderación [%]	
C1	Profundidad mínima del cribado instalado en roca.	> 200 m	-100	15	100	25
		150-200 m	-100		90	
		100-150 m	-100		60	
		90-100 m	-100		40	
		70-90 m	-100		20	
		0-70 m o s/roca	0		-100	
C2	Largo del cribado instalado en roca (desde su prof. mínima hasta su prof. máxima).	> 10 m	0	0	100	25
		5-10 m	0		90	
		2-5 m	0		70	
		0-2 m	0		40	
		s/roca	0		-100	
C3	Profundidad máxima del cribado instalado en sedimento.	> 150 m	-100	45	-100	20
		100-150 m	-50		-50	
		75-100 m	60		60	
		0-75 m	100		100	
C4	Caudal normalizado c/r al largo (vertical) del cribado [l/s/m].	> 3	100	10	100	6
		1-3	70		70	
		0-1	40		40	
		0 = s/información	-100		-100	
C5	Cercanía a un perfil geofísico propuesto por CSIRO.	> 10 km	-100	15	-100	10
		5-10 km	-80		-80	
		2500-5000 m	-40		-40	
		1000-2500 m	0		0	
		500-1000 m	40		40	
		250-500 m	80		80	
		100-250 m	90		90	
		0-100 m	100		100	
C6	Potencia de un nivel intermedio impermeable (que separe aguas someras y profundas).	> 10 m	100	10	100	8
		5-10 m	85		85	
		0-5 m	70		70	
		0 = no presenta	-100		-100	
C7	Confiabilidad de la información.	1 = media-alta	100	5	100	6
		0 = baja	-100		-100	
		Total		100	Total	100



Leyenda

- Red hidrográfica
- Red vial
- Perfiles geofísicos propuestos por CSIRO

Rango de profundidad del cribado o ranurado:

Lista 1 Lista 2

- | | | |
|---|---|----------------------------------|
| ● | ■ | Somero (0 - 60 m) |
| ● | ■ | Somero-intermedio (0 - 100 m) |
| ● | ■ | Intermedio (55 - 100 m) |
| ● | ■ | Intermedio-profundo (50 - 150 m) |
| ● | ■ | Profundo (> 80 m) |

Figura 13. Mapa de ubicación de los puntos seleccionados para la campaña de muestreo hidrogeoquímico y perfiles geofísicos inicialmente propuestos por la fundación CSIRO Chile Research.

3.2.2 Equipos y materiales para el muestreo

Durante la campaña hidrogeoquímica, en cada pozo seleccionado para muestreo se contempló la medición *in situ* de cinco parámetros fisicoquímicos:

- Temperatura (T).
- Potencial de hidrógeno (pH).
- Potencial redox (Eh).
- Conductividad eléctrica (CE).
- Alcalinidad (Alc).

Para efectuar la medición de los primeros cuatro parámetros se emplearon dos medidores portátiles multiparamétricos de las siguientes características (Figura 14a):

- Medidor marca HACH modelo HQ40D. Este fue proporcionado por el Departamento de Geología de la Universidad de Chile.
- Medidor marca TPS modelo WP-81. Este fue proporcionado por la fundación CSIRO Chile Research.

Para medir la alcalinidad se empleó un analizador digital marca HACH modelo 16900, el cual fue proporcionado por CSIRO. Este aparato permitió efectuar la medición de la alcalinidad mediante la aplicación de dos indicadores de pH (fenolftaleína y bromocresol verde-rojo metilo) y dosificaciones regulares de ácido sulfúrico (H_2SO_4) con una valorización de $1,600 \pm 0,008$ N. Para realizar esta medición, el agua analizada fue vertida en un matraz de Erlenmeyer de 100 ml de capacidad (Figura 14b).

Posterior a las mediciones de campo, se procedió a la recolección de muestras, las cuales fueron destinadas a diferentes análisis de laboratorio para determinar la química de las aguas subterráneas. Antes de realizar el muestreo de cada pozo, se instaló una conexión hermética al gas en la tubería de descarga para evitar la contaminación atmosférica de las muestras. Esta conexión se efectuó mediante el uso de mangueras Tygon y/o tubos de cobre conectados al pozo con adaptadores Philmac y juntas Swagelok. Todo este procedimiento fue especialmente necesario para las muestras designadas para la medición de los gases clorofluorocarbonos (CFC), el hexafluoruro de azufre (SF_6) y los gases nobles, mediciones requeridas en el proyecto de CSIRO.

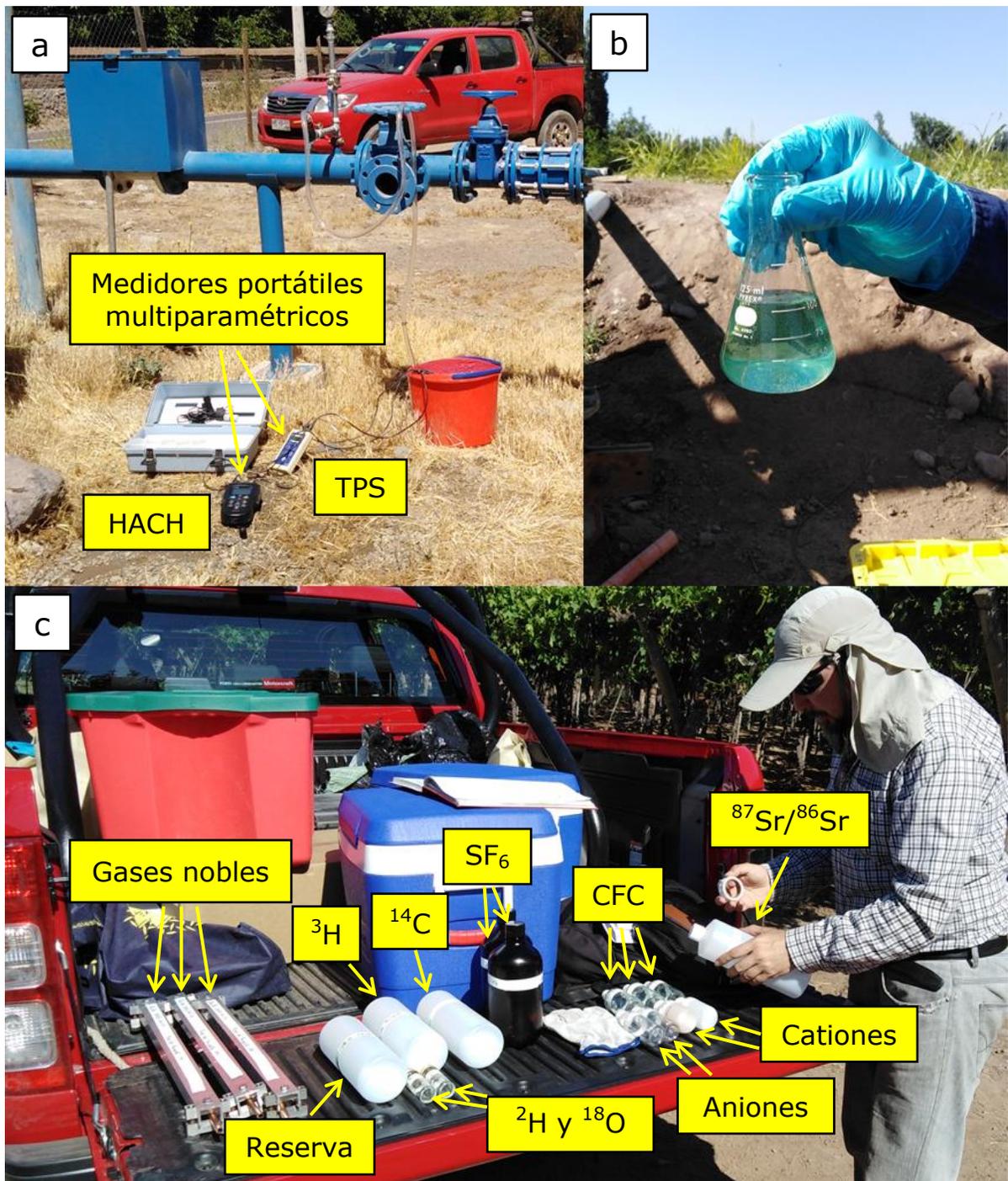


Figura 14. Fotografías de las principales herramientas y materiales utilizados en la campaña de muestreo hidrogeoquímico efectuada con CSIRO.

- a) Medidores portátiles multiparamétricos marca HACH y TPS.
- b) Medición de la alcalinidad en un matraz empleando indicadores de pH (fenolftaleína y verde-rojo metilo de bromocresol) y ácido sulfúrico.
- c) Botellas de vidrio, botellas de plástico PET y tubos de cobre utilizados para almacenar las muestras de agua destinadas a laboratorio.

En cada pozo se utilizó un total de 19 recipientes: 8 botellas de plástico PET, 5 botellas de vidrio, 2 botellas de vidrio estanco al gas (botellas McCartney), 1 vial de centelleo y 3 tubos de cobre (Figura 14c). Posterior al muestreo, todas las botellas fueron selladas y etiquetadas con cinta adhesiva. La Tabla 7 señala los tipos de recipientes utilizados y la cantidad de muestras tomadas en cada pozo para los distintos análisis de laboratorio.

Tabla 7. Recipientes utilizados para el muestreo de aguas subterráneas.

Parámetros	Recipiente	Volumen [ml]	Cantidad
Aniones	Botella de plástico PET	125	2
Cationes	Botella de plástico PET	125	2
^2H y ^{18}O	Botella McCartney	28	2
^3H	Botella de plástico PET	1000	1
^{14}C	Botella de plástico PET	1000	1
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Botella de plástico PET	250	1
Gases nobles	Tubo de cobre	-	3
^{222}Rn	Vial de centelleo	-	1
CFC	Botella de vidrio	125	3
SF_6	Botella de vidrio	1000	2
-	Botella de plástico PET	1000	1

Las muestras destinadas al análisis de aniones, cationes e isótopos estables fueron filtradas con un filtro de jeringa marca Acrodisc de 0,45 μm , esto para remover los sólidos en suspensión. Las muestras destinadas a medir cationes fueron acidificadas con ácido nítrico (HNO_3). Las muestras destinadas a medir gases nobles fueron almacenadas en tubos de cobre siguiendo el método propuesto por Weiss (1968). En el caso de las muestras destinadas a medir los gases CFC y SF_6 se realizó el siguiente procedimiento antes de tomar la muestra: la manguera conectada al pozo fue colocada en el fondo de la botella, la cual se colocó dentro de un balde de acero de 10 litros y el agua se bombeó hasta que el balde vació varias veces su volumen. Las muestras destinadas a medir el radón-222 fueron tomadas empleando el método "PET" descrito por Leaney & Herczeg (2006), el cual induce la separación del gas noble contenido en el agua mediante el uso de aceite mineral.

3.2.3 Trabajo de terreno

Entre los días 13 y 15 de noviembre del año 2018 se efectuó un terreno preliminar donde se contactó a los dueños de los pozos seleccionados. Esto con el fin de verificar de forma presencial las principales características de los pozos: ubicación, estado (operativo/en desuso), caudal explotado y factibilidad de realizar un muestreo. Entre los días 19 de noviembre y 1 de diciembre de 2018 se efectuó el trabajo de terreno principal, el cual consistió en el muestreo y medición *in situ* de las aguas subterráneas en los pozos

seleccionados y visitados durante el terreno preliminar. El orden de muestreo se estableció en función de la disponibilidad de los encargados o dueños contactados previamente.

3.2.4 Métodos analíticos

Finalmente, se realizaron los análisis químicos de las muestras recolectadas en terreno, labor que fue realizada por profesionales de CSIRO. En el presente estudio se trabajó exclusivamente con las concentraciones medidas para los constituyentes mayoritarios y minoritarios. En ambos casos, estas fueron determinadas en la Analytical Services Unit (ASU) de CSIRO, ubicada en el Waite Campus de Adelaide, Australia. En este laboratorio, los cationes fueron analizados mediante espectrometría de emisión óptica de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) y los aniones mediante cromatografía iónica.

3.3 Análisis e interpretación de resultados

Esta tercera etapa del trabajo contempló el análisis e interpretación de la información recopilada en la literatura en las áreas de hidrogeología e hidrogeoquímica. A continuación, se describen las consideraciones tomadas en cada área.

3.3.1 Hidrogeología

Para comprender mejor la hidrogeología de la zona, esto es, la distribución y profundidad de las distintas unidades hidrogeológicas, así como identificar los potenciales sitios de interés, se plantearon cuatro etapas: (1) determinar la geometría del basamento, (2) analizar los registros estratigráficos y la distribución de unidades, (3) elaborar mapas de isopiezas y (4) elaborar perfiles hidrogeológicos regionales y locales. A continuación, se describe en más detalle cada etapa.

3.3.1.1 Geometría del basamento

Para estudiar la geometría del basamento en la depresión de Los Andes-San Felipe, se realizó una interpolación de los datos de profundidad del basamento disponibles en tres fuentes principales:

- Los pozos con roca del catastro de captaciones.
- Los perfiles geofísicos interpretados por la DOH (2006)
- El límite del relleno sedimentario mapeado por la DOH (2009).

En primer lugar, se realizó una interpolación preliminar empleando la herramienta "Topo to Raster" de ArcMap (versión 10.4.1), donde se utilizó una celda de salida de tamaño 25x25 m. Posteriormente, se identificaron los pozos del catastro de captaciones sin roca perforada que tuvieran una potencia sedimentaria superior a la profundidad del basamento obtenida con la interpolación. Estos pozos, en adelante "pozos auxiliares", fueron añadidos a los datos originales para realizar una segunda interpolación que fuese más coherente con las potencias sedimentarias observadas. El mapa resultante fue empleado para estudiar la variación del espesor del relleno sedimentario a lo largo de la depresión, así como identificar los lugares donde se alcanzan las máximas potencias sedimentarias de la zona.

3.3.1.2 Registros estratigráficos y distribución de unidades

La segunda tarea del estudio hidrogeológico consistió en la revisión de las estratigrafías registradas en los pozos de la zona y su posterior interpretación empleando las unidades hidrogeológicas definidas en la zona de estudio. Esto con el fin de reconocer puntos de potencial interés para este trabajo, en particular, pozos en cuyos registros se evidencie (1) la presencia de roca, (2) la presencia de roca con cribado y (3) la presencia de niveles permeables intercalados entre sedimentos de baja permeabilidad a una profundidad cercana al basamento.

Para la interpretación de unidades, en primer lugar, se confeccionó un listado con todos los pozos que disponían de registro estratigráfico en la zona de estudio (Anexo H). Luego, en cada pozo, las unidades fueron asignadas tomando en consideración los siguientes criterios:

- Similitud de las características estratigráficas descritas (en cada tramo) con las características de una unidad hidrogeológica determinada.
- Coherencia de las unidades asignadas con la secuencia esperada de techo a base: S/RA, A, B, C, D y E1/E2/E3/E4.
- Coherencia entre las unidades asignadas a profundidades similares en pozos cercanos (separados a una distancia del orden de decenas o cientos de metros).

En los casos donde se halló un nivel de baja potencia intercalado entre otros niveles de estratigrafía muy distinta, se optó por asignar una misma unidad a toda la secuencia, privilegiando la información aportada por la mayoría de tramos estratigráficos. En los casos donde el nivel en cuestión fue observado en varios pozos cercanos, se optó por definir una nueva unidad de carácter local para representarlo de mejor manera.

En paralelo a la interpretación de los registros estratigráficos, se estudió la distribución general de las estratigrafías a partir del análisis de los perfiles geológicos propuestos por la DOH (2009) (Anexo E). Lo anterior permitió visualizar las tendencias generales que exhiben las secuencias sedimentarias dentro del valle, así como comparar estas tendencias con la distribución de las unidades hidrogeológicas descrita en estudios anteriores (e. g. DOH, 2006).

3.3.1.3 Mapa de isopiezas

Para estudiar la profundidad de las aguas subterráneas se elaboró un mapa de isopiezas empleando la información del catastro de captaciones y los pozos de observación de la red hidrométrica de la DGA. Inicialmente, se elaboraron múltiples mapas de isopiezas para abarcar los distintos años con datos, permitiendo así analizar no solo la forma de las isopiezas, sino también su evolución temporal. Sin embargo, dada la escasa disponibilidad de datos en la mayoría de años, se optó por limitar el análisis al período 1998-1999, el cual resultó tener la mayor cantidad y mejor distribución de datos en la zona de estudio. A continuación se detalla el procedimiento efectuado.

Primero se buscaron los períodos con la mayor cantidad y mejor distribución de datos. Como los registros abarcan un período de tiempo extenso (1966-2018), los datos fueron agrupados cada 5 años (1966-1970, 1971-1975..., 2016-2018), representando cada grupo en un mapa de ubicación. Con estos mapas se determinó que los períodos con más datos y mejor distribución fueron 1996-2000 y 2001-2005. Dentro de estos, los períodos de 2 años con mayor disponibilidad de datos fueron 1998-1999 (43 pozos) y 2003-2004 (28 pozos). Finalmente, se seleccionó el primer período por tener más datos y mejor distribución espacial de estos (el segundo período carecía de datos en la mitad oriental de la zona de estudio).

Posteriormente, se obtuvo la cota del nivel estático de cada pozo del período 1998-1999. Para ello se calculó la diferencia entre la cota del terreno y la profundidad del nivel estático. Para los pozos con más de una medición (14 pozos), se tomó el valor promedio del período, consiguiendo desviaciones estándar de 0-5 m y solo 3 pozos sobre los 5 m (estos fueron marcados con el signo "#" en el mapa final). En el caso de los pozos "Fundo La Quimera" y "Misión de María", construidos a menos de 10 m de distancia, se tomó un valor único equivalente al valor promedio entre estos, marcando este con el signo "##" en el mapa final. Finalmente, se realizó una interpolación de los valores empleando el método "Topo to Raster" en el software ArcMap (versión 10.4.1), utilizando una celda de salida de tamaño 20x20 m para la interpolación. Sin embargo, las isopiezas resultantes fueron descartadas ya que formaban curvas sin sentido en las zonas con pocos datos (en algunos sectores formaban círculos). Por lo anterior, se optó por trazar las isopiezas a mano en los sectores con mayor disponibilidad de datos.

3.3.1.4 Perfiles hidrogeológicos

En esta cuarta etapa se realizó una propuesta de once perfiles hidrogeológicos divididos en dos grupos:

- Perfiles hidrogeológicos generales (PG): perfiles de gran extensión que barren toda la zona de estudio.
- Perfiles hidrogeológicos locales (PL): perfiles de carácter local trazados en sitios de potencial interés para el presente estudio.

El grupo PG consideró tres perfiles paralelos y tres transversales al río Aconcagua. Lo anterior para visualizar la distribución y profundidad de las unidades hidrogeológicas en la depresión, complementando así la información aportada por los perfiles hidrogeológicos propuestos en los estudios anteriores analizados.

El grupo PL consideró cinco perfiles en sitios de potencial interés conforme a los objetivos inicialmente planteados, esto es, el estudio de aguas subterráneas en roca fracturada y en niveles permeables confinados a profundidades cercanas al basamento. Los perfiles PL fueron trazados en los sitios con mayor cantidad de puntos de interés dentro de la zona de estudio (puntos que fueron definidos en función del registro estratigráfico y la profundidad del cribado de los pozos).

Antes de elaborar los perfiles, se identificaron las principales fallas de la zona registrando para cada una su nombre, tipo (falla normal, inversa o de rumbo), rumbo, manto y fuente bibliográfica. Esto con el fin de ilustrar estas estructuras geológicas en los perfiles y analizar su relación (especialmente, su proximidad) con los pozos que explotan aguas subterráneas en roca fracturada.

A continuación se describen las consideraciones tomadas durante la elaboración de cada perfil, tanto para el grupo PG como PL. Cabe mencionar que, para facilitar la lectura de los perfiles, cada perfil fue orientado de oeste a este, etiquetando sobre la topografía algunos elementos geográficos de referencia tales como ríos y ciudades.

En primer lugar, para obtener la topografía del perfil, se utilizó un modelo de elevación digital (DEM, por sus siglas en inglés), proveniente del satélite ALOS PALSAR, con una resolución espacial de 12,5 m. En concreto, los valores de cota del DEM fueron extraídos mediante el software ArcMap (versión 10.4.1), donde se empleó la herramienta "Interpolate Shape" para intersectar la traza de cada perfil con la superficie del DEM, obteniéndose así la línea de topografía.

En segundo lugar, para delimitar la base del relleno sedimentario del perfil se consultó (1) el mapa con la cota del basamento elaborado por la DOH (2009), (2) la información de los pozos con roca del catastro de captaciones y (3) la geofísica propuesta por la DOH (2006). Al dibujar la morfología del basamento, se consideró también el efecto de las estructuras geológicas existentes descritas en la literatura o inferidas en el presente estudio. Para dibujar las fallas intersectadas por los perfiles, se tuvo en cuenta el manteo y rumbo de cada falla (indicados en la literatura) en torno al punto de intersección. En los casos donde no se disponía de un manteo o rumbo específico, el valor faltante fue estimado a partir de los perfiles o mapas geológicos de las fuentes consultadas (estas fueron citadas en los resultados). También se evaluó la existencia de fallas inferidas en aquellos sitios donde se observó (1) un salto abrupto en la profundidad del basamento y (2) la presencia de roca fracturada en pozos cercanos.

Para dibujar las fallas en los perfiles, se calculó el manteo aparente (μ_a) de cada falla a partir de su manteo real (μ_r) y el ángulo (α) formado entre el rumbo de la falla y el perfil. Estos parámetros, esquematizados en la Figura 15, se relacionan trigonométricamente por la siguiente ecuación:

$$\tan(\mu_a) = \tan(\mu_r) \cdot \text{sen}(\alpha)$$

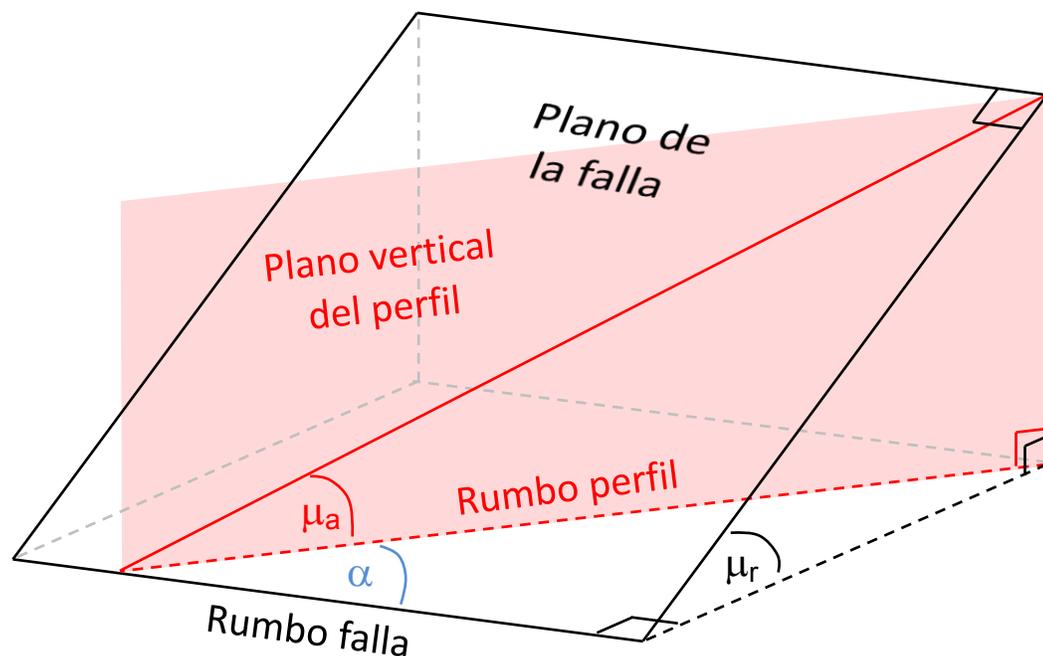


Figura 15. Manteo real (μ_r) y manteo aparente (μ_a) de una falla intersectada por el plano vertical de un perfil.

Posteriormente, para obtener la estratigrafía de cada perfil, se utilizó la información de los pozos cercanos del catastro de captaciones: solo se consideraron los pozos a una distancia máxima de 500 m (para los perfiles PG) y 350 m (para los perfiles PL). En ciertos lugares cercanos al contacto entre el relleno sedimentario y la roca, algunos pozos ilustrados en los perfiles mostraban registros estratigráficos contradictorios entre sí. En estos casos, se optó por descartar la información de los pozos más alejados del perfil para así mantener la información más representativa. Para representar la información estratigráfica se utilizó como simbología un conjunto de tramas basadas en los patrones litológicos estandarizados del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, 2006).

Tanto en los perfiles generales (PG) como locales (PL), en cada pozo se ilustró el rango de profundidad con cribado, el nivel estático y el tipo de agua representado con un diagrama de Stiff (para las muestras con hidrogeoquímica validada). Para cada nivel estático y diagrama de Stiff se agregó una etiqueta con la fecha de medición en formato MM/AA. En el caso de los perfiles locales (PL), se incluyó también el registro estratigráfico de cada pozo con una simbología simplificada.

Finalmente, utilizando como base la estratigrafía de cada pozo, se realizó una interpretación de las unidades hidrogeológicas definidas en la zona de estudio. Las unidades Qac, A, B, C y D fueron asignadas en función de su descripción (Tabla 1). Las unidades E1 (roca fracturada) y E2 (roca meteorizada permeable) fueron asignadas en aquellos sectores donde hubiera (1) pozos captando aguas subterráneas desde roca fracturada y/o (2) presencia de alguna estructura geológica cercana. En la clasificación anterior, E1 y E2 indican la presencia de aguas subterráneas en roca, mientras que E3 y E4 representan acuífugos.

Para contrastar la interpretación realizada, se consultaron los perfiles hidrogeológicos propuestos por la DOH (2006), en particular, las unidades interpretadas en torno a cada estación TEM. Esto fue especialmente útil en aquellos sectores donde los perfiles propuestos no contaban con información estratigráfica de pozos cercanos, pero se producía la intersección o cierta proximidad con los perfiles de la DOH (2006). En varios lugares, esta falta de información se debió a la presencia exclusiva de pozos que perforaron solo la unidad hidrogeológica B, impidiendo obtener información de las unidades más profundas.

En los perfiles propuestos donde se utilizó información de algún perfil de la DOH (2006) se agregó una etiqueta sobre el punto de intersección o proximidad entre los perfiles. En esta se indicaron los datos de la estación TEM más cercana (zona, número del perfil y número de la estación). Además, para garantizar la representatividad de la información usada, en cada perfil se

consideraron solo las estaciones TEM a una distancia máxima de 500 m (para los perfiles PG) y 100 m (para los perfiles PL). Cabe mencionar que en cuatro sectores no había registros estratigráficos suficientes para completar los perfiles PG, por lo que se optó por aumentar la distancia máxima a 800 m, agregando un asterisco en la etiqueta de los TEM utilizados (Z1P3 TEM 4*, Z1P3 TEM 10*, Z1P22 TEM 2* y Z1P24 TEM 3*). También se hallaron tres sitios donde la profundidad del basamento obtenida con las estaciones TEM era muy distinta a la indicada en el catastro de captaciones y en la DOH (2009). En este caso, se optó por utilizar la profundidad del basamento obtenida mediante la gravimetría efectuada por la DOH (2006), agregando un doble asterisco en la identificación (Z1P4 TEM 7**, Z1P9 TEM 2** y Z1P24 TEM 4**).

En la propuesta de perfiles locales se omitieron cuatro de los diez pozos con cribado instalado en roca. Por un lado, en el perfil PL1 se omitió el pozo P005 por superar la distancia máxima establecida (500 m). Y, por otro lado, se descartaron los pozos P024, P029 y P116 (ubicados en distintas partes de la depresión) debido a que cerca de ellos no se hallaron más pozos de interés. A continuación, se señala la ubicación de los cuatro pozos mencionados:

- P005: pozo localizado en el margen suroriental de la depresión, al sur de la ciudad de Los Andes (200-300 m al norte del estero Pocuro).
- P024: pozo localizado en el margen occidental de la depresión, en la quebrada de orientación NE-SO ubicada entre Curimón y Rinconada.
- P029: pozo localizado en el margen oriental de la depresión, en una terraza fluvial del río Aconcagua (7-8 km al este de Los Andes).
- P116: pozo localizado cerca del margen sur de la depresión, 100 m al oeste de un cerro isla ubicado entre Calle Larga y Auco (1-1,5 km al norte del estero Pocuro).

3.3.2 Hidrogeoquímica

3.3.2.1 Validación de datos

En primer lugar, se realizó una validación de los datos recolectados (Anexo F-3), donde solo las muestras que superaron los criterios considerados fueron utilizadas en los gráficos y análisis posteriores. La validación se efectuó mediante el cálculo del balance iónico. Cabe mencionar que 6 de las 53 mediciones (muestras n°32, n°33, n°35, n°39, n°43 y n°45) fueron inmediatamente descartadas debido a que no contaban con la medición de varios constituyentes mayoritarios, los cuales son indispensables para efectuar el balance iónico.

Tras aplicar el balance iónico, se encontró un total de 26 mediciones con un error superior al 2%, donde 2 de ellas (muestras n°18 y n°21) alcanzaron un error sobre el 10%. El Anexo I muestra los cálculos efectuados, donde se señala el error porcentual obtenido para cada muestra de la base de datos hidrogeoquímica. El Anexo I también muestra los parámetros y resultados obtenidos tras aplicar el criterio de la CE y el criterio de la suma de aniones. Estos dos criterios se utilizaron para determinar qué muestras presentan un error aceptable y cuáles debiesen ser descartadas.

De acuerdo al criterio de la CE, 34 mediciones presentan un error aceptable, mientras que según el criterio de la suma de aniones, la cantidad de datos con un error aceptable se reduce a 18. Por otro lado, según el criterio de la CE, tres muestras se ubican muy cerca de la curva de error admisible: n°9, n°13 y n°27. Estas no fueron aprobadas ni descartadas debido a que la curva es solo una aproximación.

Finalmente, para no perder una cantidad significativa de datos, se optó por obedecer el criterio de la CE, descartando las mediciones con un error sobre el 10%. En concreto, las muestras descartadas fueron la n°18 (error de 13,35%) y la n°21 (error de 10,95%), esto además de las 6 muestras excluidas inicialmente por falta de información. En síntesis, un total de 45 mediciones mostraron un error inferior al 10% en el balance iónico.

3.3.2.2 Características fisicoquímicas

Tras efectuar la validación de datos, se elaboró un resumen estadístico de las propiedades fisicoquímicas medidas en las aguas subterráneas de la zona de estudio, a saber: el TSD, la alcalinidad, la dureza total, la temperatura, la CE y el pH. Esto se logró mediante el uso de gráficos de caja y bigotes o "box plots". Para el análisis se consideraron los datos de la campaña hidrogeoquímica y mediciones de estudios anteriores (Anexo F). El mismo procedimiento se aplicó para las muestras de agua superficial, esto para poder compararlas con las aguas subterráneas.

3.3.2.3 Clasificación de las aguas

La tercera etapa consistió en clasificar la química de las aguas subterráneas de la zona de estudio. Para ello se emplearon diagramas de Piper y Stiff, los cuales permitieron visualizar la composición química de las muestras, así como su distribución en la zona. En el diagrama de Piper (1944), las distintas áreas definen diferentes facies hidroquímicas (Back, 1966), las cuales tienen determinadas proporciones de cationes y aniones que definen los distintos tipos de agua. Para generar el diagrama de Piper se empleó un programa desarrollado por el Nevada Water Science Center (NVWSC, 2005) en VBA (en *Microsoft Excel*).

Los diagramas de Stiff, por su parte, son útiles para analizar los cambios composicionales del agua en profundidad, especialmente, en perfiles hidrogeológicos (Zapozec, 1972). Estos diagramas también se suelen utilizar en mapas para analizar la distribución y tendencias de los distintos tipos de agua. Para crear y georeferenciar estos diagramas se utilizó el software Open Stiff v. 0.4, desarrollado por Pérez (2012), aplicando algunas modificaciones posteriores debido a errores de compatibilidad con el sistema operativo usado (Windows 8.1). Cabe mencionar que, en la mayoría de los diagramas hidrogeoquímicos elaborados, los datos muestran seis colores que representan la profundidad del cribado de cada pozo (Tabla 8).

Tabla 8. Clasificación de colores para las categorías de cribado definidas.

Categoría*	Rango de profundidad del cribado	Color	Componentes		
			R	G	B
CH0	Agua de río/estero (estaciones DGA)		0	0	255
CH1	0 - 60 m		100	150	255
CH2	0 - 100 m		0	255	255
CH3	55 - 100 m		255	255	0
CH4	50 - 150 m		0	255	0
CH5	> 80 m		0	130	0

* Categorías definidas en la Tabla 5.

3.3.2.4 Procesos que controlan la química de las aguas

En esta etapa se identificaron los principales procesos que controlan la química de las aguas en la zona de estudio. Para ello se emplearon los diagramas propuestos por Gibbs (1970), donde la posición de los datos determina el proceso dominante: interacción agua-roca, precipitaciones (lluvia) o evaporación.

3.3.2.5 Matriz de correlación

En esta etapa se realizó un análisis de correlación para estudiar el grado de relación existente entre los distintos parámetros hidrogeoquímicos medidos en las aguas subterráneas de la zona. Lo anterior se hizo mediante la elaboración de una matriz de correlación compuesta por coeficientes de correlación de rangos de Spearman. Se optó por utilizar este coeficiente en lugar del coeficiente de correlación de Pearson debido a que el primero no requiere que los datos tengan una distribución normal y es más robusto frente a datos atípicos (el coeficiente de correlación de Pearson tiende a subestimar la correlación en presencia de "outliers").

La matriz fue generada mediante un programa elaborado en *Visual Basic for Applications* (VBA) en *Microsoft Excel*. En la matriz se incluyeron los constituyentes químicos mayoritarios (Ca, Mg, Na, K, Cl, HCO₃, SO₄ y NO₃) y algunos parámetros fisicoquímicos (pH y T) de las aguas subterráneas. Cabe mencionar que los coeficientes obtenidos no varían al cambiar la unidad de un parámetro, esto siempre que todas las mediciones del parámetro compartan una misma unidad. Por ejemplo, al expresar todas las medidas del HCO₃ en mg/l, se obtiene la misma matriz que expresando los valores en meq/l.

En la matriz se omitieron Alc, CE y TSD por ser parámetros calculados o medidas indirectas del contenido iónico. También se omitió el Eh por contar solo con diez mediciones (muestras n°1 a n°10). Por último, se excluyeron las ocho estaciones DGA (muestras n°46 a n°53), que corresponden a aguas superficiales, no aguas subterráneas.

3.3.2.6 Mapas de distribución

El objetivo de esta etapa fue analizar si existe alguna tendencia espacial de los parámetros de la base de datos hidrogeoquímica (en concreto, alguna tendencia a lo largo de la dirección del flujo subterráneo). Para ello, se elaboró un mapa de distribución con los valores de cada parámetro de la base de datos hidrogeoquímica (Anexo F-3). Los períodos de medición y los rangos de valores fueron representados aplicando una doble simbología: los períodos se identificaron con colores y los valores con tamaños. Estos mapas también permitieron visualizar de mejor manera las diferencias entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales.

3.3.2.7 Procesos de interacción agua-roca

Por último, se elaboraron diagramas binarios para estudiar la relación entre la concentración de los distintos iones presentes en las aguas, especialmente, entre aquellos que mostraron la mejor correlación en la matriz de correlación. Estos diagramas se utilizaron para analizar las posibles reacciones químicas en las que han participado las aguas subterráneas en su trayecto desde las zonas de recarga, permitiendo determinar las características litológicas de los materiales por los que ha circulado el agua y los procesos externos que la han afectado. Las concentraciones fueron expresadas en mmol/l para reflejar las relaciones estequiométricas entre los distintos iones (los índices estequiométricos permiten determinar las posibles reacciones involucradas). Cabe mencionar que los gráficos elaborados en esta etapa se presentan en la discusión del informe.

4 Resultados

En este capítulo se presentan paso a paso los principales resultados obtenidos en las áreas de hidrogeología e hidrogeoquímica.

4.1 Hidrogeología

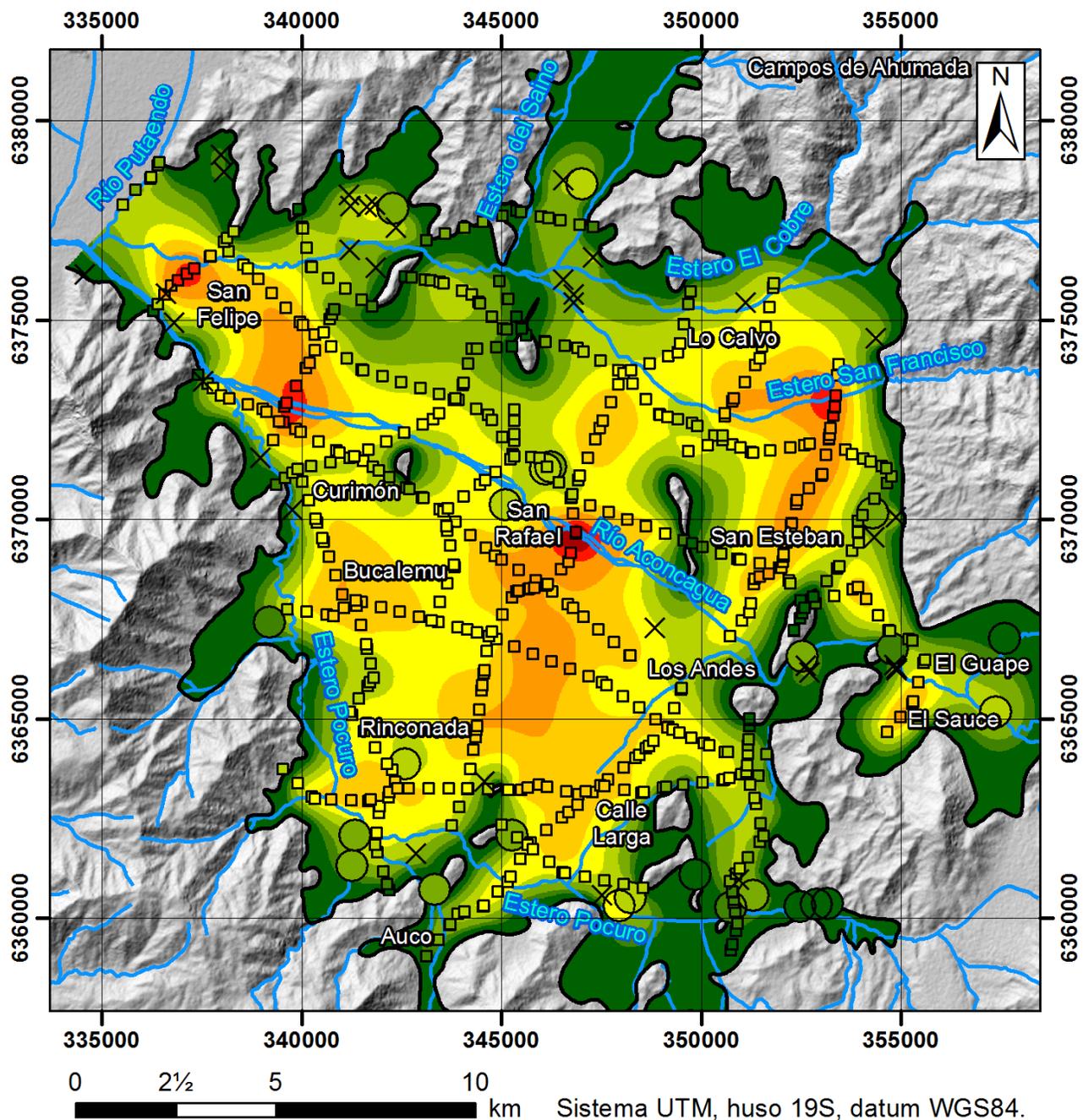
A continuación se muestran los resultados de las cuatro etapas planteadas para el estudio de la hidrogeología de la zona de estudio, esto es, la distribución y espesor de las unidades hidrogeológicas definidas en Los Andes-San Felipe, la piezometría de los acuíferos y la definición de sitios de interés mediante una propuesta de perfiles acordes a los objetivos inicialmente planteados, esto es, la exploración de aguas subterráneas en roca y en niveles sedimentarios cercanos al basamento.

4.1.1 Geometría del basamento

En esta etapa se elaboró un mapa de la profundidad del basamento en la zona de estudio empleando los antecedentes geofísicos y estratigráficos disponibles. En la Figura 16 se muestra el mapa creado a partir de la interpolación de los datos obtenidos de los pozos del catastro de captaciones y de los perfiles geofísicos interpretados por la DOH (2006). Lo anterior complementado con el límite del relleno sedimentario mapeado por la DOH (2009) y los pozos auxiliares empleados para corregir la interpolación.

En la Figura 16 se observa que el relleno sedimentario de la zona de estudio alcanza potencias máximas del orden de 300-350 m hacia las partes centrales del valle. La potencia del relleno decrece de forma acentuada hacia los márgenes de la depresión y en torno a los cerros isla, los cuales presentan orientaciones aproximadas N10°O y N40°E. Las máximas potencias sedimentarias se observan en cuatro sectores:

- Entre el estero San Francisco y el río Aconcagua, al noroeste y al sureste de la ciudad de San Felipe (potencia máxima de 300-325 m).
- En torno al río Aconcagua, en el sector de San Rafael (potencia máxima de 300-353 m)
- En torno al estero San Francisco, a 1-2 km de distancia del margen occidental de la depresión (potencia máxima de 300-325 m).



Leyenda

- Pozo con roca
 - × Pozo auxiliar (sin roca)
 - Punto en perfil TEM de Ingedos-DOH (2006)
 - Contacto relleno-roca según Dictuc-DOH (2009)
 - Red hidrográfica
- Profundidad del basamento (m):
- | | | |
|----------|-----------|-----------|
| 0 - 25 | 100 - 150 | 250 - 300 |
| 25 - 50 | 150 - 200 | 300 - 325 |
| 50 - 100 | 200 - 250 | 325 - 353 |

Figura 16. Mapa de la profundidad del basamento en la zona de estudio.

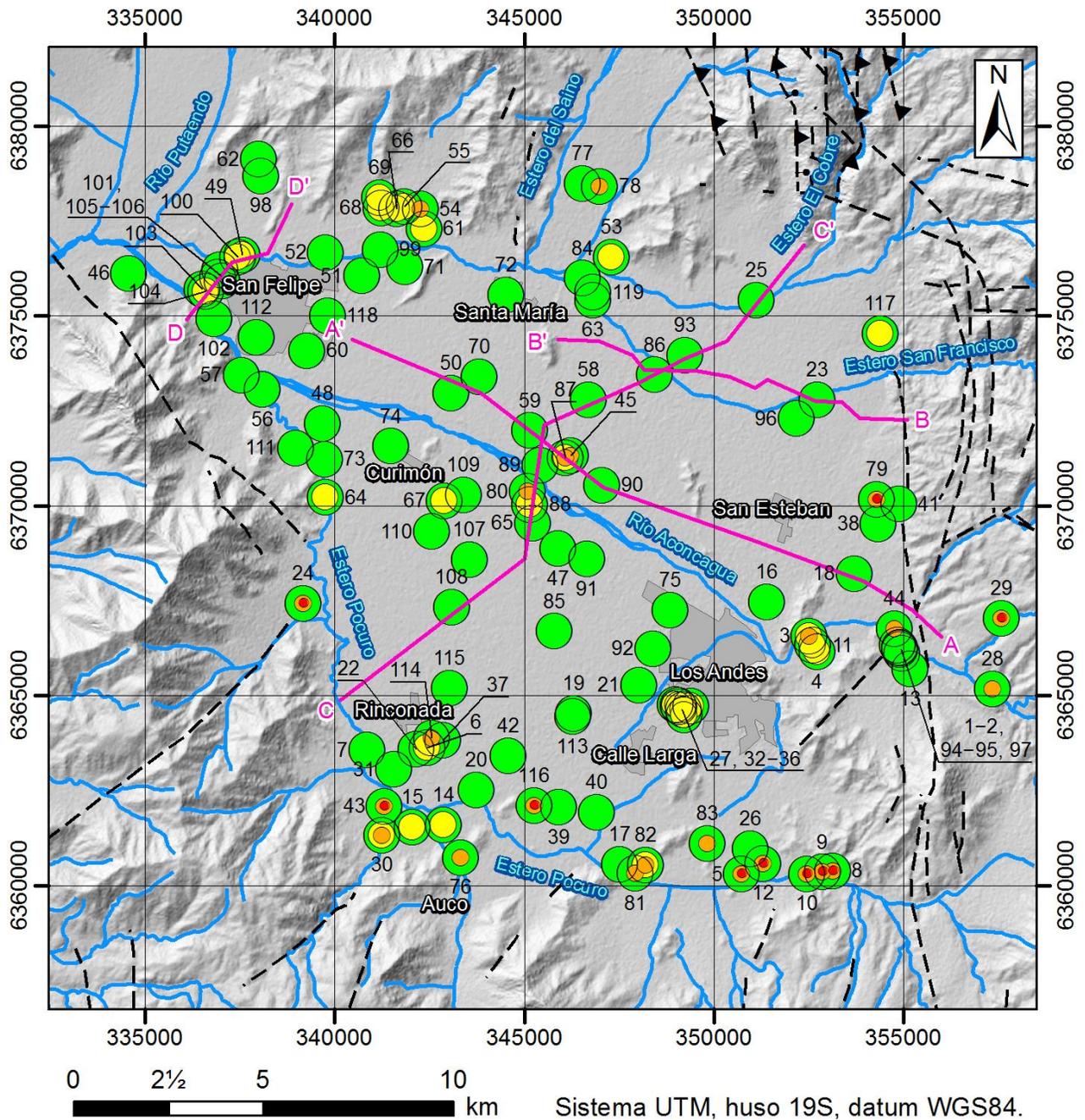
4.1.2 Registros estratigráficos y distribución de unidades

En esta etapa se analizaron los pozos de la zona para identificar la presencia de roca fracturada permeable (con cribado) y niveles permeables intercalados entre niveles de baja permeabilidad a profundidades cercanas al basamento. Lo anterior conforme a los objetivos planteados, esto es, la exploración de aguas subterráneas en roca fracturada y en sedimento emplazado cerca del basamento.

El Anexo H contiene una lista de todos los pozos de la zona de estudio que tienen registro estratigráfico (119 pozos). Dentro de esta lista, 24 pozos perforaron el basamento, 13 de ellos mostrando roca fracturada. De estos 13 pozos, 10 poseen cribado instalado a la profundidad de la roca. El Anexo J muestra las estratigrafías y habilitaciones de estos 10 pozos. La Figura 17 muestra la ubicación de todos los pozos con estratigrafía disponible, indicando cuáles alcanzan la roca y si existe cribado instalado en ella. También se señalan los pozos que presentan un nivel de alta permeabilidad (gravas a arenas medias) intercalado entre niveles de baja permeabilidad (arcillas, limos o arenas arcillosas-limosas) a una profundidad cercana a la del basamento.

En paralelo a la búsqueda de pozos de interés, se estudiaron las tendencias de las estratigrafías en la zona. Para ello se analizaron los perfiles geológicos propuestos por la DOH (2009) (Anexo E), cuyas ubicaciones se muestran en la Figura 17. Posteriormente, las tendencias estratigráficas observadas fueron contrastadas con la distribución de unidades propuesta en estudios anteriores: CNR (1979), DOH (1998) y DOH (2006). A continuación se describe (1) la distribución general de las unidades hidrogeológicas descritas en la literatura y (2) las tendencias estratigráficas observadas en los perfiles AA' y CC' propuestos por la DOH (2009). Estos dos últimos perfiles cruzan la depresión de Los Andes-San Felipe de forma longitudinal y transversal al río Aconcagua, respectivamente.

De acuerdo a diferentes estudios (CNR, 1979; DOH, 1998; DOH, 2006; DOH, 2009), el sector de Los Andes-San Felipe se caracteriza por la presencia de cuatro unidades hidrogeológicas (Figura 18). Estas unidades son (de techo a base): la unidad A, que forma una franja de orientación ONO-ESE entre el estero Pocuro y el río Aconcagua (al oeste de Los Andes); la unidad B, que cubre prácticamente toda la depresión; la unidad C, que rodea el estero San Francisco al norte de San Esteban (en el sector noreste de la depresión); y la unidad D, que cubre gran parte del valle, pero con un área inferior a la unidad B (pues se acuña de forma más acentuada hacia los márgenes de la depresión y cerca de los cerros isla). En el presente estudio también se definen las unidades hidrogeológicas L1 y L2, las cuales se describen más adelante en los perfiles locales propuestos.



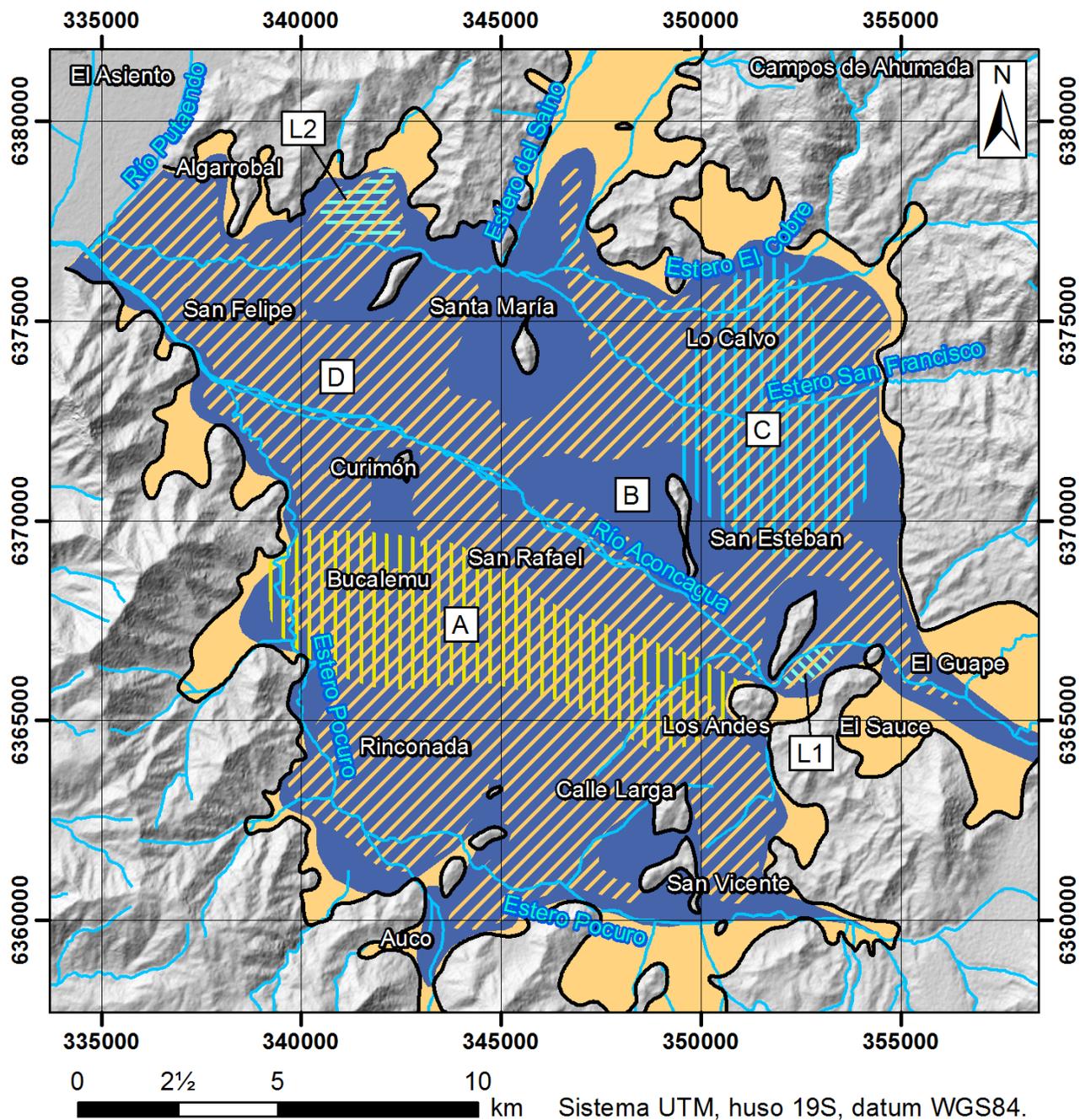
Legenda

- Perfiles geológicos Dictuc-DOH (2009)
- Estructuras inferidas de Bustamante et al. (2012)
- Red hidrográfica
- Áreas urbanas

Pozos de interés:

- Con registro estratigráfico disponible
- Con nivel permeable intercalado entre niveles de baja permeabilidad
- Con presencia de roca
- Con cribado o ranurado en roca

Figura 17. Mapa de ubicación de los pozos de interés con estratigrafía disponible y trazas de los perfiles geológicos propuestos por la DOH (2009) en Los Andes-San Felipe.



Legenda

- Red hidrográfica
- Contacto relleno-roca según Dictuc-DOH (2009)
- Depósitos sedimentarios sin la presencia de unidades principales

Unidades hidrogeológicas:

- | | | |
|--|---|---|
| A | C | L1 |
| B | D | L2 |

Figura 18. Mapa de distribución de las unidades hidrogeológicas definidas en el sector de Los Andes-San Felipe.

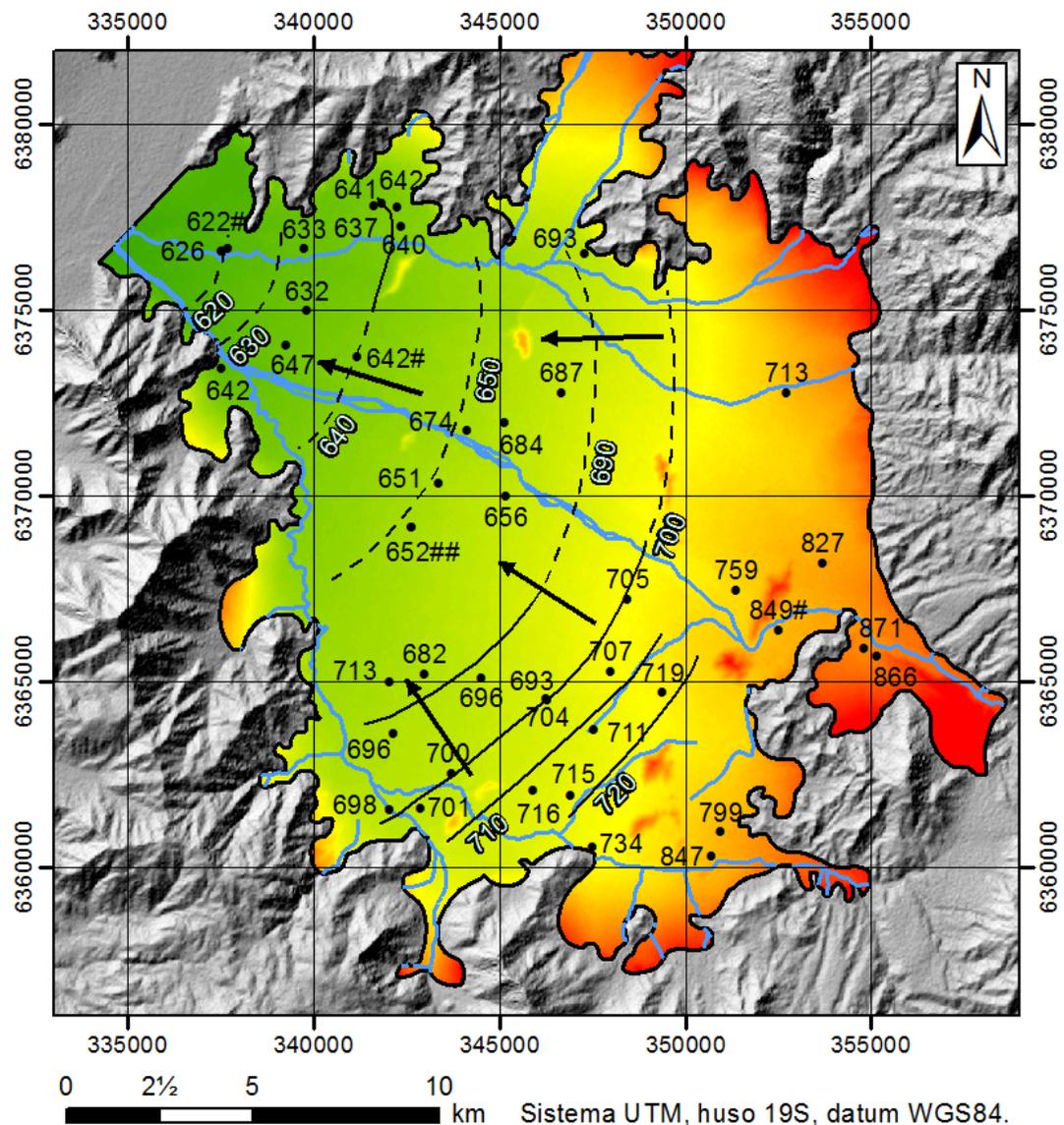
En el Perfil AA' de la DOH (2009) (Anexo E-1) se reconoce hacia el techo un paquete de gravas cuyo espesor oscila entre 50-150 m (capas 1 y 2). En el sector occidental del perfil, este paquete aumenta su contenido de arenas y sobreyace a un paquete de 10-90 m de depósitos arcillosos que gradan lateralmente a gravas arenosas (capa 3). En el sector oriental, bajo las gravas se observan 10-70 m de gravas arcillosas que gradan a gravas arenosas hacia el extremo sureste (capa 3). El basamento alcanza una profundidad máxima de 200-250 m en la parte central y oriental del perfil.

En el Perfil CC' de la DOH (2009) (Anexo E-3), el relleno sedimentario tiene un espesor de 200-300 m y muestra una gran variabilidad estratigráfica: en el sector oriental predominan las gravas arenosas, las cuales gradan a arenas gravosas (hacia el centro del perfil) y a gravas arcillosas (hacia la parte occidental). En el sector central, bajo las gravas (capa 1) se observan paquetes con alto contenido de arenas (capa 2) y arcillas (capa 3). Estos paquetes presentan extensiones de 1-3 km y espesores de 50-70 m. En el sector occidental predominan las gravas arcillosas (capas 1, 2 y 3), entre las cuales se intercala un paquete de 30-50 m de gravas con bajo contenido de arcillas a unos 50 m de profundidad (techo capa 2). El basamento alcanza una profundidad máxima de 250-300 m en la parte occidental del perfil.

En estos perfiles es posible visualizar la distribución de algunas de las unidades hidrogeológicas definidas en la zona. En el perfil AA', por ejemplo, se observa una secuencia de granulometría gruesa que se extiende a lo largo de todo el valle (unidad hidrogeológica B), la cual sobreyace a otra de granulometría más fina que presenta un acuñaamiento más marcado hacia los bordes de la depresión (unidad hidrogeológica D). En el perfil CC' se observa la misma secuencia de granulometría gruesa hacia el sector noreste de la depresión. Esta presenta intercalaciones de paquetes con granulometrías más finas que aumentan progresivamente en cantidad y potencia hacia el sector suroeste de la depresión, entre el río Aconcagua y el estero Pocuro. Estas intercalaciones corresponden a los depósitos de la unidad hidrogeológica A (hacia el techo) y la unidad hidrogeológica D (hacia la base).

4.1.3 Mapa de isopiezas

En esta etapa se elaboró un mapa de isopiezas empleando los niveles estáticos del catastro de captaciones y los pozos de observación de la DGA. La Figura 19 muestra el mapa creado a partir de los niveles medidos en el período 1998-1999 (años con mayor disponibilidad de datos). En el mapa se observa que las isopiezas tienden a seguir las cotas topográficas (cada una se extiende sobre un color relativamente fijo en el DEM). También se observa que la dirección del flujo subterráneo se alinea, de forma aproximada, con la dirección y sentido de los cauces principales. Estas tendencias se replican en las isopiezas de la DOH (2009) (Anexo K).



Leyenda

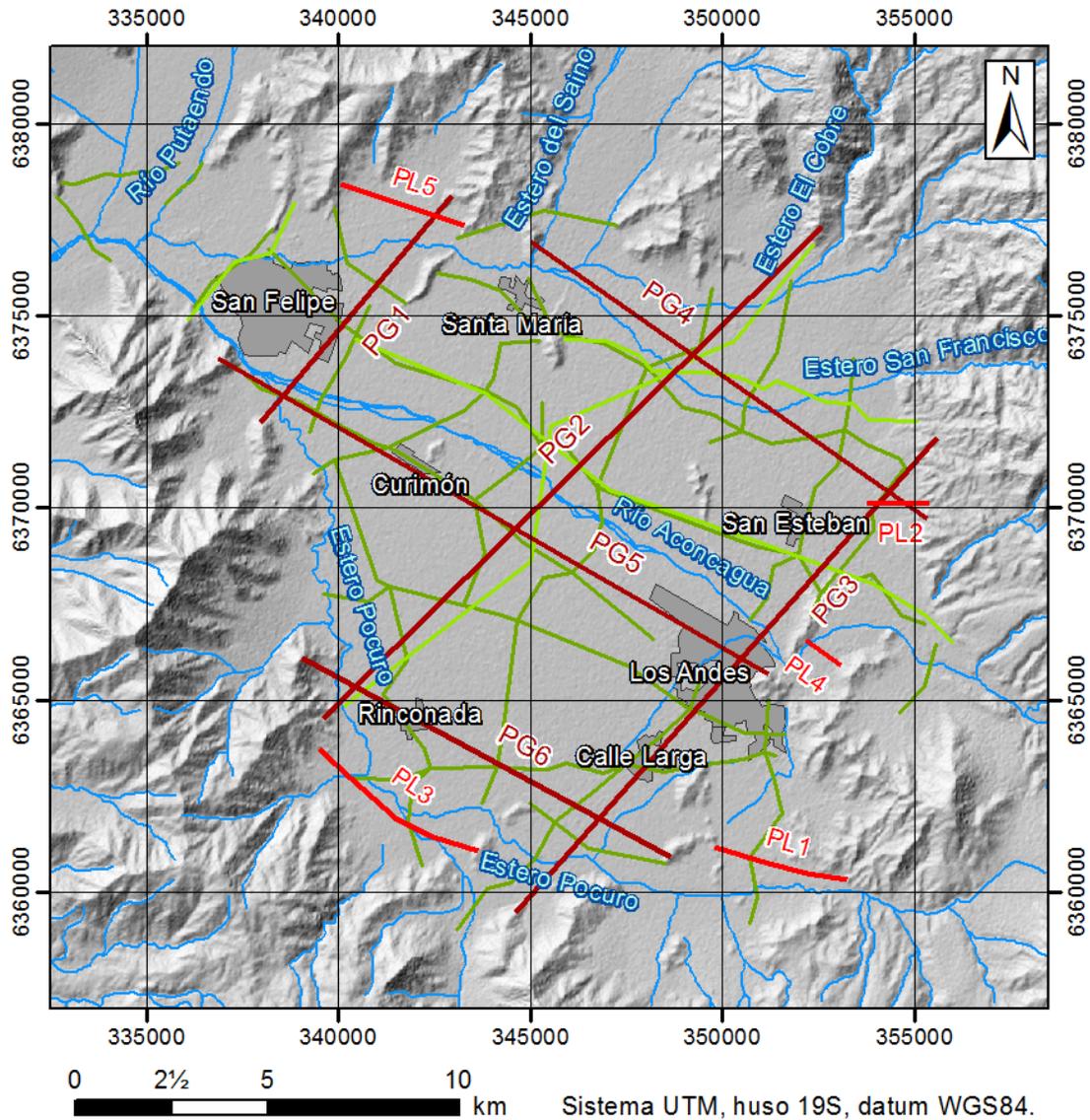
- Zona de estudio
 - Red hidrográfica
 - Pozo
 - Cota hidráulica (m s. n. m.)
 - - - Cota hidráulica inferida (m s. n. m.)
 - Dirección flujo subterráneo
- Altitud topográfica (m s. n. m.)**
- 1182
■
■
■ 596

Figura 19. Mapa de isopiezas del período 1998-1999 en la zona de estudio.

Otro punto a destacar es que la separación entre las isopiezas aumenta bastante entre las curvas de los 630 y 650 m s. n. m., lo que indicaría una disminución del gradiente hidráulico en ese sector. En el mapa de isopiezas de la DOH (2009) ocurre algo similar, pero entre las curvas de los 690 y 700 m s. n. m. (Anexo K).

4.1.4 Perfiles hidrogeológicos

En esta etapa se elaboraron seis perfiles generales (PG) y cinco perfiles locales (PL): los primeros para estudiar la distribución y profundidad de las unidades hidrogeológicas definidas en la zona de estudio; los últimos para analizar los sitios de potencial interés conforme a los objetivos planteados. La Figura 20 muestra la ubicación de los once perfiles propuestos, además de las trazas de los perfiles propuestos por la DOH (2006) y DOH (2009).



Leyenda

- Perfiles generales propuestos (PG)
- Perfiles locales propuestos (PL)
- Red hidrográfica
- Perfiles Ingedos-DOH (2006)
- Perfiles Dictuc-DOH (2009)
- Áreas urbanas

Figura 20. Mapa de ubicación de los perfiles propuestos en este estudio y en los estudios de la DOH (2006) y DOH (2009).

4.1.4.1 Fallas principales

En estudios anteriores efectuados sobre los acuíferos aluviales de la zona, los frentes montañosos han sido típicamente considerados como condiciones de borde con un flujo subterráneo nulo. En Taucare *et al.* (2020b) se plantea que las fallas oblicuas de orientación aproximada NO-SE en la ZFP se comportan como estructuras de alta permeabilidad que conducen el flujo subterráneo de la Cordillera Principal al acuífero aluvial de la depresión. Por lo anterior, en el presente trabajo se identificaron las principales estructuras geológicas descritas en la zona, con énfasis aquellas intersectadas por los perfiles propuestos. Esto con el fin de determinar su posición en los perfiles y analizar su relación y cercanía con las aguas subterráneas presentes en roca fracturada. La Tabla 9 muestra ocho de las principales fallas identificadas, las cuales, en general, presentan una dinámica similar u opuesta a la ZFP. La Tabla 9 también señala las características generales de estas fallas y la fuente bibliográfica de los datos.

Tabla 9. Características de las principales fallas descritas en la zona de estudio.

Nombre	Tipo	Rumbo	Manteo	Fuente bibliográfica
Zona de Falla Pocuro (ZFP)	Fallas normales invertidas	NS a N20°O	79°E *	Moscoso <i>et al.</i> (1982); Rivano <i>et al.</i> (1993); Campbell (2005); Bustamante <i>et al.</i> (2012)
Falla Campos de Ahumada	Falla normal	N15°O	75°E	Taucare <i>et al.</i> (2022)
Falla Estero Pocuro	Falla normal	N15°O	75°E **	
Falla San Francisco	Falla inversa-dextral	NS a N15°O	60-75°E	
Falla Jahuel	Falla inversa-sinistral	N45°O	70°N	
Falla Termas El Corazón	Falla inversa-sinistral	N70°O	60°N (±20°)	
Falla Las Bandurrias	Falla inversa	NS a N50°E	38°O *	Machuca (2017)
Falla Algarrobo	Falla normal invertida parcialmente	N10°E	62°E *	
Falla El Quisquerío	Falla de rumbo dextral	N40°O	80°NE	

* Manteo estimado a partir de los perfiles geológicos de la última fuente citada.

** Sin dato de manteo. Se asumió valor similar al de la falla Campos de Ahumada.

4.1.4.2 Perfiles generales (PG): unidades principales del valle

De la Figura 21 a la Figura 26 se muestran los seis perfiles hidrogeológicos generales (PG) propuestos en la zona de estudio. Las coordenadas de cada perfil están expresadas en el sistema UTM, huso 19S, datum WGS84. En general, en todos los perfiles se observa la tendencia usual del valle del río Aconcagua. Por un lado, la unidad hidrogeológica B corona el relleno sedimentario, cubriendo todo el ancho del valle y exhibiendo un acuñamiento leve hacia los bordes del mismo. Infrayaciendo a la unidad hidrogeológica B se tiene la unidad hidrogeológica D, la cual cubre una extensión menor del valle y muestra un acuñamiento muy acentuado hacia las laderas. Esta tendencia se puede observar de forma clara en los perfiles PG1 (Figura 21) y PG6 (Figura 26).

En los perfiles PG2 a PG5 (Figura 22 a Figura 25) se suman las unidades hidrogeológicas A y C, definidas en la literatura para la depresión de Los Andes-San Felipe (no aparecen en otros tramos del valle del río Aconcagua). La unidad hidrogeológica A se encuentra en el sector suroccidental de la zona de estudio, extendiéndose entre el estero Pocuro y el río Aconcagua, al oeste de Los Andes. Esta unidad sobreyace a la unidad hidrogeológica B, tal como se ilustra en los perfiles PG2 (Figura 22), PG3 (Figura 23) y PG5 (Figura 25). La unidad hidrogeológica C aparece en el sector nororiente de la zona de estudio, extendiéndose en torno al estero San Francisco, al norte de la ciudad de San Esteban. Esta unidad sobreyace a la unidad hidrogeológica D, presentándose como una gradación lateral o sobreyaciendo a la unidad hidrogeológica B en los perfiles PG2 (Figura 22) y PG4 (Figura 24).

De acuerdo a los datos del catastro de captaciones y a la geofísica interpretada por la DOH (2006), la máxima potencia de cada unidad hidrogeológica es alcanzada en distintos sectores de la zona:

- La unidad A presenta espesores máximos del orden de 50-60 m unos 3-4 km al sureste de Curimón (entre Curimón y Rinconada).
- La unidad B presenta potencias máximas del orden de 220-230 m unos 4 km al ONO de San Esteban (al norte del río Aconcagua).
- La unidad C presenta espesores máximos del orden de 230-240 m unos 3-4 km al NNO de San Esteban (al norte del estero San Francisco).
- La unidad D presenta potencias máximas que oscilan entre 200-220 m en tres sectores: (1) medio kilómetro al este de la desembocadura del estero Pocuro en el río Aconcagua, (2) en el río Aconcagua, a mitad de distancia entre Curimón y Los Andes, y (3) en el estero San Francisco, unos 3-4 km al NNE de San Esteban.

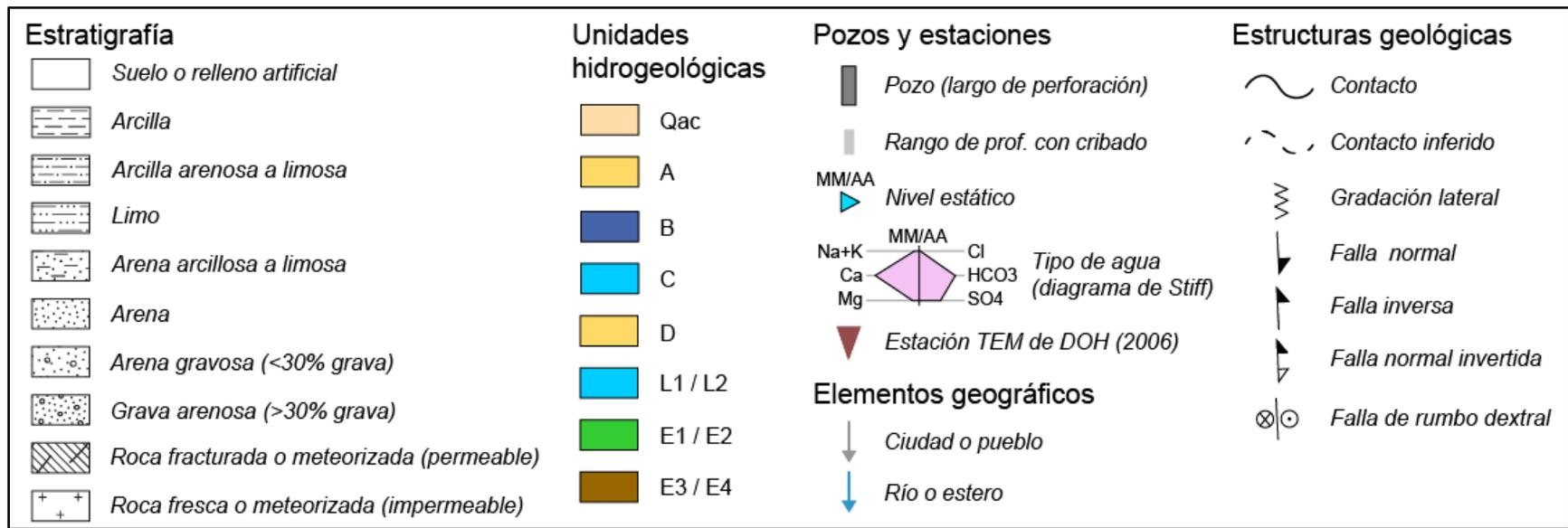
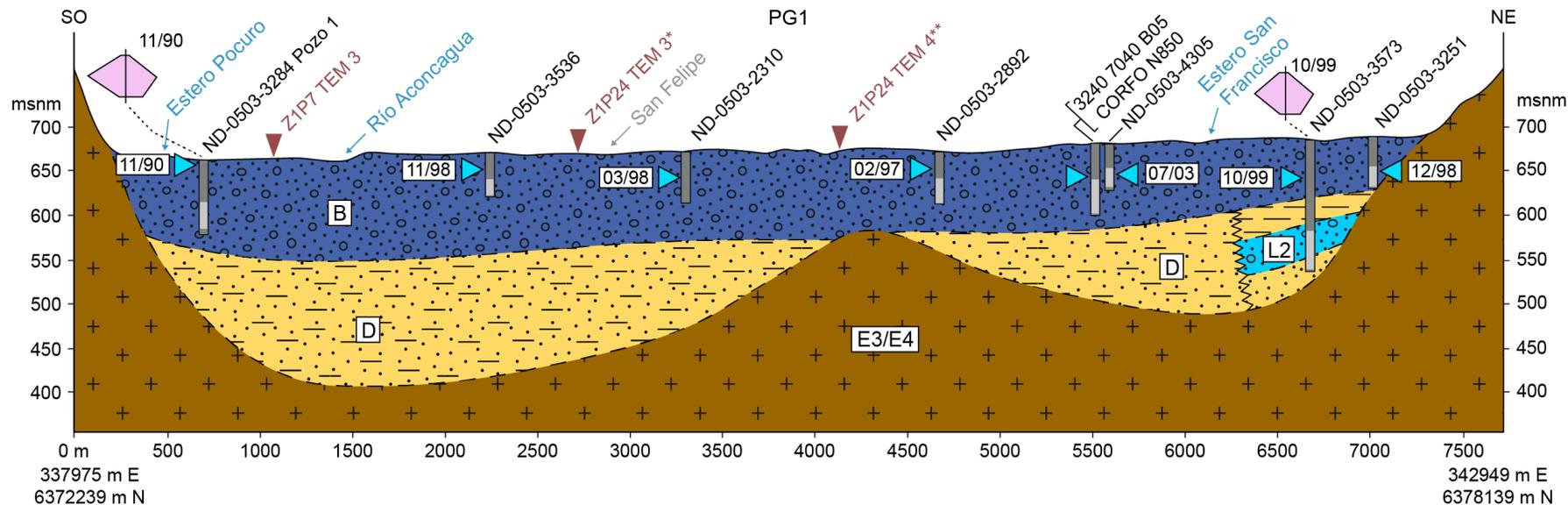


Figura 21. Perfil hidrogeológico general 1 (PG1) propuesto en la zona de estudio.

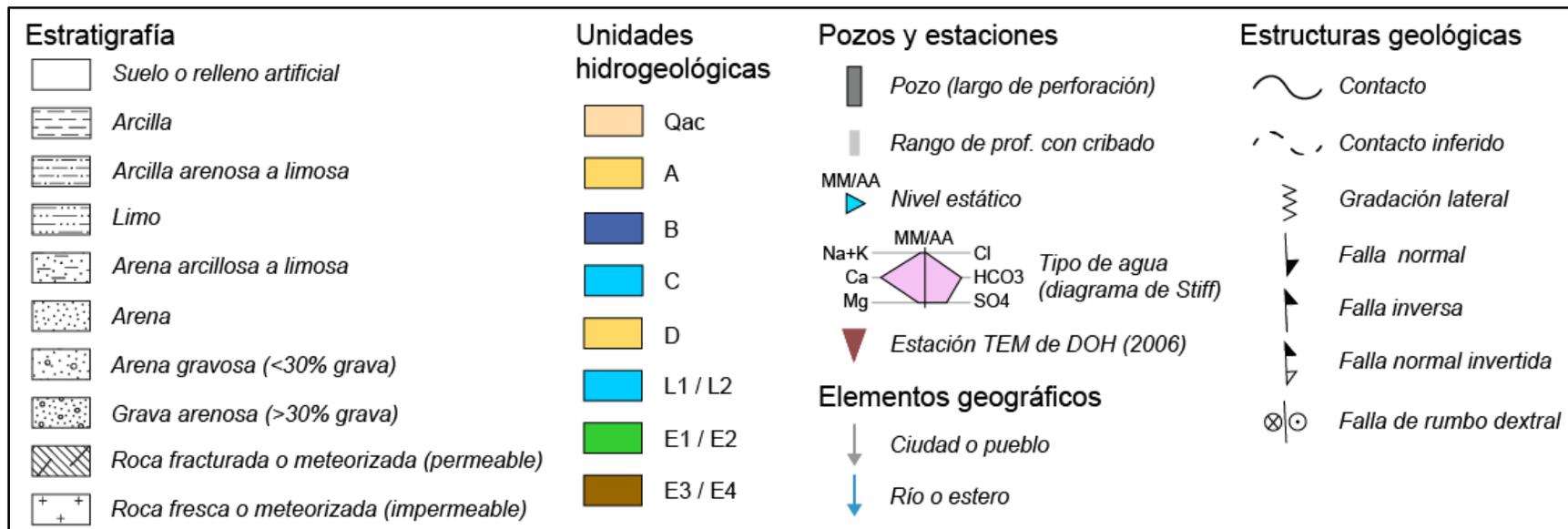
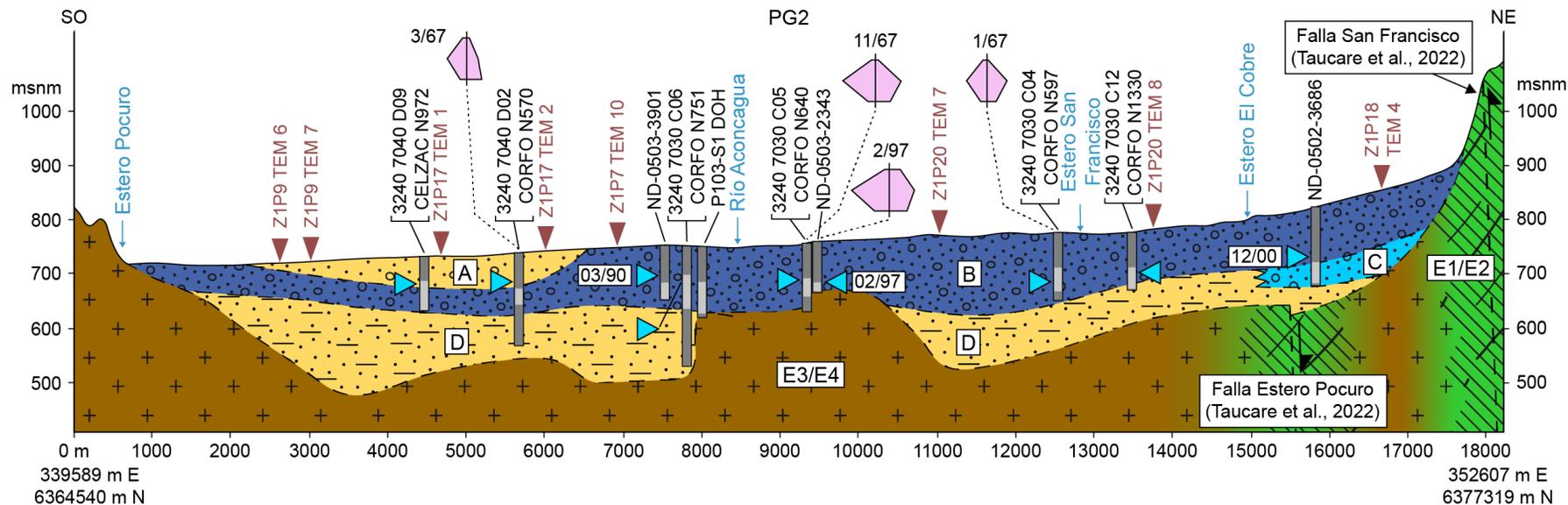


Figura 22. Perfil hidrogeológico general 2 (PG2) propuesto en la zona de estudio.

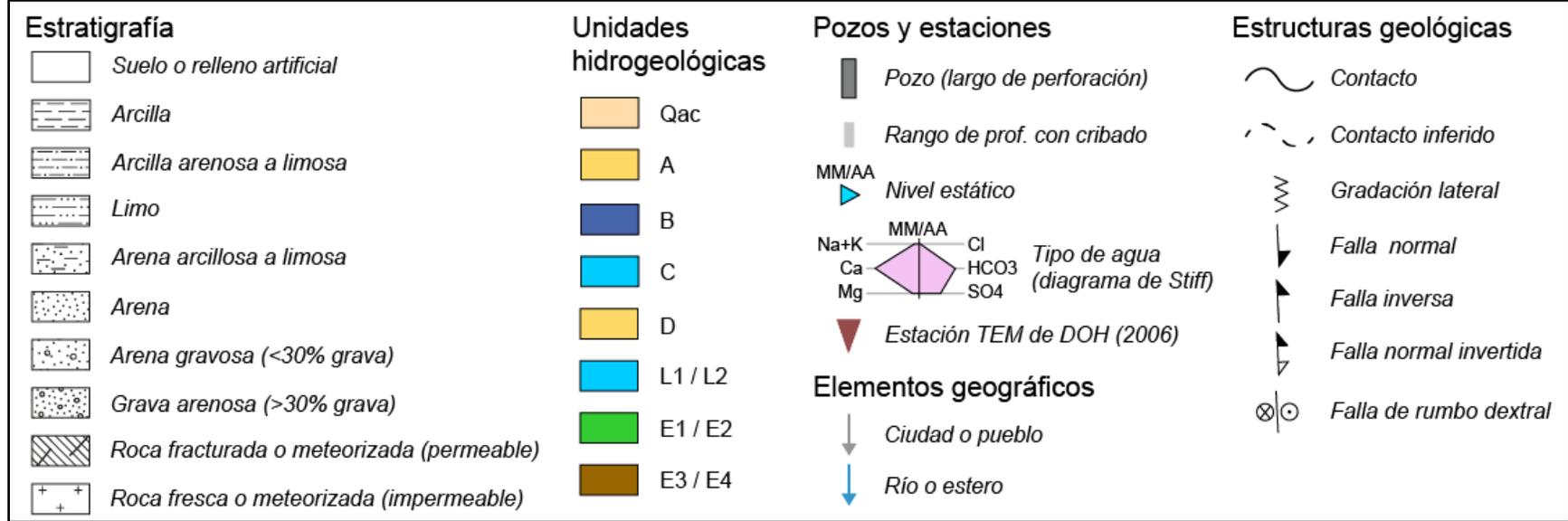
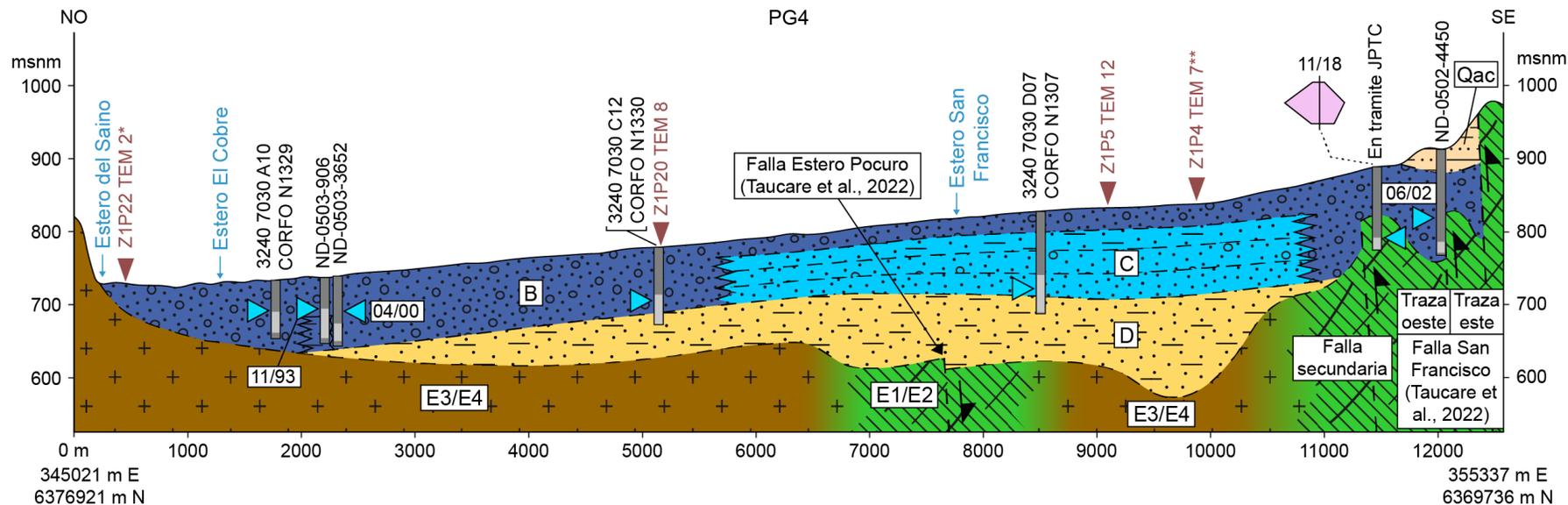


Figura 24. Perfil hidrogeológico general 4 (PG4) propuesto en la zona de estudio.

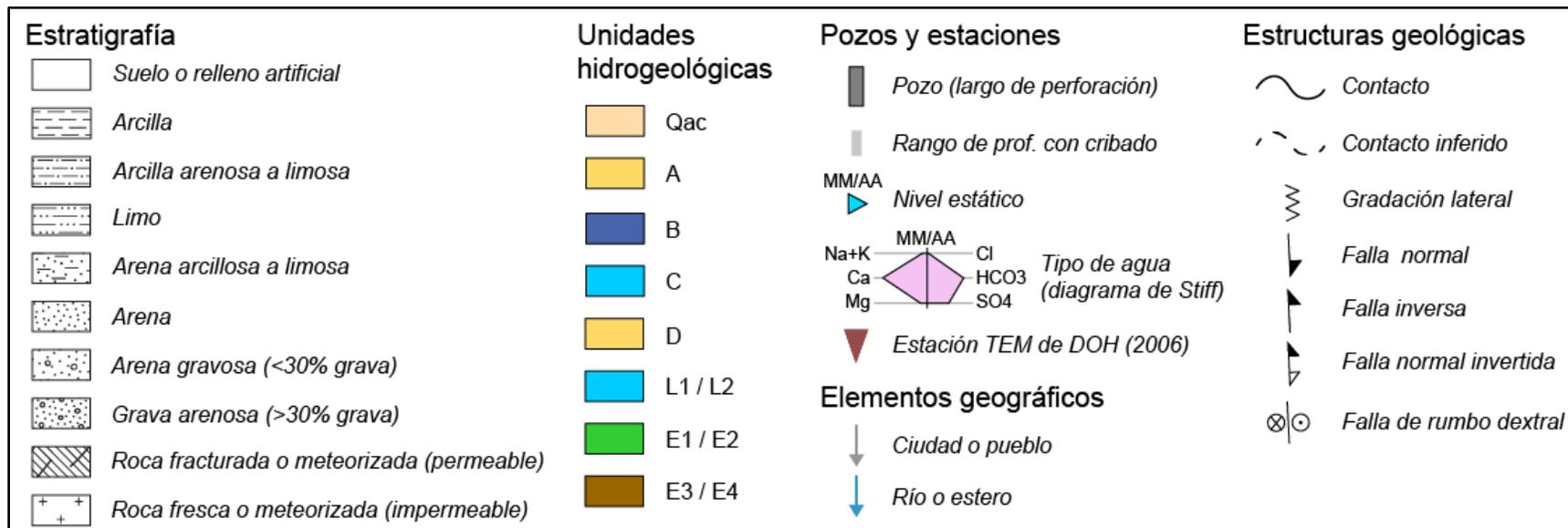
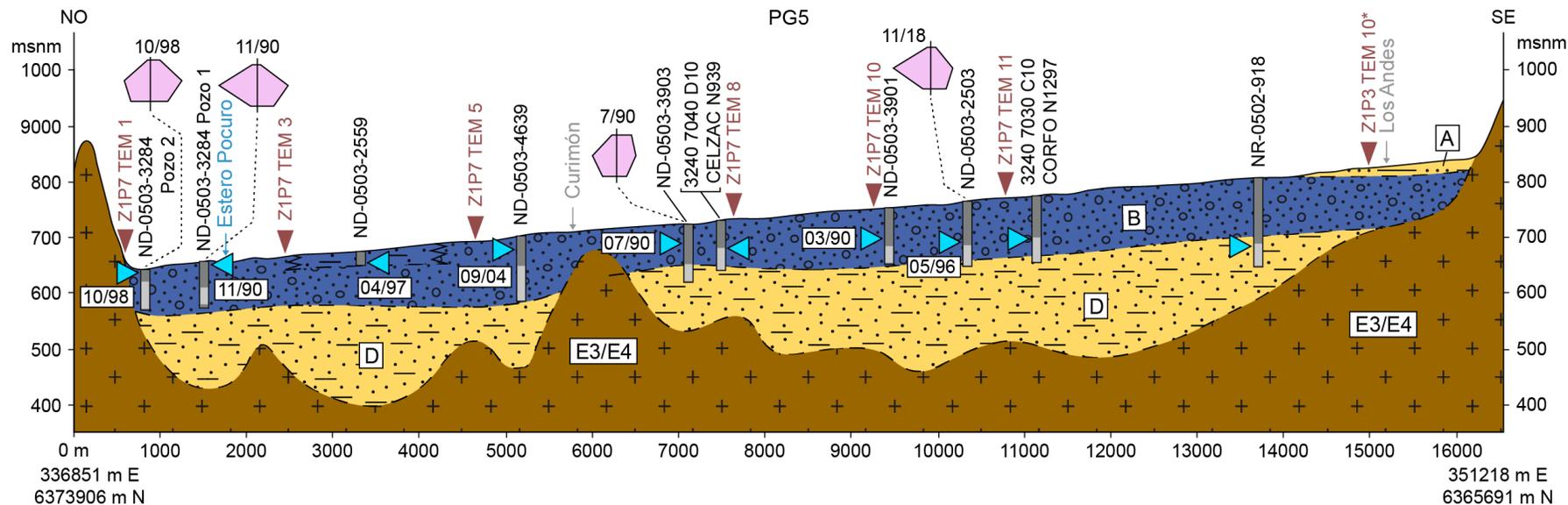


Figura 25. Perfil hidrogeológico general 5 (PG5) propuesto en la zona de estudio.

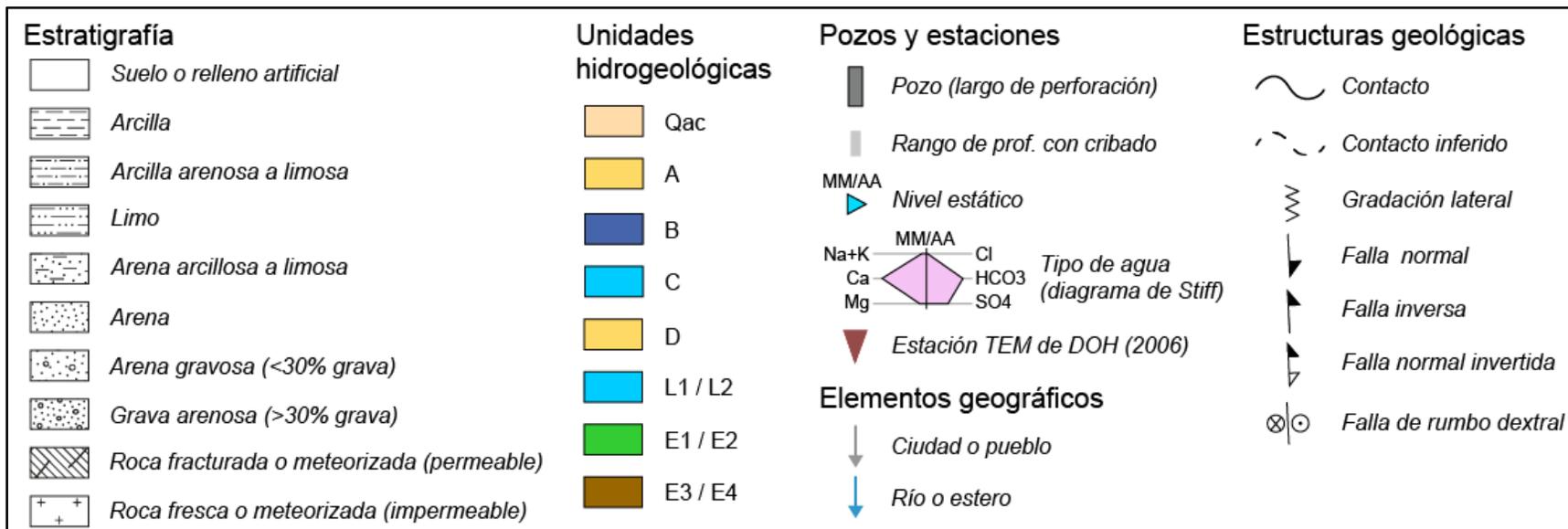
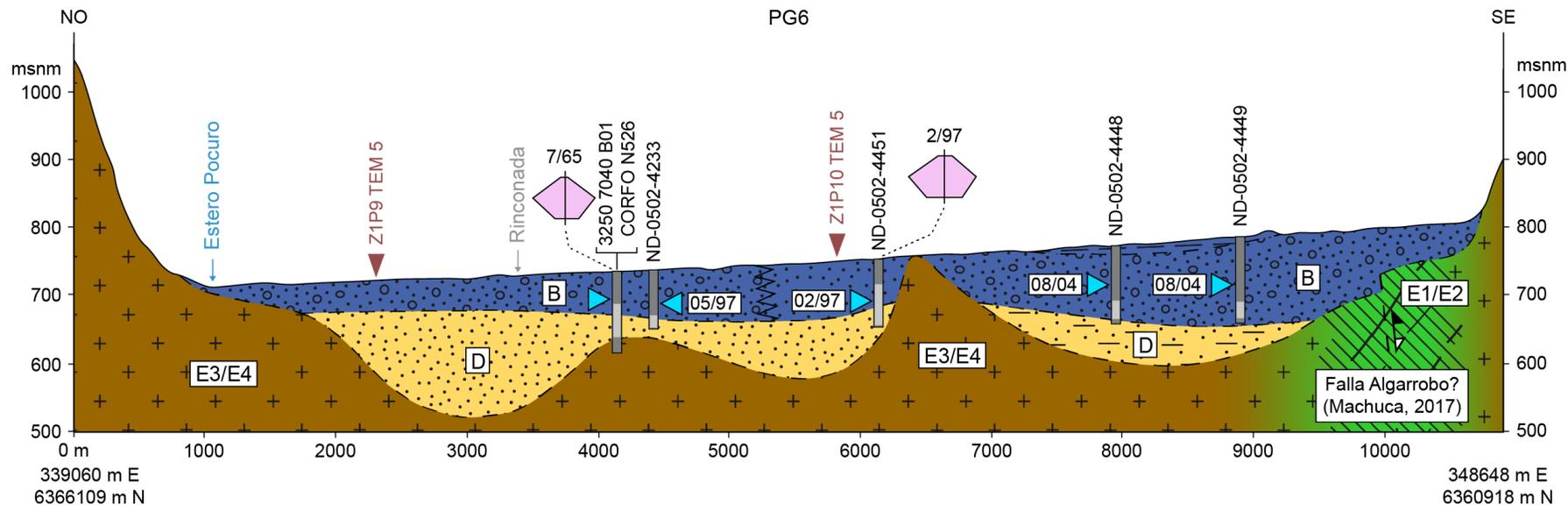


Figura 26. Perfil hidrogeológico general 6 (PG6) propuesto en la zona de estudio.

En los perfiles PG, las unidades hidrogeológicas E1 y E2 se observan principalmente cerca del margen oriental de la depresión, donde se concentran las estructuras de la ZFP. En el sector oriental de los perfiles PG2 (Figura 22), PG3 (Figura 23) y PG4 (Figura 24) se observan las fallas Estero Pocuro y San Francisco. De acuerdo a Taucare *et al.* (2022), la primera corresponde a una falla normal asociada a la fase extensional de la cuenca Abanico, mientras que la segunda es una falla inversa producida por la fase compresiva de la cuenca (aprovechando las zonas de debilidad de la ZFP). En el perfil PG6 (Figura 26) se observa la falla Algarrobo, la cual corresponde a una falla normal invertida durante la fase compresiva de la cuenca de Abanico (Machuca, 2017).

4.1.4.3 Perfiles locales (PL): aguas subterráneas en roca fracturada y en niveles permeables cerca del basamento

De la Figura 27 a la Figura 31 se muestran los cinco perfiles hidrogeológicos locales (PL) propuestos en la zona de estudio. Las coordenadas de cada perfil están expresadas en el sistema UTM, huso 19S, datum WGS84. De acuerdo a los registros estratigráficos (Figura 17), la mayoría de los pozos que presentan cribado en roca se encuentran en el margen suroriental y oriental de la depresión (P005, P008, P009, P010, P012, P029 y P079), en el dominio de la ZFP. El resto se ubica en el margen suroccidental (P024, P043 y P116), cerca de otras fallas con una dinámica similar u opuesta a la ZFP.

Los perfiles PL1 (Figura 27), PL2 (Figura 28) y PL3 (Figura 29) contienen la mayoría de los pozos que explotan aguas subterráneas en roca fracturada dentro de la zona de estudio. Consecuentemente, estos lugares definen los principales sitios de interés para el presente estudio. En estos perfiles, la roca fracturada probablemente está asociada a las estructuras geológicas cercanas descritas en la literatura: la Falla El Quisquerío (Machuca, 2017) y la ZFP en el perfil PL1 (Figura 27); la falla San Francisco (Taucare *et al.*, 2022) y una hipotética falla secundaria en el perfil PL2 (Figura 28); y la Falla Las Bandurrias (Machuca, 2017) en el perfil PL3 (Figura 29).

De acuerdo a la estratigrafía observada en los perfiles PL1, PL2 y PL3, no existen depósitos que impongan un aislamiento hidráulico entre la unidad hidrogeológica B y las unidades hidrogeológicas E1/E2. En efecto, en el perfil PL1 (Figura 27), las unidades hidrogeológicas B y E1/E2 se encuentran separadas solo parcialmente por la unidad hidrogeológica D; en el perfil PL2 (Figura 28), se encuentran en contacto directo; y en el perfil PL3 (Figura 29), la unidad hidrogeológica D presenta un espesor muy variable, prácticamente, desapareciendo en el sector oriental. Por estos motivos, se descarta que exista aislamiento hidráulico entre las unidades hidrogeológicas B y E1/E2.

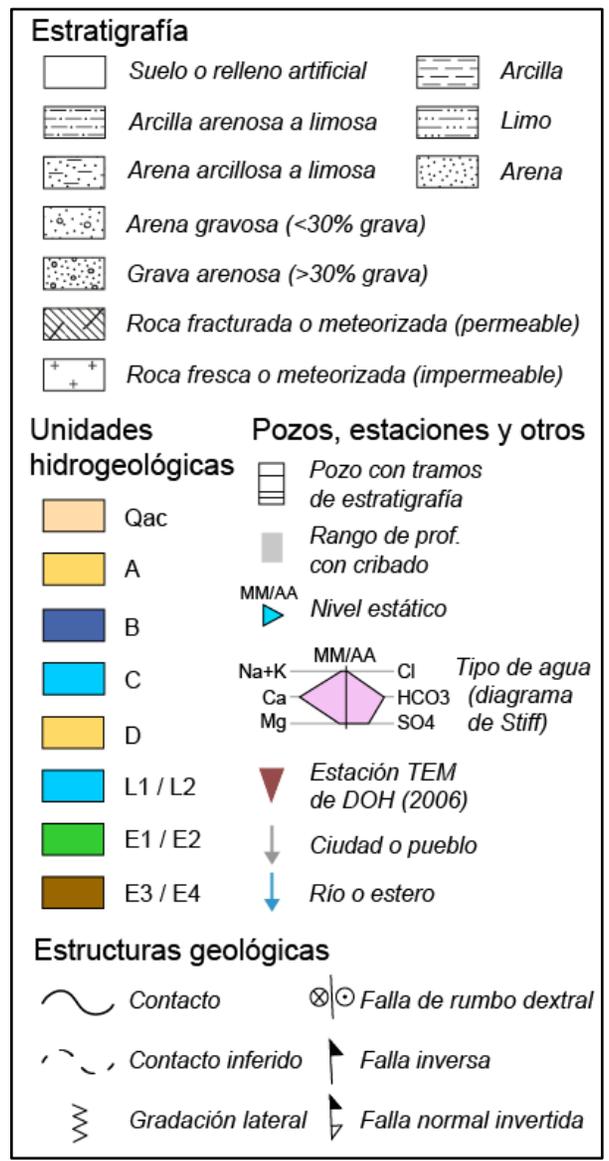
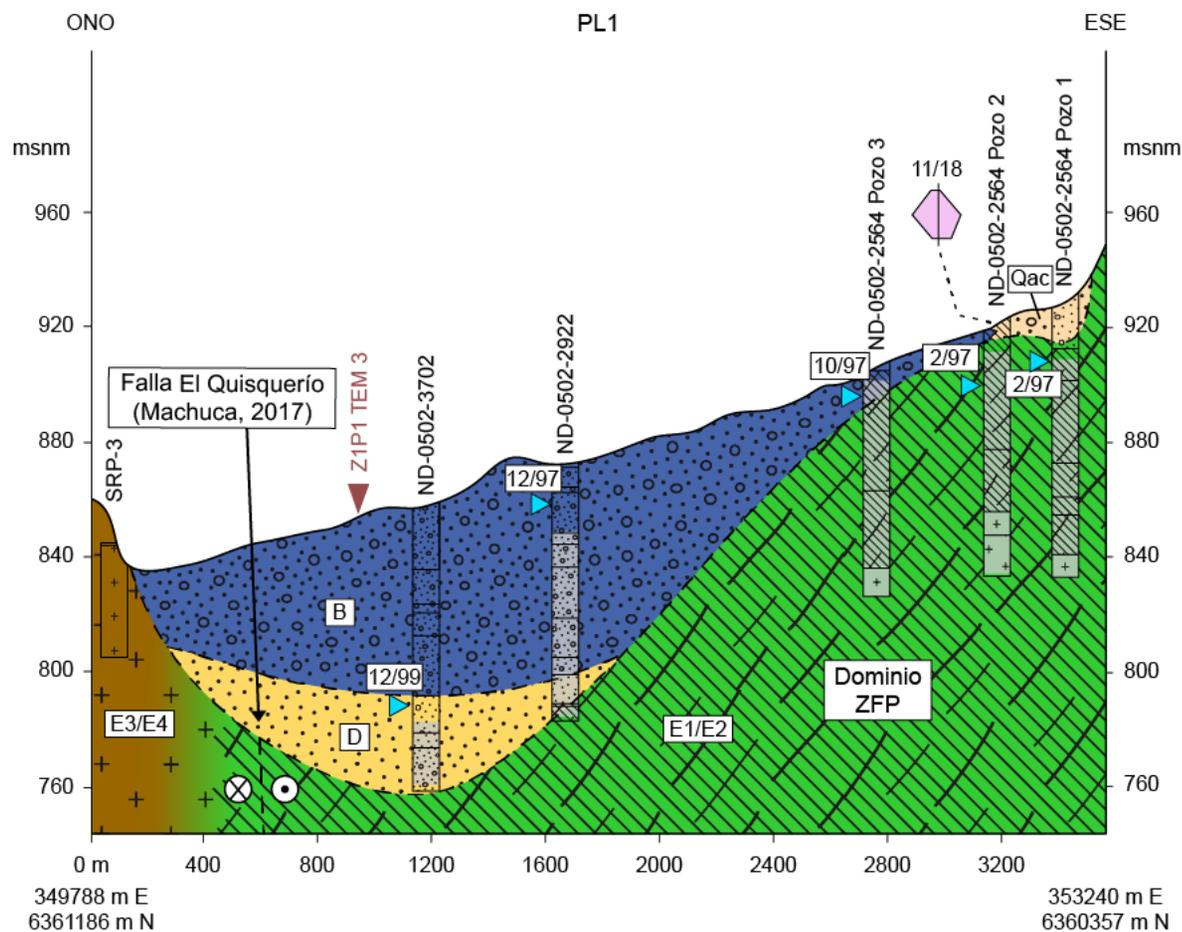


Figura 27. Perfil hidrogeológico local 1 (PL1) propuesto en la zona de estudio.

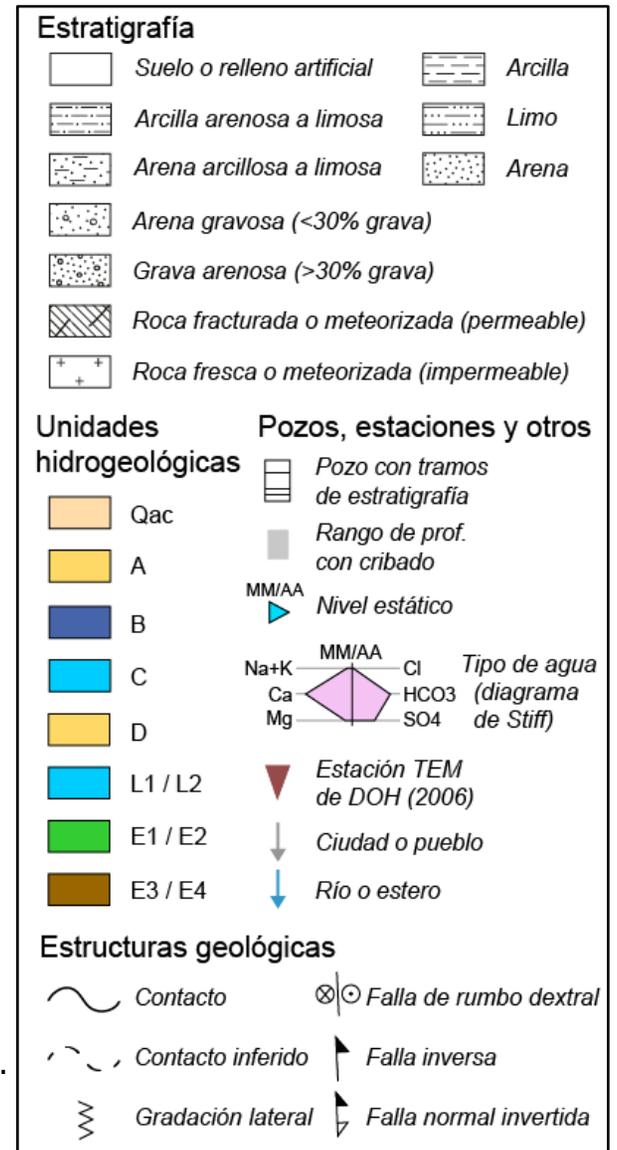
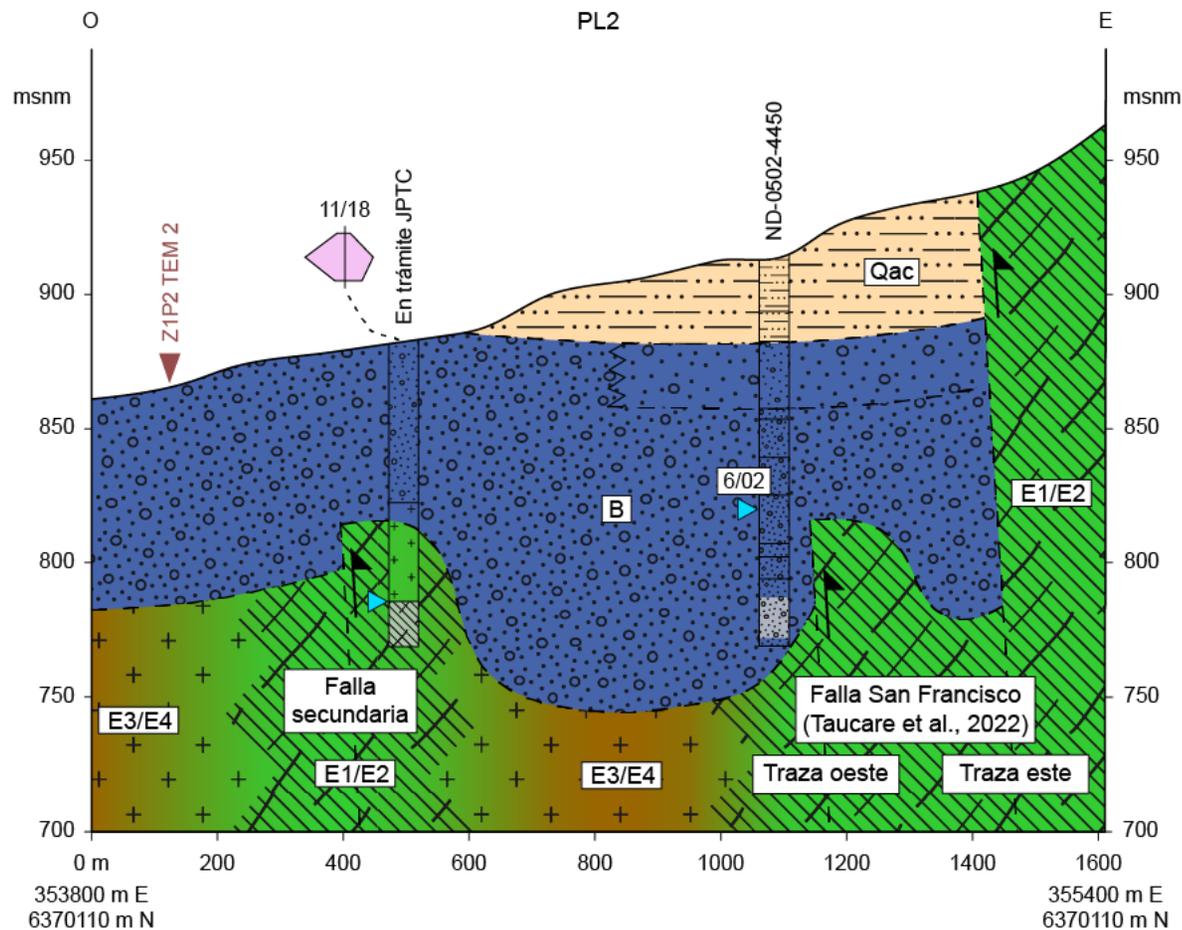


Figura 28. Perfil hidrogeológico local 2 (PL2) propuesto en la zona de estudio.

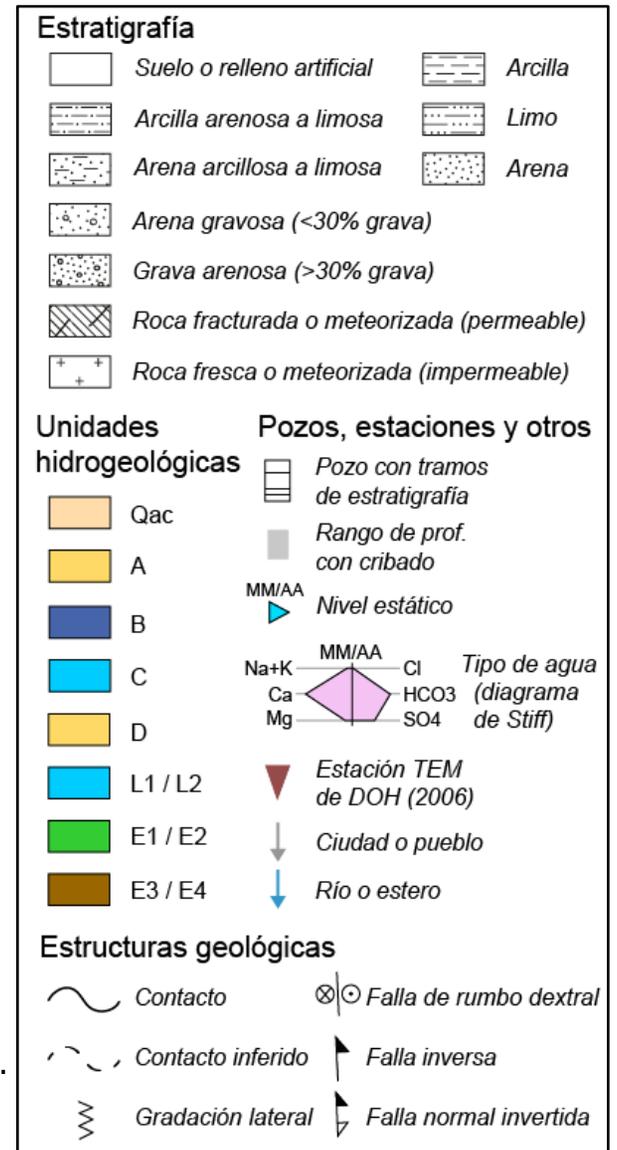
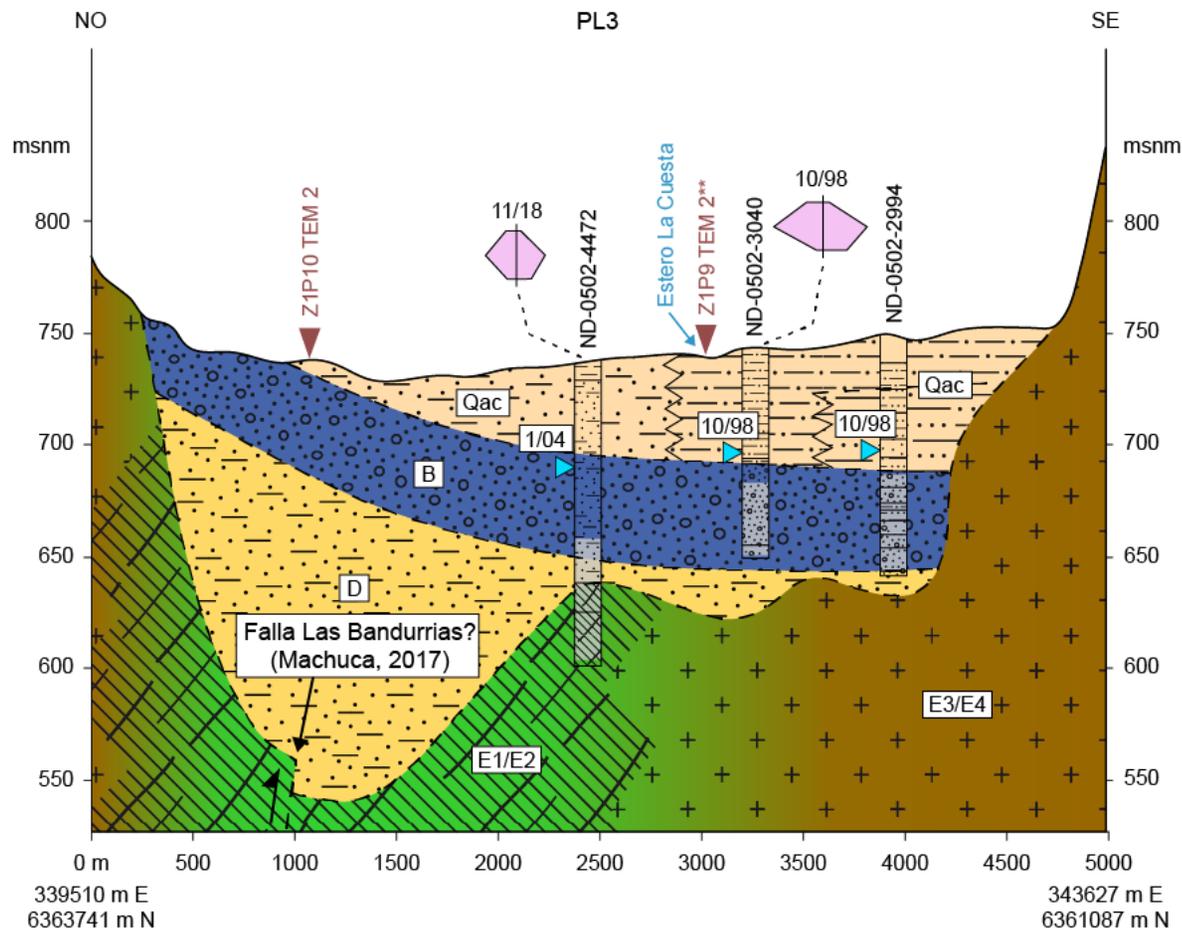


Figura 29. Perfil hidrogeológico local 3 (PL3) propuesto en la zona de estudio.

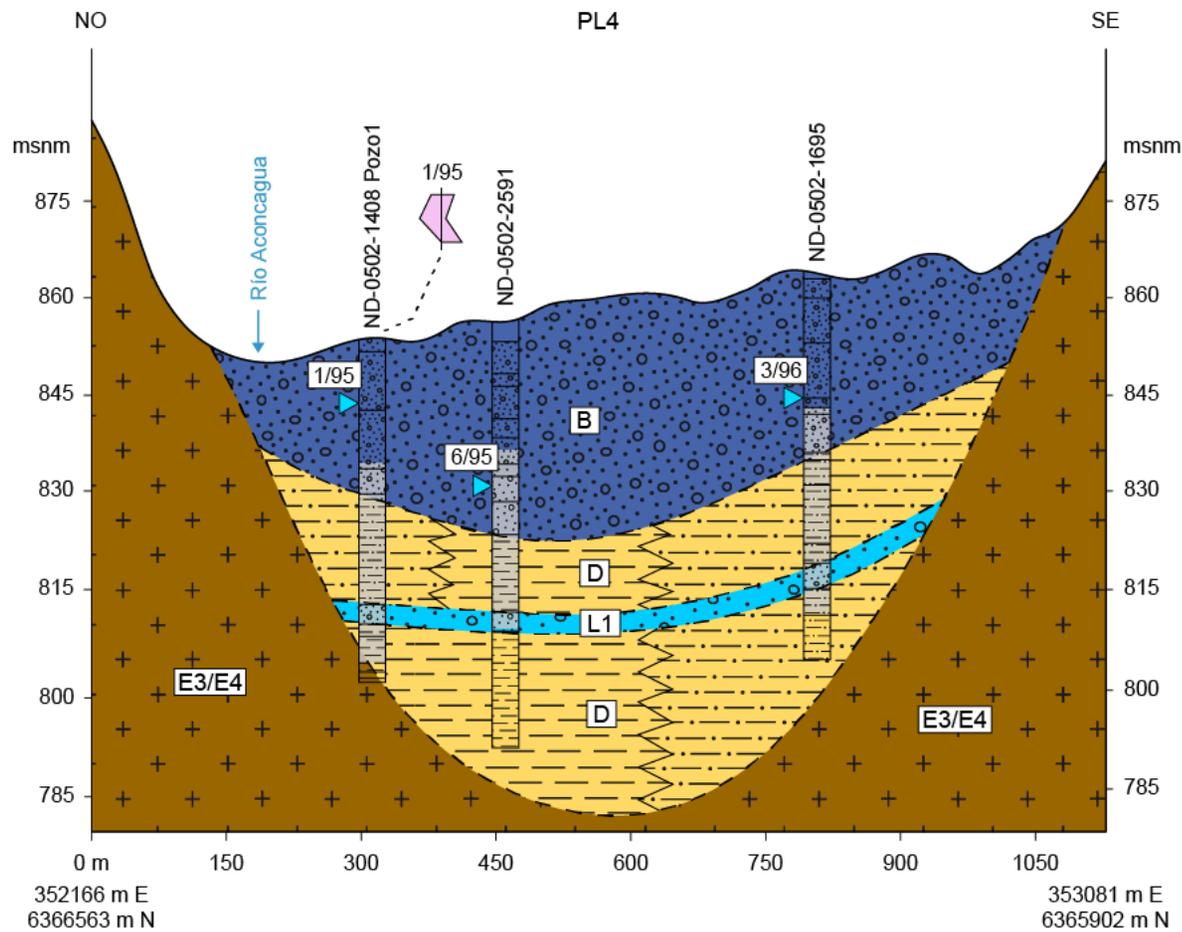
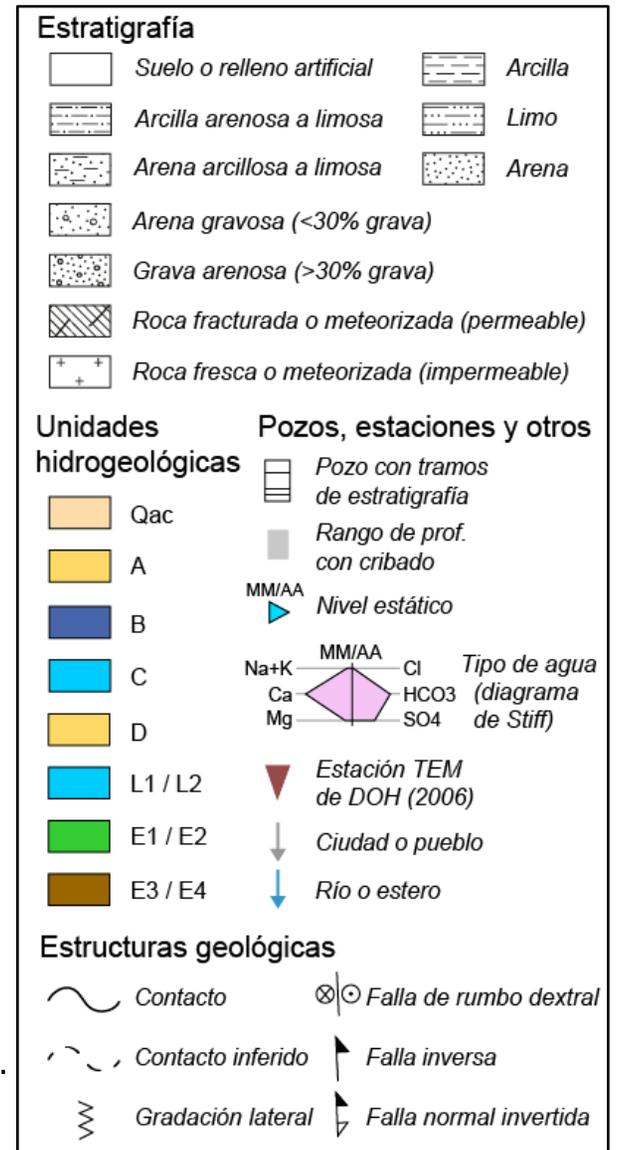


Figura 30. Perfil hidrogeológico local 4 (PL4) propuesto en la zona de estudio.



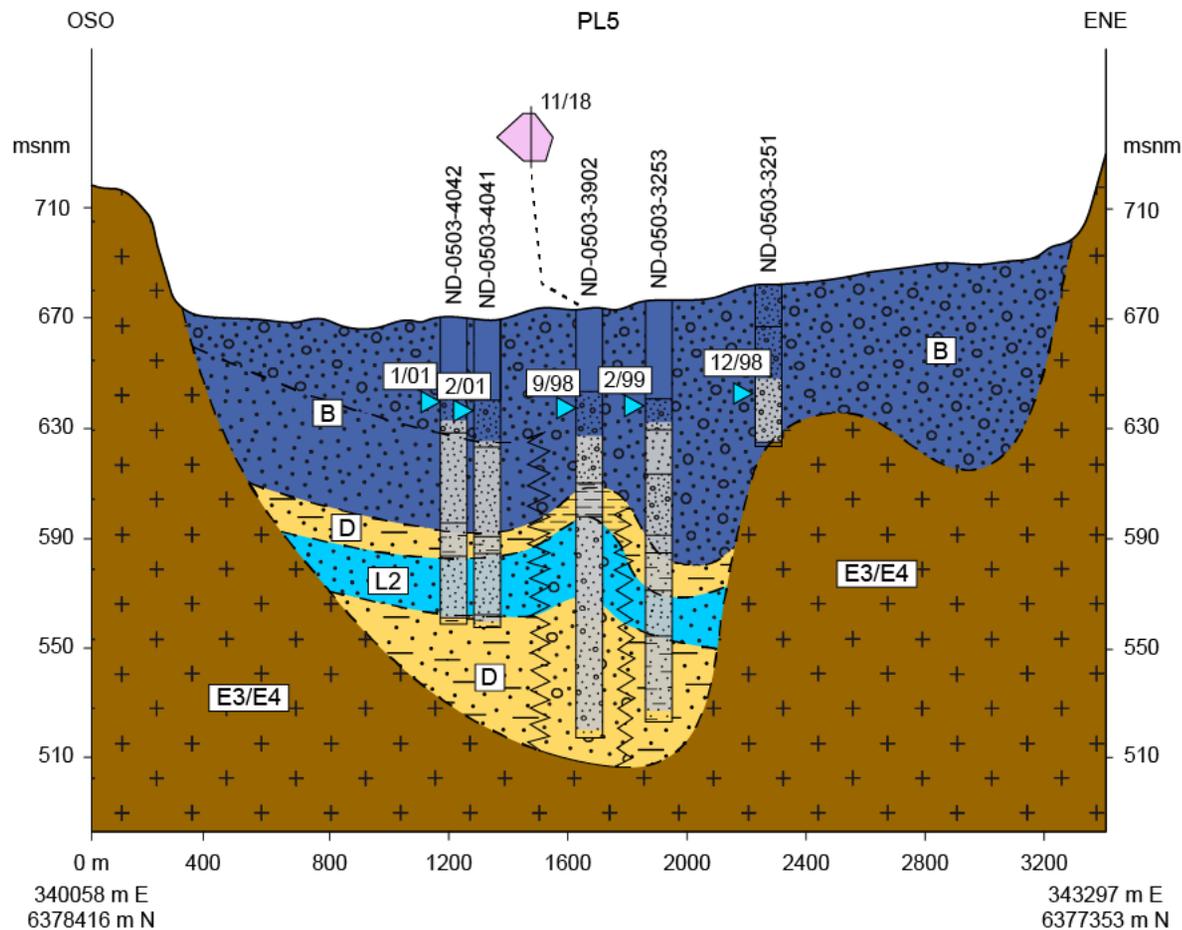


Figura 31. Perfil hidrogeológico local 5 (PL5) propuesto en la zona de estudio.

Los perfiles PL4 (Figura 30) y PL5 (Figura 31) representan dos sitios donde se reconocen niveles de alta permeabilidad (gravas y arenas con escaso contenido de finos) intercalados entre estratos de baja permeabilidad (depósitos con alto contenido de arcillas y limos) asignados a la unidad hidrogeológica D. Estos son los únicos sitios de potencial interés hallados para la exploración de acuíferos confinados en niveles sedimentarios cerca del basamento. Los niveles de alta permeabilidad antes mencionados fueron definidos como las unidades hidrogeológicas locales L1 (en el perfil PL4) y L2 (en el perfil PL5). La Figura 18 muestra el área aproximada en que aparecen estas unidades de acuerdo a los registros estratigráficos de los pozos.

En el perfil PL4 (Figura 30) se muestra la unidad hidrogeológica L1 en vista transversal. Esta aparece a 40-45 m de profundidad y posee unos 3-4 m de potencia, encontrándose separada de la unidad hidrogeológica B por una secuencia de 12-17 m de depósitos arcillosos (techo unidad hidrogeológica D). Dicha secuencia presenta una potencia no menor en comparación a la secuencia sedimentaria completa (70-80 m), por lo que L1 podría estar en condición de confinamiento. Sin embargo, dado que el cribado de los pozos no se encuentra restringido a las unidades B y L1, no es posible determinar si hay aislamiento hidráulico entre estas unidades. Para determinar esto se requieren pozos con el cribado restringido a cada unidad: si los niveles estáticos en los pozos que explotan la unidad hidrogeológica B coinciden con aquellos que explotan la unidad hidrogeológica L1, se deduciría que no hay aislamiento; en cambio, si existiera una diferencia importante, entonces los niveles estáticos de la unidad B corresponderían a niveles freáticos (acuífero libre) y los de la unidad L1 a niveles piezométricos (acuífero confinado). Por otro lado, no existen más pozos en el sector que evidencien la presencia de la unidad hidrogeológica L1 (Figura 32a), por lo que esta, probablemente, es de carácter local.

En el perfil PL5 (Figura 31), que corta las quebradas al noroeste de San Felipe (Figura 32b), se muestra la unidad hidrogeológica L2 en vista transversal. La unidad hidrogeológica L2 aparece a 80-100 m de profundidad y alcanza una potencia de 16-22 m. Esta se encuentra separada de la unidad hidrogeológica B por una secuencia de 6-20 m de arenas arcillosas asignada a la unidad hidrogeológica D. Esta misma tendencia se puede observar en el sector oriental del perfil PG1 (Figura 21), donde la unidad hidrogeológica L2 se muestra en vista longitudinal. Dado que el cribado de los pozos del perfil PL5 se encuentra instalado en todas las unidades hidrogeológicas (B, D y L2), no se puede determinar si la unidad hidrogeológica D impone un aislamiento hidráulico entre B y L2. Sin embargo, la secuencia de baja permeabilidad que sobreyace a L2 tiene muy baja potencia (6-20 m) en relación a la secuencia sedimentaria completa (~150 m), por lo que la condición de confinamiento es poco probable.

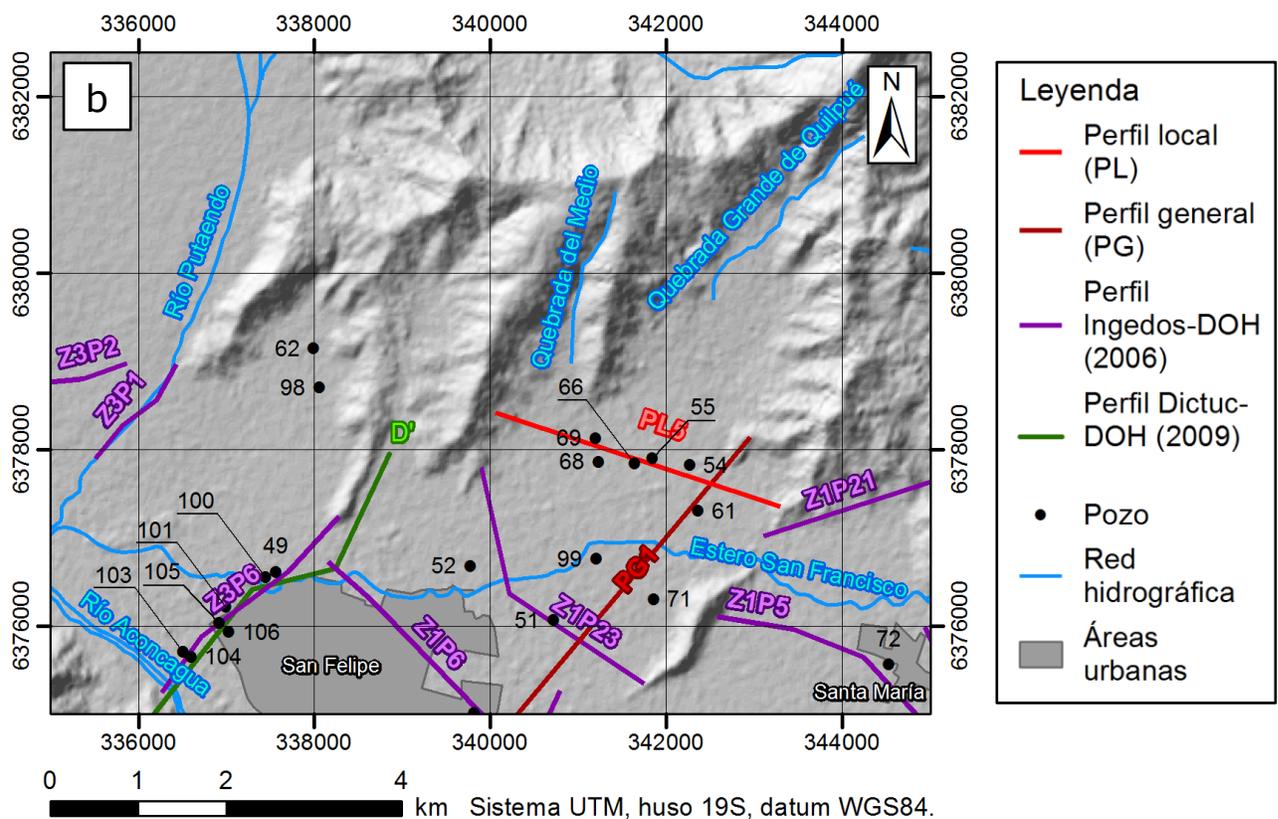
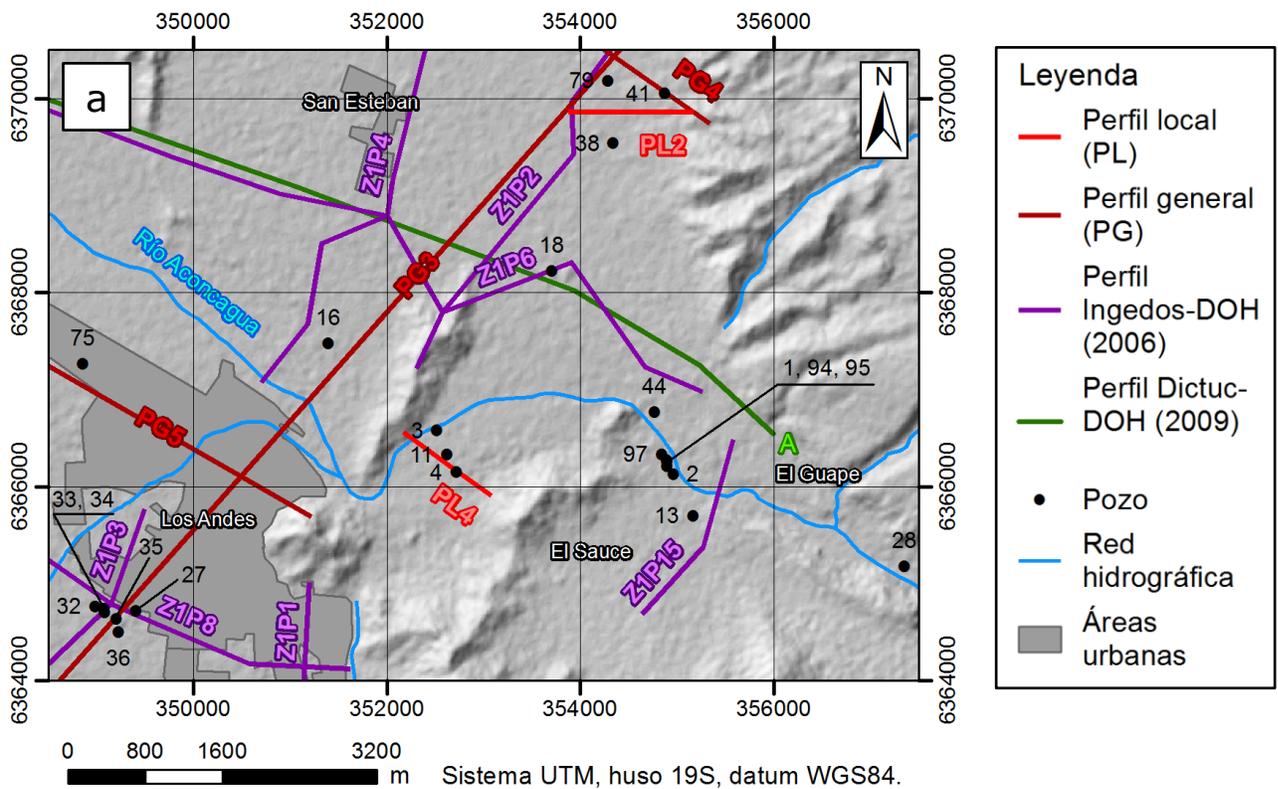


Figura 32. Pozos con estratigrafía y perfiles cerca de (a) PL4 y (b) PL5.

De acuerdo a la estratigrafía de los pozos de la zona, la unidad hidrogeológica L2 se restringiría a las quebradas al noreste de San Felipe, cerca del perfil PL5 (Figura 32b). En efecto, al desplazarse del perfil PL5 al perfil Z1P23 de la DOH (2006), la unidad hidrogeológica D disminuye su potencia a la mitad (de aproximadamente 100 m a 50 m) y no existen depósitos que puedan correlacionarse con la unidad hidrogeológica L2. Si se continúa aguas abajo por el estero San Francisco, se llega a los perfiles Z3P6 de la DOH (2006) y DD' de la DOH (2009) (Anexo E-4), donde la unidad hidrogeológica D aumenta su potencia a 200-300 m. En ese sector, los pozos P049 y P100 indican la presencia niveles permeables intercalados con los estratos de la unidad hidrogeológica D, pero estos no guardan relación con la unidad hidrogeológica L2. Esto pues no existen registros estratigráficos que indiquen alguna continuidad de la unidad hidrogeológica L2 hacia San Felipe.

4.2 Hidrogeoquímica

4.2.1 Características fisicoquímicas

De acuerdo a los registros de la base de datos hidrogeoquímica (Anexo F), las aguas subterráneas de la zona presentan un TSD entre 174-704 mg/l, una alcalinidad entre 30-273 mg/l de CaCO_3 y una dureza total que varía entre 32-517 mg/l de CaCO_3 . La temperatura de estas aguas varía entre 14,3-27,0 °C, presentando valores de CE entre 350-904 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y valores de pH entre 7,0-8,1. Esto último sugiere que el carbono inorgánico disuelto se encuentra, principalmente, en forma de bicarbonato.

Por otro lado, las aguas superficiales presentan un TSD entre 126-279 mg/l y una dureza total entre 74-154 mg/l de CaCO_3 , siendo ambos valores inferiores a los de las aguas subterráneas. La temperatura de estas aguas varía entre 8,6-19,2 °C, presentando valores de CE entre 170-377 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y valores de pH entre 7,1-8,0. Este rango de valores de pH es muy similar al de las aguas subterráneas, por lo que el carbono inorgánico disuelto en las aguas superficiales también se encuentra, principalmente, en forma de bicarbonato.

Los resultados de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos se han representado en la Figura 33 y en la Figura 34, donde se muestra la variabilidad de los datos mediante gráficos de caja y bigotes o "box plots", por su nombre en inglés. Estos gráficos indican el valor mínimo, primer cuartil, segundo cuartil, tercer cuartil y el valor máximo de cada conjunto de datos.

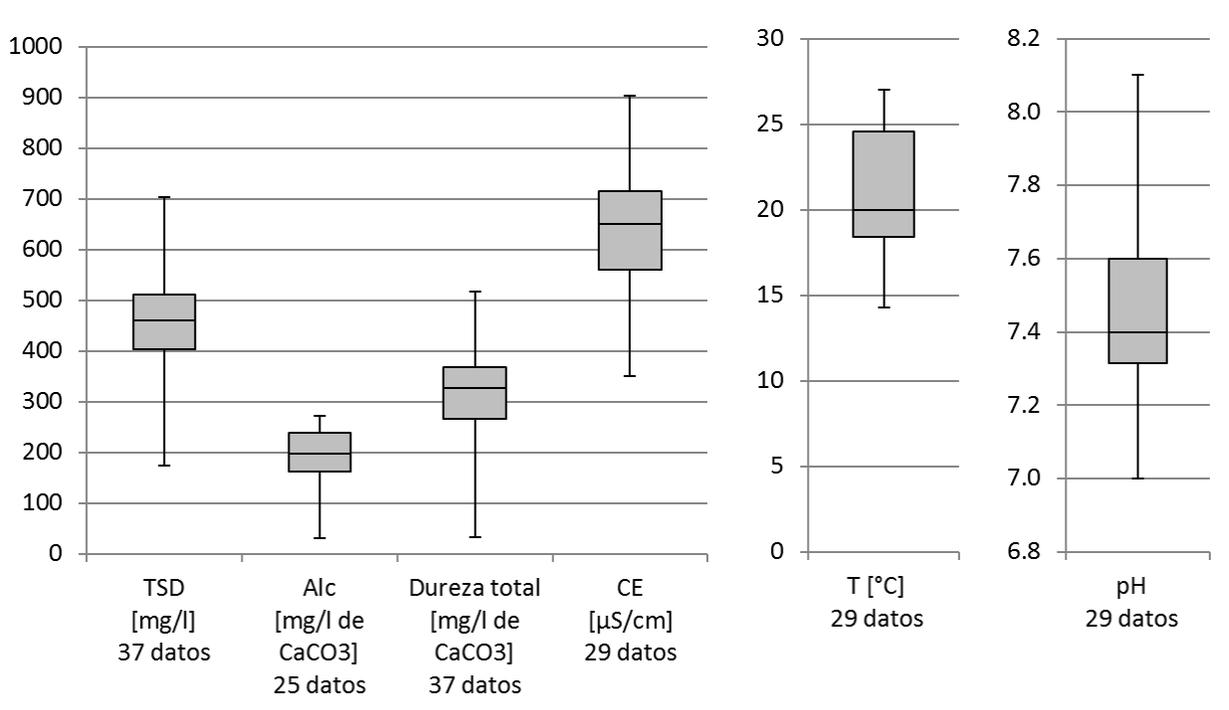


Figura 33. Gráficos de caja y bigotes (boxplots) de los parámetros fisicoquímicos medidos en las aguas subterráneas.

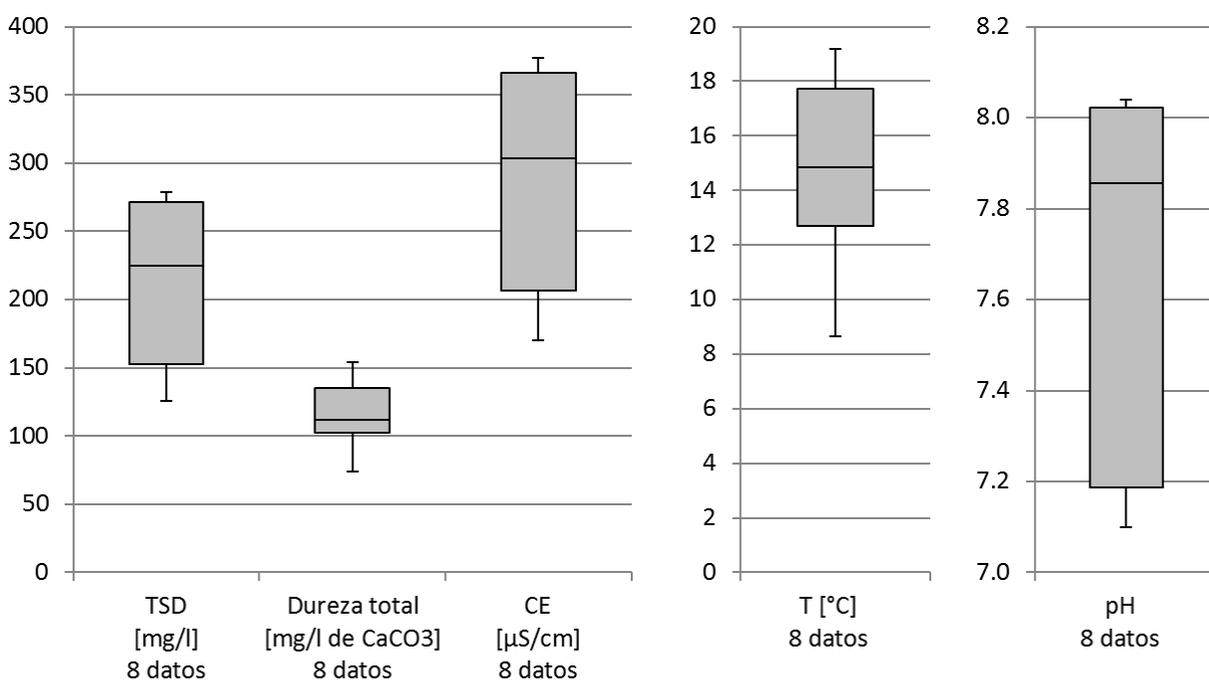


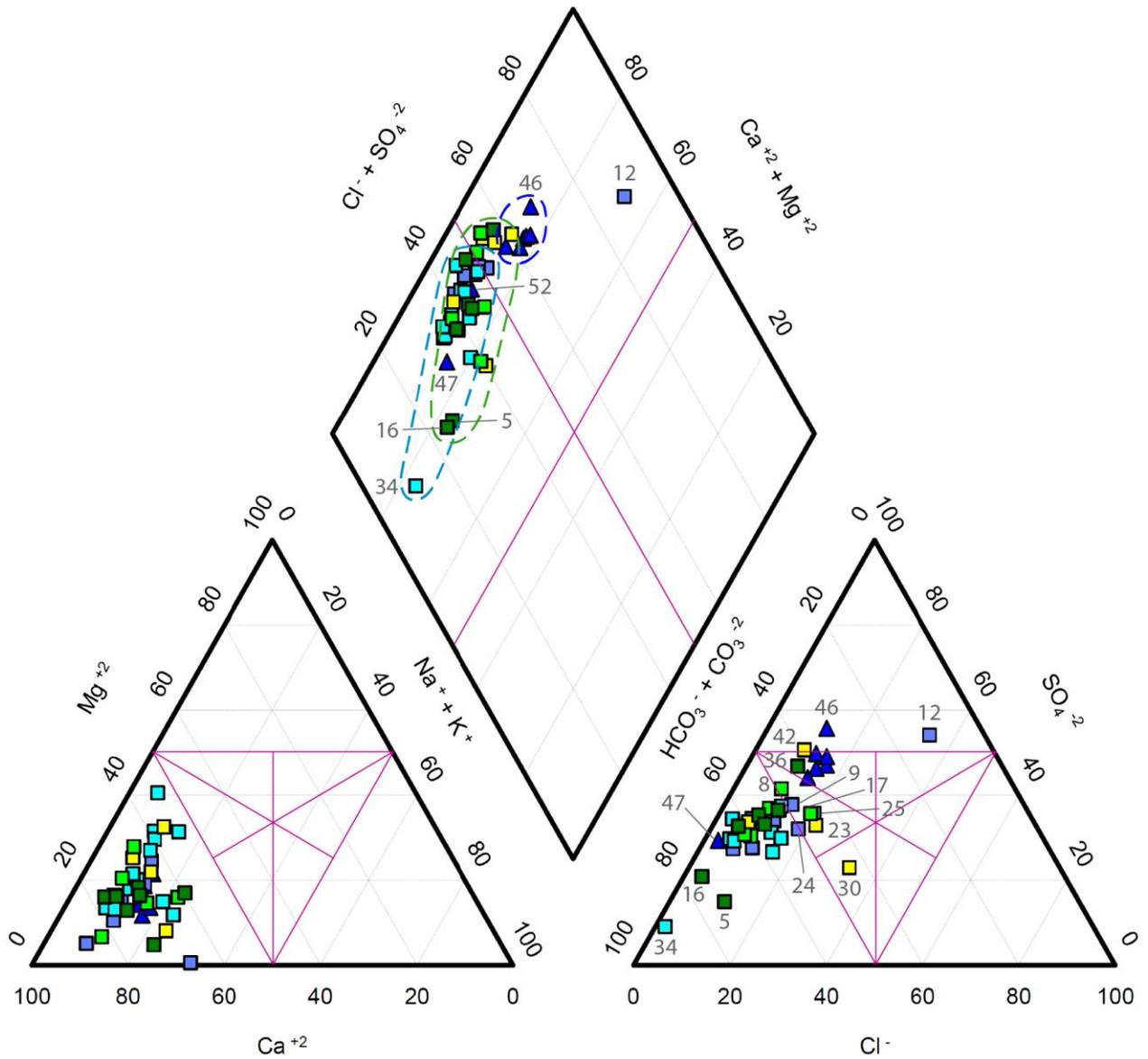
Figura 34. Gráficos de caja y bigotes (boxplots) de los parámetros fisicoquímicos medidos en las aguas superficiales.

4.2.2 Clasificación de las aguas

Para determinar los tipos de aguas analizadas se elaboró un *diagrama de Piper* con las 45 mediciones de la base de datos hidrogeoquímica validadas mediante balance iónico. La Figura 35 muestra el diagrama creado, donde se observa que las aguas subterráneas de la zona son principalmente de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, mientras que las aguas superficiales son mayoritariamente de tipo $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$. En la Figura 35 también se observan aguas subterráneas de tipo $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ (n°8, n°9, n°17, n°23, n°24 y n°25), $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ (n°36), $\text{SO}_4\text{-Ca}$ (n°12 y n°42) y $\text{HCO}_3\text{-Cl-Ca}$ (n°30), representando menos de un tercio ($\sim 27\%$) del total de muestras de aguas subterráneas. Por otro lado, entre las ocho muestras de agua superficial se observa una de tipo sulfatado cálcico (n°46) y dos de tipo bicarbonatado cálcico (n°47 y n°52).

En la Figura 35 los datos fueron clasificados en colores según el rango de profundidad del cribado de cada pozo. Lo anterior para evaluar si existen diferencias o alguna tendencia en la química de las muestras tomadas a distinta profundidad. Como resultado, se observa una tendencia a un leve cambio en las proporciones de las muestras, donde las muestras más profundas (área 3 del gráfico) tienden a posicionarse más arriba a la derecha en el diagrama central en comparación a las muestras más someras (área 2 del gráfico), aunque ambas áreas se encuentran en buena parte superpuestas. Esto podría tener relación con la presencia de diferentes flujos (locales o intermedios) y la influencia de los ríos (que recargan el acuífero). No se hallaron otras diferencias químicas significativas entre las distintas categorías analizadas, salvo el contraste entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales (área 1 del gráfico), el cual ya fue señalado en el párrafo anterior.

Para conocer la distribución espacial de los tipos de agua en la zona de estudio, se proyectaron en un mapa los *diagramas de Stiff* georeferenciados (Figura 36), representando 1 meq (en el eje de cada diagrama) como 300 m del mapa. En la Figura 36 se observa que las aguas subterráneas de tipo bicarbonatado cálcico se distribuyen de forma homogénea en la depresión, mientras que las de tipo mixto y sulfatado cálcico tienden a estar más cerca del río Aconcagua. En estos dos últimos grupos destacan las muestras n°12 y n°30, las cuales tienen la mayor proporción de cloruro (33-35%) en el diagrama de Piper (Figura 35). Lo anterior podría ser consecuencia del uso de fertilizantes empleados para controlar las deficiencias de los cultivos e incentivar su crecimiento (e. g. cloruros de calcio, potasio y magnesio utilizados en el cultivo de la vid) (Espíndola & Pugliese, 2015). Tal es el caso de la muestra n°30, la cual fue tomada en un pozo perteneciente a una agrícola dedicada al cultivo de uvas (entre otras frutas).



Rango de profundidad del cribado (Tabla 8):

- | | | |
|----------------------------------|-----|------------|
| ▲ Muestras de agua superficial | } { | --- Área 1 |
| ■ Somero (0-60 m) | | --- Área 2 |
| ■ Somero-intermedio (0-100 m) | | --- Área 3 |
| ■ Intermedio (55-100 m) | } { | |
| ■ Intermedio-profundo (50-150 m) | | |
| ■ Profundo (> 80 m) | | |

Figura 35. Diagrama de Piper con la química de las aguas subterráneas y las aguas superficiales muestreadas en la zona de estudio.

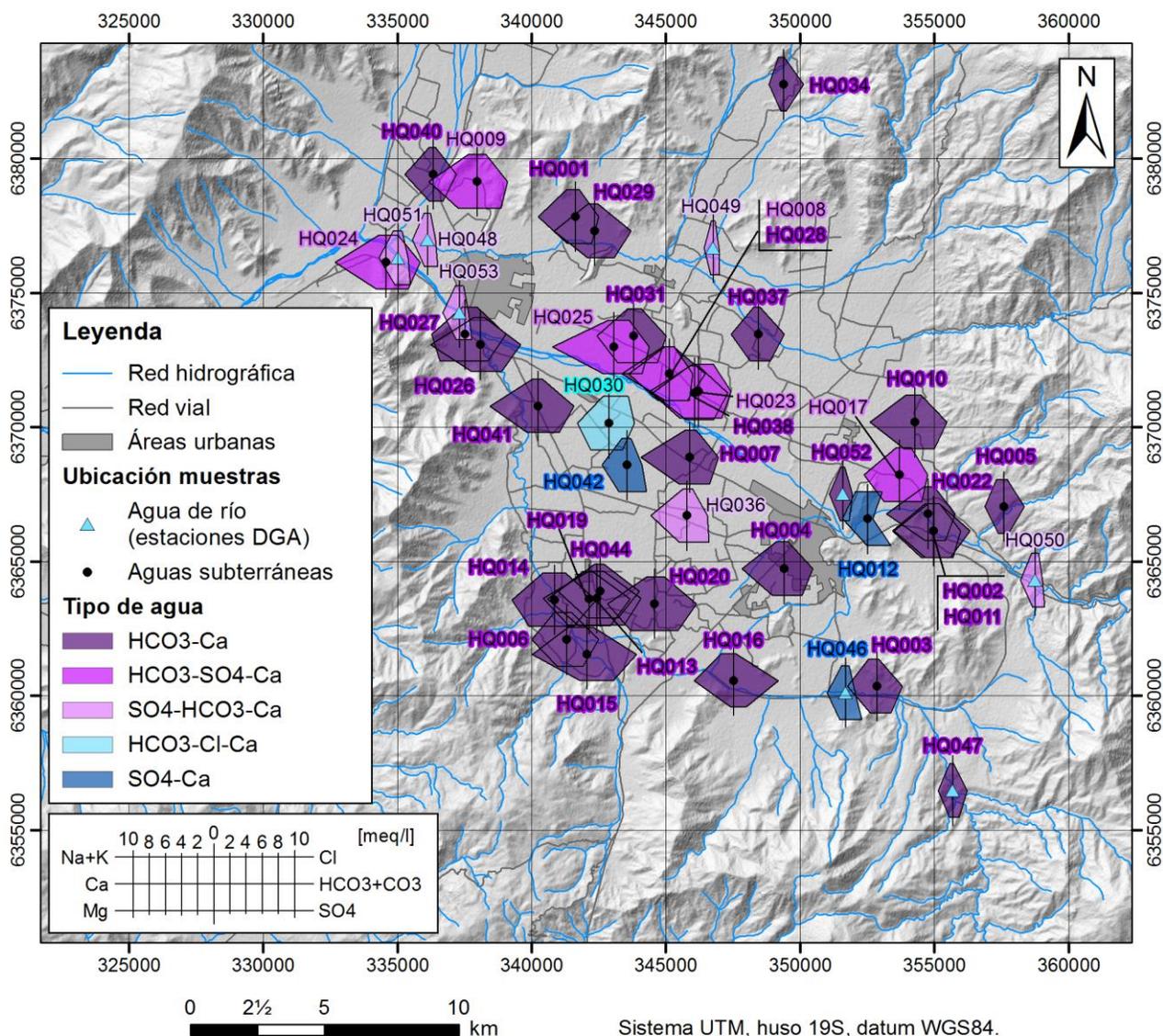


Figura 36. Diagramas de Stiff de las aguas subterráneas y las aguas superficiales muestreadas en la zona de estudio.

Entre las muestras de aguas subterráneas de tipo bicarbonatado cálcico destacan la n°34, n°5 y n°16, las cuales poseen las mayores proporciones de bicarbonato en el diagrama de Piper (Figura 35). Las dos primeras presentan menor mineralización debido a su mayor cercanía con las zonas de recarga: la muestra n°34 se ubica en la cabecera del valle de Jahuel y la muestra n°5 se ubica en la parte alta de una terraza fluvial ubicada al noreste de El Guape (6-7 km al este de Los Andes). La muestra n°16, ubicada en el margen sur de la depresión en torno al estero Pocuro, muestra cierto contraste con las muestras tomadas al oeste (aguas abajo del estero): estas exhiben un mayor contenido porcentual de sulfato, el cual podría estar asociado a la intensa actividad agrícola de la zona.

El Anexo L contiene un segundo mapa que muestra los diagramas de Stiff de las estaciones DGA (muestras n°46 a n°53) con un tamaño mayor, representando 1 meq (en el eje de cada diagrama) como 3 km del mapa. En este mapa se observa que las aguas del río Aconcagua y el estero San Francisco son de tipo $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ (salvo la muestra n°52, de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$). Las aguas del estero Pocuro, por su parte, cambian de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, en la Cordillera Principal (muestra n°47), a $\text{SO}_4\text{-Ca}$, en el margen sureste de la depresión (muestra n°46). Este contraste podría deberse a los diferentes años de medición o a la gran actividad agrícola que enfrenta el estero al pasar del sector cordillerano a la depresión (esto se traduciría en una mayor contaminación de las aguas y un gran aporte de sulfatos).

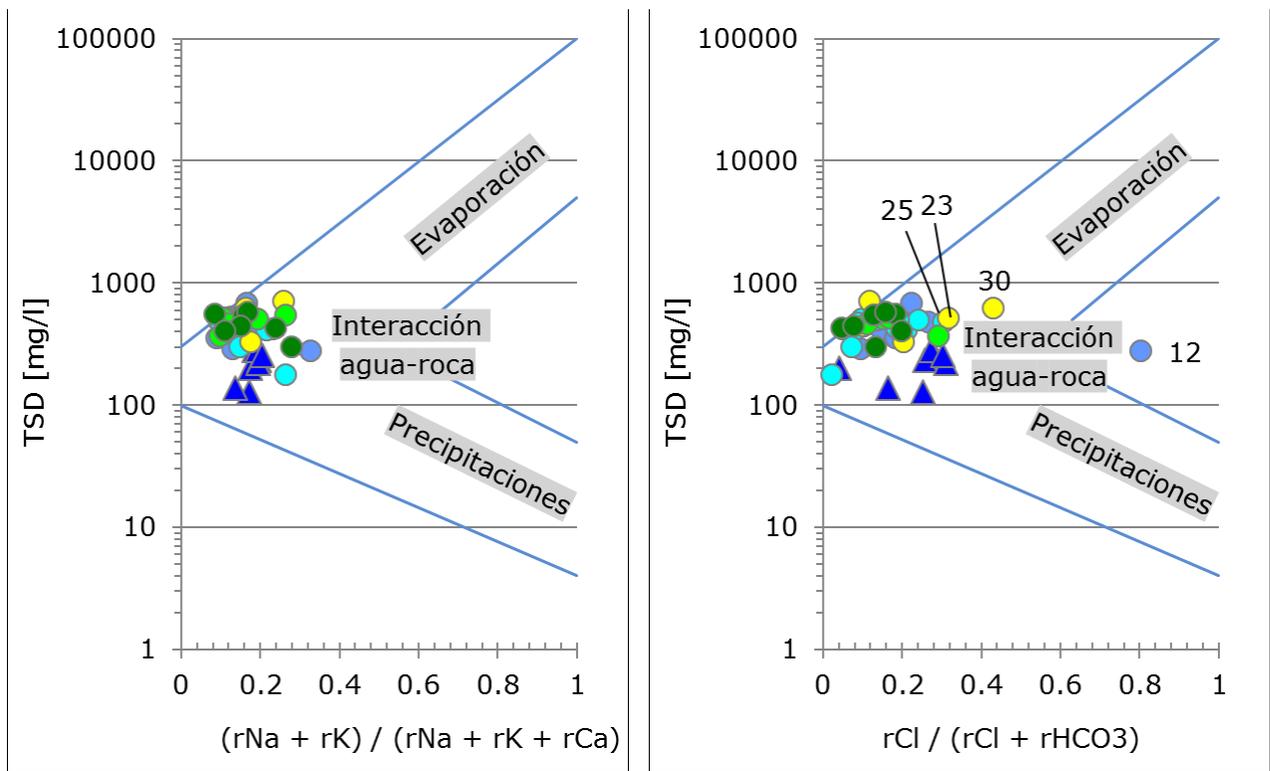
4.2.3 Procesos que controlan la química de las aguas

Para determinar el tipo de procesos que controlan la química de las aguas en la zona de estudio se elaboró un diagrama de Gibbs (Figura 37). En este gráfico se observa que el mecanismo que predomina es la interacción entre el agua y las litologías de la cuenca, involucrando procesos tales como la disolución, hidrólisis e intercambio iónico. Más adelante se analizan los posibles procesos que influyen la composición de las aguas muestreadas.

En la Figura 37 destacan las muestras de agua superficial, las cuales tienden a posicionarse más cerca del dominio de las precipitaciones en comparación a las muestras que proceden de los pozos. Destaca también la muestra n°12, posicionada a la derecha del diagrama de aniones, muy alejada del resto. En este pozo se midió una concentración muy baja de bicarbonato (26,8 mg/l) en comparación con las demás muestras de la zona (113-375 mg/l). También destacan las muestras n°23, n°25 y n°30, las cuales se desplazan hacia el campo de la evaporación debido a que, junto a la muestra n°12, poseen la concentración más alta de cloruro (64-84 mg/l) de todas las muestras analizadas.

4.2.4 Matriz de correlación

Para analizar el grado de relación existente entre los parámetros de la base de datos hidrogeoquímica se elaboró una matriz de correlación calculando los coeficientes de Spearman. La Tabla 10 muestra el coeficiente de correlación (r) obtenido para cada combinación de parámetros considerando solo las muestras de aguas subterráneas. En la matriz se observan tres correlaciones moderadas: el pH con la temperatura ($r = 0,66$), siendo esta la única correlación positiva del pH; el Ca con el HCO_3 ($r = 0,67$); y el Cl con el SO_4 ($r = 0,69$). También destaca la correlación entre el Ca y el SO_4 , la cual alcanza un valor de $r = 0,59$. Las correlaciones moderadas halladas entre los iones son analizadas más adelante en diagramas binarios.



Leyenda	Rango de profundidad del cribado	
	▲ Agua de río (estaciones DGA)	● 55-100 m
● 0-100 m	● 50-150 m	● > 80 m

Figura 37. Diagrama de Gibbs de las aguas de Los Andes-San Felipe.

Tabla 10. Matriz de correlación de los principales parámetros de la base de datos hidrogeoquímica (considerando solo aguas subterráneas).

	pH	T	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO3	SO4	NO3
pH	1,00									
T	0,66	1,00								
Ca	-0,27	-0,10	1,00							
Mg	-0,38	-0,21	0,36	1,00						
Na	-0,22	0,01	0,20	-0,03	1,00					
K	-0,07	-0,08	0,38	0,13	-0,15	1,00				
Cl	-0,05	0,24	0,39	0,55	0,06	0,14	1,00			
HCO3	-0,03	0,19	0,67	0,38	0,34	0,10	0,18	1,00		
SO4	-0,20	0,14	0,59	0,48	0,05	0,30	0,69	0,35	1,00	
NO3	-0,20	-0,55	0,02	0,16	-0,12	0,22	-0,10	-0,36	-0,03	1,00

■ 0,8 ≤ r ≤ 1,0
 ■ 0,7 ≤ r < 0,8

■ 0,6 ≤ r < 0,7
 ■ 0,5 ≤ r < 0,6

En el caso del pH y la T, la correlación es moderada y positiva ($r = 0,66$) debido a que al aumentar la temperatura, aumenta la energía cinética y las moléculas tienden a separarse con mayor facilidad. Esto provoca que los ácidos liberen más iones hidrógeno (H^+) y que las bases liberen más iones hidróxido (OH^-), lo que se traduce en que las aguas ácidas tienden a volverse más ácidas (correlación negativa entre T y pH) y las aguas básicas tienden a volverse más básicas (correlación positiva entre T y pH) (e. g. Lotfinasabasl *et al.*, 2013). Este último sería el caso de las aguas subterráneas de la zona de estudio, las cuales poseen valores de pH entre 7,0-8,1.

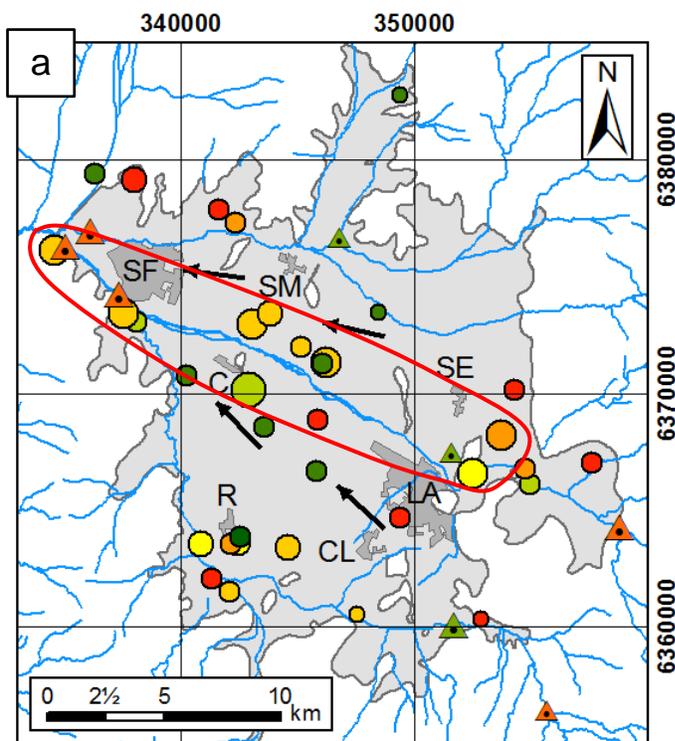
En la discusión se analiza en más detalle la influencia de los procesos de interacción agua-roca. En concreto, se evalúa si la disolución de carbonatos, la disolución de sulfatos o la meteorización de silicatos tienen alguna influencia sobre la composición de las aguas subterráneas y superficiales de la zona de estudio.

4.2.5 Mapas de distribución

Al analizar la distribución espacial de valores de los parámetros de la base de datos hidrogeoquímica, se observan ciertas particularidades en los mapas del Cl y NO_3 (Figura 38). A continuación se detallan las principales observaciones realizadas a partir de ambos mapas.

En el caso del Cl (Figura 38a), las mayores concentraciones (50-90 mg/l) se dan en pozos situados a menos de 2 km del río Aconcagua: en ningún otro sector de la depresión se alcanzan valores tan altos. Esto podría ser producto de un bombeo intenso en los pozos profundos cercanos al río Aconcagua, lo que provocaría un incremento de la salinidad de las aguas explotadas en torno al río.

En el caso del NO_3 (Figura 38b), las muestras de aguas subterráneas con concentración sobre los 10 mg/l se ubican, en su mayoría, a menos de 3 km del río Aconcagua. Por otro lado, destacan dos pozos al norte y noreste de San Felipe, cerca del margen de la depresión, donde las aguas subterráneas muestreadas alcanzan una concentración superior a 30 mg/l de NO_3 (una incluso supera los 50 mg/l). Esto probablemente esté asociado a la intensa actividad agrícola que existe en torno a los puntos de muestreo.



Leyenda

- Muestra de pozo
- △ Muestra superficial
- Red hidrográfica
- Dirección del flujo subterráneo
- Áreas urbanas

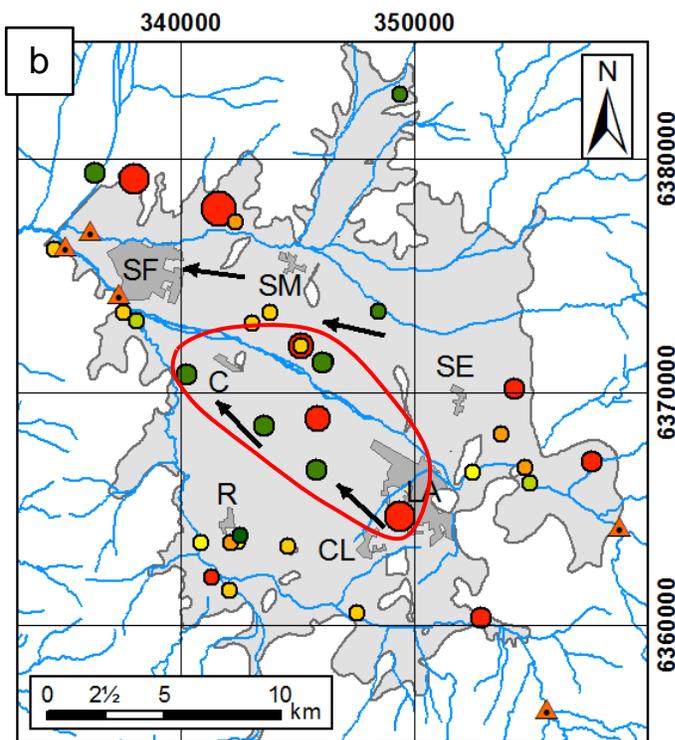
Período de medición

- 1965
- 1967-1969
- 1981-1983
- 1989-1990
- 1995-1996
- 1997-1998
- 1999-2002
- 2006
- 2018

Cl [mg/l]

- △ 0 - 10
- △ 10 - 30
- △ 30 - 50
- △ 50 - 70
- △ 70 - 90

Sistema UTM, huso 19S, datum WGS84.



Leyenda

- Muestra de pozo
- △ Muestra superficial
- Red hidrográfica
- Dirección del flujo subterráneo
- Áreas urbanas

Período de medición

- 1965
- 1967-1969
- 1981-1983
- 1989-1990
- 1995-1996
- 1997-1998
- 1999-2002
- 2006
- 2018

NO3 [mg/l]

- △ 0 - 10
- △ 10 - 20
- △ 20 - 30
- △ 30 - 50
- △ 50 - 60

Sistema UTM, huso 19S, datum WGS84.

Figura 38. Mapa de distribución de la concentración de (a) Cl y (b) NO₃ en las aguas muestreadas entre 1965-2018. CL: Calle Larga. C: Curimón. R: Rinconada. SE: San Esteban. SF: San Felipe. SM: Santa María. LA: Los Andes.

5 Discusión

5.1 Hidrogeología

La exploración de aguas subterráneas en roca (unidades hidrogeológicas E1 y E2) y en sedimentos emplazados cerca del basamento se enfocó en aquellas áreas donde se disponía de la mayor cantidad de información de pozos de interés (Figura 17). En el primer caso, se hallaron seis sectores en torno a los márgenes de la depresión donde se reconoció la presencia de aguas subterráneas en roca fracturada. En el segundo caso, se hallaron solo dos sectores donde se reconocieron paquetes de alta permeabilidad (unidades hidrogeológicas L1 y L2) intercalados entre depósitos de baja permeabilidad asignados a la unidad hidrogeológica D. Dado que no se hallaron otros depósitos con características similares en pozos cercanos, se concluyó que estas dos unidades poseen un carácter local.

De acuerdo a los registros estratigráficos, no hay evidencias de que exista un aislamiento hidráulico entre las unidades hidrogeológicas someras (A, B y C) y profundas (D, E1 y E2) definidas en Los Andes-San Felipe. Esto refuta la hipótesis de trabajo planteada inicialmente, sugiriendo que las aguas subterráneas de la zona conforman un sistema más bien homogéneo, quizás en parte compartimentado por la presencia local de variaciones en los materiales sedimentarios. Por otro lado, para futuros estudios de aguas subterráneas en roca se recomienda focalizar el área de análisis al margen oriental y suroriental de la depresión, donde se concentran las estructuras de la ZFP y otras fallas ubicadas en torno al Frente Cordillerano Andino. En dichas áreas, los registros estratigráficos señalan la presencia de aguas subterráneas en roca en al menos tres lugares: la cabecera del estero Pocuro, a 5-6 km al sureste de Los Andes (perfil PL1); el sector de Termas El Corazón, al este de San Esteban (perfil PL2); y las terrazas fluviales al noreste de El Guape, aproximadamente a 7 km al este de Los Andes (pozo P029).

En el sector occidental y suroccidental de la depresión se hallaron otros tres sitios con presencia de aguas subterráneas en roca: el primero entre Curimón y Rinconada, al oeste del estero Pocuro (pozo P024); el segundo a 2-3 km al suroeste de Rinconada, al sur del estero Pocuro (pozo P043, perfil PL3); y el tercero entre Rinconada y Calle Larga, al oeste de un cerro isla ubicado al norte del Estero Pocuro (pozo P116). En estos casos, la roca fracturada, probablemente, está relacionada con las estructuras geológicas cercanas descritas en la literatura, pero es necesaria información adicional para estudiar la presencia de eventuales acuíferos en roca en esos sectores.

Para el estudio de acuíferos emplazados cerca del basamento (en niveles sedimentarios intercalados entre niveles de baja permeabilidad) se identificaron dos sitios de interés representados por los perfiles PL4 y PL5. En estos lugares se reconocieron dos paquetes sedimentarios de alta permeabilidad, los cuales fueron definidos como las unidades hidrogeológicas L1 y L2, respectivamente. Estos paquetes se encuentran separados de la unidad hidrogeológica B por depósitos de baja permeabilidad asignados a la unidad hidrogeológica D. El primer sitio se ubica al este de Los Andes, en torno al lecho del río Aconcagua (perfil PL4), y el segundo se ubica al noreste de San Felipe, cerca de la Quebrada Grande de Quilpué (perfil PL5).

Las unidades hidrogeológicas L1 y L2 poseen una extensión acotada (1-2 km) y baja potencia en relación a las demás unidades (3-4 m y 16-22 m, respectivamente). En ambos casos, la piezometría de los pozos analizados no es suficiente para determinar si existe aislamiento hidráulico con la unidad hidrogeológica B. Para ello hacen falta mediciones de niveles en pozos con cribado restringido a las unidades hidrogeológicas L1/L2 y midiendo en una ventana de tiempo acotada. También se requieren los registros estratigráficos de más pozos en la zona para determinar de manera precisa la extensión y geometría de estas unidades.

A partir de los sitios de interés definidos se realizó una propuesta de cinco perfiles hidrogeológicos locales (PL), seleccionando los lugares con mayor cantidad de información: los perfiles PL1, PL2 y PL3 para las aguas subterráneas en roca fracturada (unidades hidrogeológicas E1 y E2) y los perfiles PL4 y PL5 para los paquetes sedimentarios permeables (unidades hidrogeológicas L1 y L2) emplazados cerca del basamento entre paquetes de baja permeabilidad (unidad hidrogeológica D). La interpretación de los datos utilizados en los perfiles supuso cierta complejidad dada las inconsistencias entre las distintas fuentes de información empleadas: el catastro de captaciones de la DGA y los perfiles de la DOH (2006) y de la DOH (2009).

En el caso de la geofísica interpretada de la DOH (2006), la profundidad del basamento obtenida con el método TEM no siempre se ajustó bien hacia los bordes del valle (a diferencia del método gravimétrico, que obtiene resultados más precisos en estos casos). Por ejemplo, en la Figura 16, al oeste de Rinconada (en el sector cordillerano), se observa una estación TEM que señala una potencia sedimentaria superior a 100 m un punto donde se hay espesor muy bajo o nulo. De acuerdo a la DOH (2009), estas diferencias se deben a que los distintos métodos geofísicos (gravedad y TEM) miden diferentes propiedades físicas del medio (densidad y resistividad, respectivamente), las cuales no necesariamente presentan la misma variabilidad espacial dentro del subsuelo.

En el caso del catastro de captaciones, algunos registros de pozos cercanos contenían información que no era coherente, por lo que hubo que adaptar la interpretación de unidades dando preferencia a la información que estuviese más repetida entre los distintos pozos. Por ejemplo, en la parte occidental del perfil PG4 (Figura 24), al pozo ND-0503-906, inicialmente, se le asignó la unidad hidrogeológica D en los últimos 35 m. Posteriormente, se optó por reasignar ese tramo a la unidad hidrogeológica B, esto dado que todos los pozos cercanos presentaban dicha unidad a la profundidad del tramo antes mencionado.

En algunos casos, el espesor de las unidades hidrogeológicas era muy distinto en las tres fuentes empleadas. Por ejemplo, en el sector central del perfil PL5 (Figura 31), los pozos ND-0503-3902 y ND-0503-3253 muestran una secuencia sedimentaria con una potencia del orden de 160 m, mientras que en el estudio de la DOH (2009) se señala una potencia aproximada de 100 m en torno a ese sector. Otro ejemplo es el sector central del perfil PG4 (Figura 24), donde se omitió la estación "Z1P18 TEM 2" de la DOH (2006) por señalar que la unidad hidrogeológica D posee un espesor nulo, mientras que otras estaciones TEM y pozos cercanos indican potencias del orden de 50-100 m para la misma unidad.

5.2 Hidrogeoquímica

De acuerdo a los datos analizados (Anexo F), las aguas subterráneas de Los Andes-San Felipe son principalmente de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$. Este resultado coincide con los análisis efectuados en estudios e informes anteriores (e. g. Parraguez, 1985; Venegas *et al.*, 2003; Bustamante *et al.*, 2012; GeoHidrología, 2013; Taucare *et al.*, 2020a). Estos resultados sugieren que las aguas subterráneas de la zona, que en general adquieren los iones a partir de procesos de interacción agua-roca (Taucare *et al.*, 2020a), son jóvenes, de recarga local y tiempo de residencia acotado. En el reporte de Suckow *et al.* (2020), anexo al estudio de CSIRO, se analizaron 15 muestras de aguas subterráneas tomadas en el valle del río Aconcagua, entre las cuales se incluyen las muestras n°1 a n°10 del presente estudio, y se determinó mediante trazadores ambientales (isótopos estables del agua, tritio, clorofluorocarburos, hexafluoruro de azufre, halón 1301, radiocarbono y gases nobles) que las aguas subterráneas de la zona tienen una circulación del orden de pocas décadas.

Al analizar la química de las aguas subterráneas en función de la profundidad de muestreo (Figura 35) no se observan diferencias significativas. El único contraste notable es con las aguas superficiales, las cuales son de tipo $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ y tienen valores de TSD más bajos que los que presentan las aguas subterráneas. Esta mayor proporción de sulfatos en las aguas superficiales se observa de forma acentuada en los sectores más altos de la

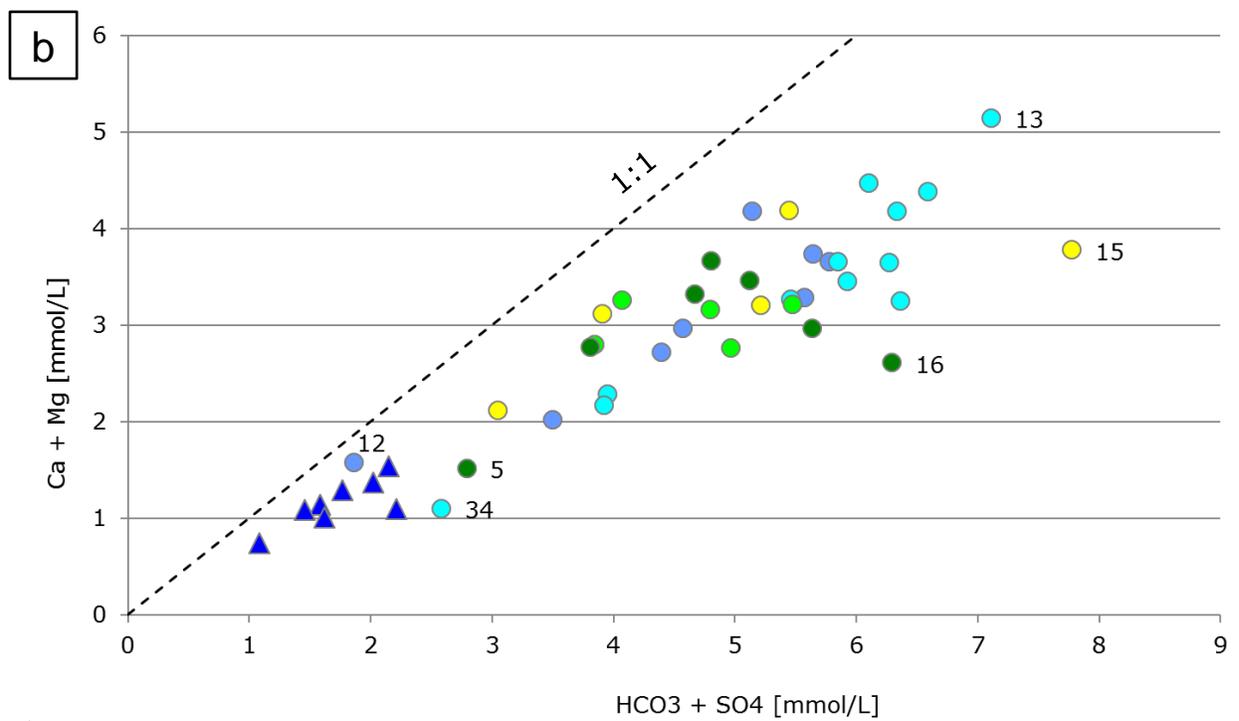
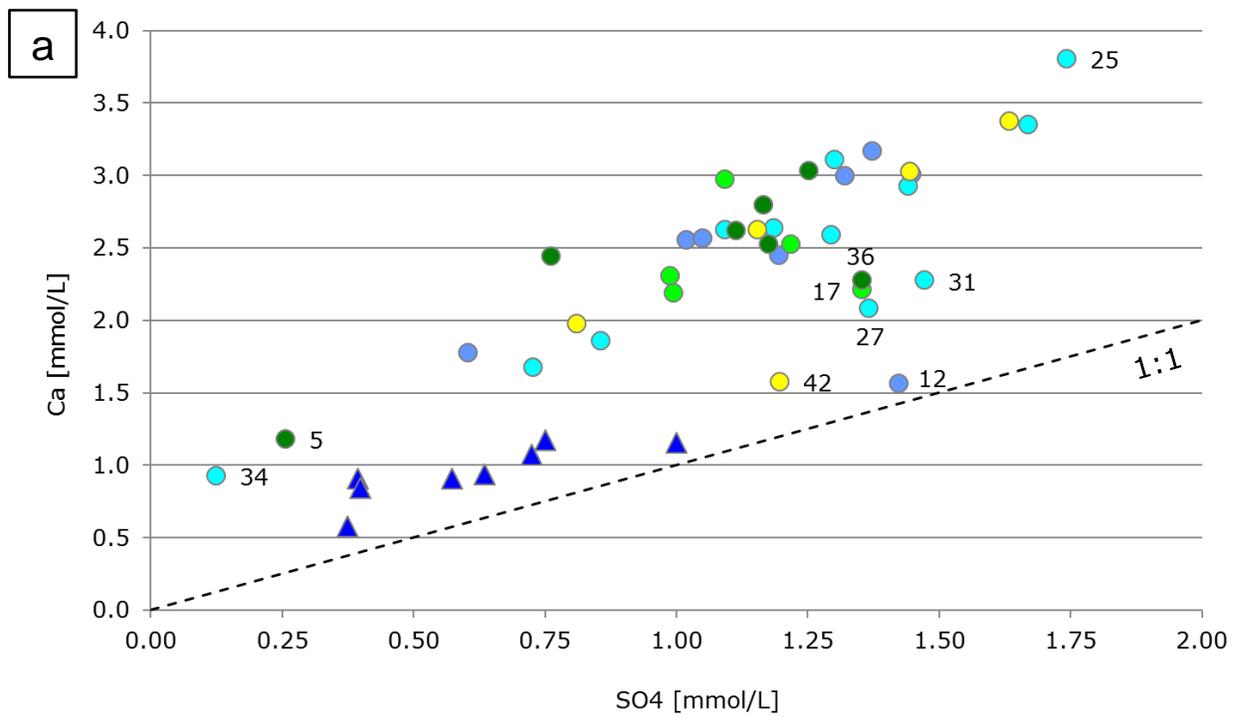
cuenca del río Aconcagua (fuera de la zona de estudio): en el río Juncal (afluente del río Aconcagua ubicado unos 15 km al este de la depresión) las aguas superficiales alcanza concentraciones de sulfatos de hasta 370 mg/l (DGA, 2004b) y en el sector de Campos Ahumada (unos 10 km al noreste de la depresión) se alcanzan valores de hasta 360 mg/l (Treskow, 2019). En esos sectores, el sulfato está asociado con la interacción del agua con las rocas y las alteraciones presentes, en particular, buena parte del sulfato proviene de la disolución de silicatos y la oxidación de la piritita (Treskow, 2019).

En el caso del estero Pocuro, sus aguas cambian de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (en la cordillera) a tipo sulfatado cálcico (en la depresión) (Anexo L). Cabe mencionar que esta diferencia podría deberse a los distintos años de medición de las muestras involucradas (2006 y 1981, respectivamente).

Para determinar los posibles *procesos de interacción agua-roca* que controlan la composición de las aguas de la zona se crearon diagramas binarios analizando, entre otros, los iones con mejor correlación en la matriz de correlación (Tabla 10).

La Figura 39a muestra el gráfico de la concentración de Ca versus SO_4 en las muestras, donde se observa que todos los datos se posicionan arriba de la línea 1:1, indicando que hay más Ca que SO_4 y, por lo tanto, que el Ca encontrado en las aguas procede de diferentes fuentes (diferentes minerales aportan Ca). En este gráfico destacan las aguas superficiales, las cuales se posicionan más cerca de la recta 1:1, sugiriendo que el proceso de disolución de yeso/anhidrita tiene mayor influencia sobre la composición de estas aguas, mientras que las aguas subterráneas reflejan una mayor influencia de otros procesos (e. g. meteorización de silicatos).

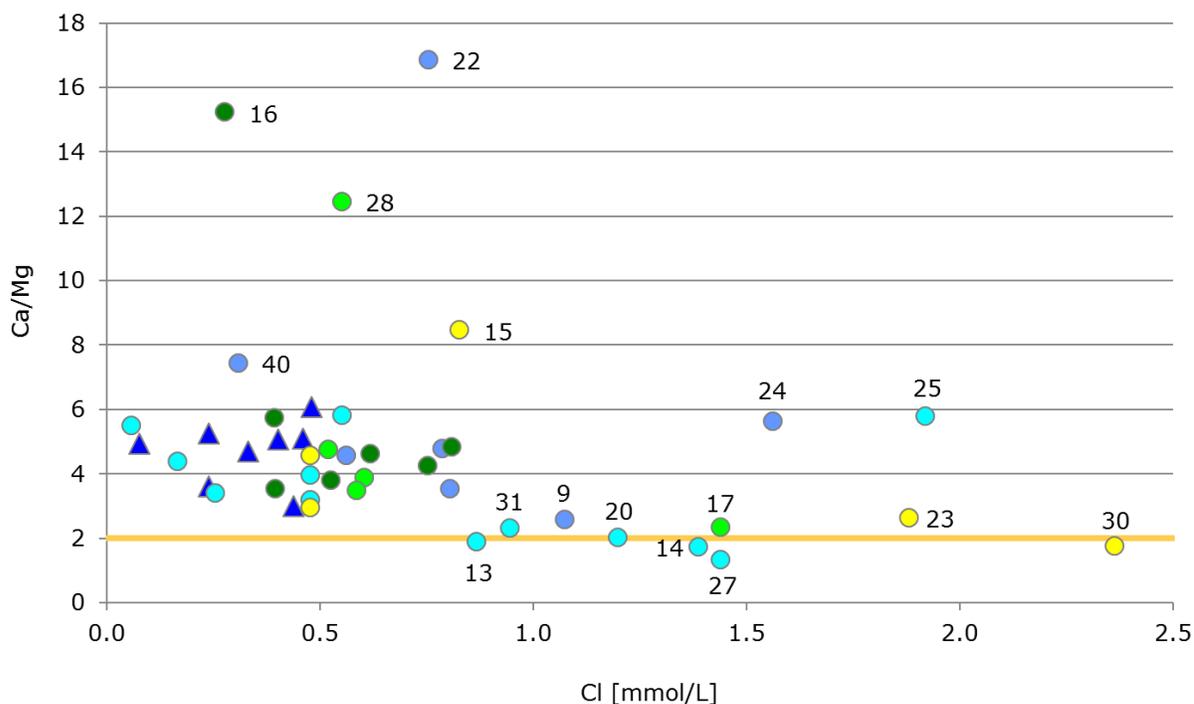
El gráfico de Ca+Mg versus HCO_3+SO_4 (Figura 39b) permite determinar si el proceso de disolución de carbonatos y sulfatos tiene una influencia significativa sobre la composición de las aguas, lo que se refleja cuando los datos se alinean en torno a la recta 1:1 (e. g. Sheikhy *et al.*, 2014). En la Figura 39b, todos los datos se posicionan bajo la recta 1:1, siendo las aguas superficiales las más cercanas a esta recta. Esto sugiere que la disolución de carbonatos y sulfatos tiene mayor influencia sobre dichas aguas. Por otro lado, el exceso de HCO_3+SO_4 en las aguas subterráneas indica que los cationes analizados y, muy probablemente, el HCO_3 proceden de diferentes minerales, vale decir, existen otros procesos que controlan la composición de estas aguas como la disolución de plagioclasas (Taucare *et al.*, 2020a).



Rango de profundidad del cribado	
Leyenda	▲ Agua superficial
	● 0-60 m
	● 0-100 m
	● 55-100 m
	● 50-150 m
	● > 80 m

Figura 39. Gráfico de (a) Ca vs SO₄ y (b) Ca+Mg versus HCO₃+SO₄.

De acuerdo a varios autores (e. g. Mayo & Loucks, 1995; Katz *et al.*, 1997; Reddy & Kumar, 2010), una razón Ca/Mg \sim 1 indica posible influencia de terrenos dolomíticos, Ca/Mg > 1 indica mayor contribución de calcita y Ca/Mg > 2 indica meteorización de silicatos. La Figura 40 muestra el gráfico de la razón Ca/Mg versus la concentración de Cl en las muestras, donde se observa que aproximadamente el 91% de los datos posee una razón Ca/Mg > 2. Lo anterior sugiere que la meteorización de silicatos tiene una influencia significativa sobre la composición de las aguas analizadas. Cabe mencionar que en el gráfico se omitió la muestra n°12 por presentar un valor muy alejado del resto (Mg/Ca \sim 126).

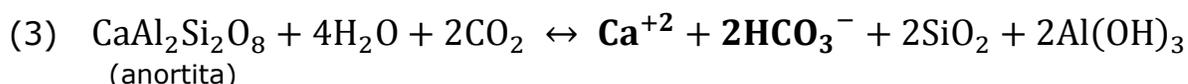
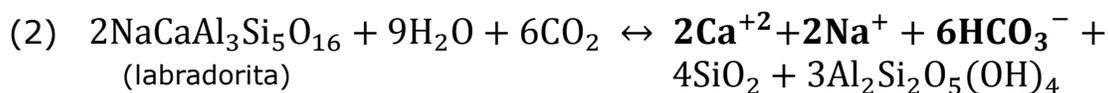
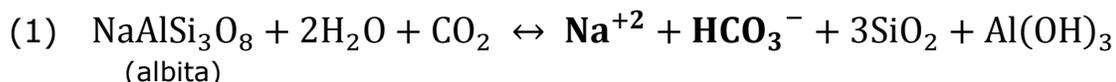


Rango de profundidad del cribado	
Leyenda	▲ Agua superficial
	● 0-60 m
	● 0-100 m
	● 55-100 m
	● 50-150 m
	● > 80 m

Figura 40. Gráfico de Ca/Mg versus Cl.

En Chile Central, en el Frente Cordillerano Andino, las rocas volcanosedimentarias se caracterizan por una composición andesítica y abundancia de plagioclasas, las cuales varían de plagioclasas sódicas (albita) a cálcicas (anortita), incluyendo la labradorita como plagioclasa intermedia (Taucare, 2020; Taucare *et al.*, 2020a).

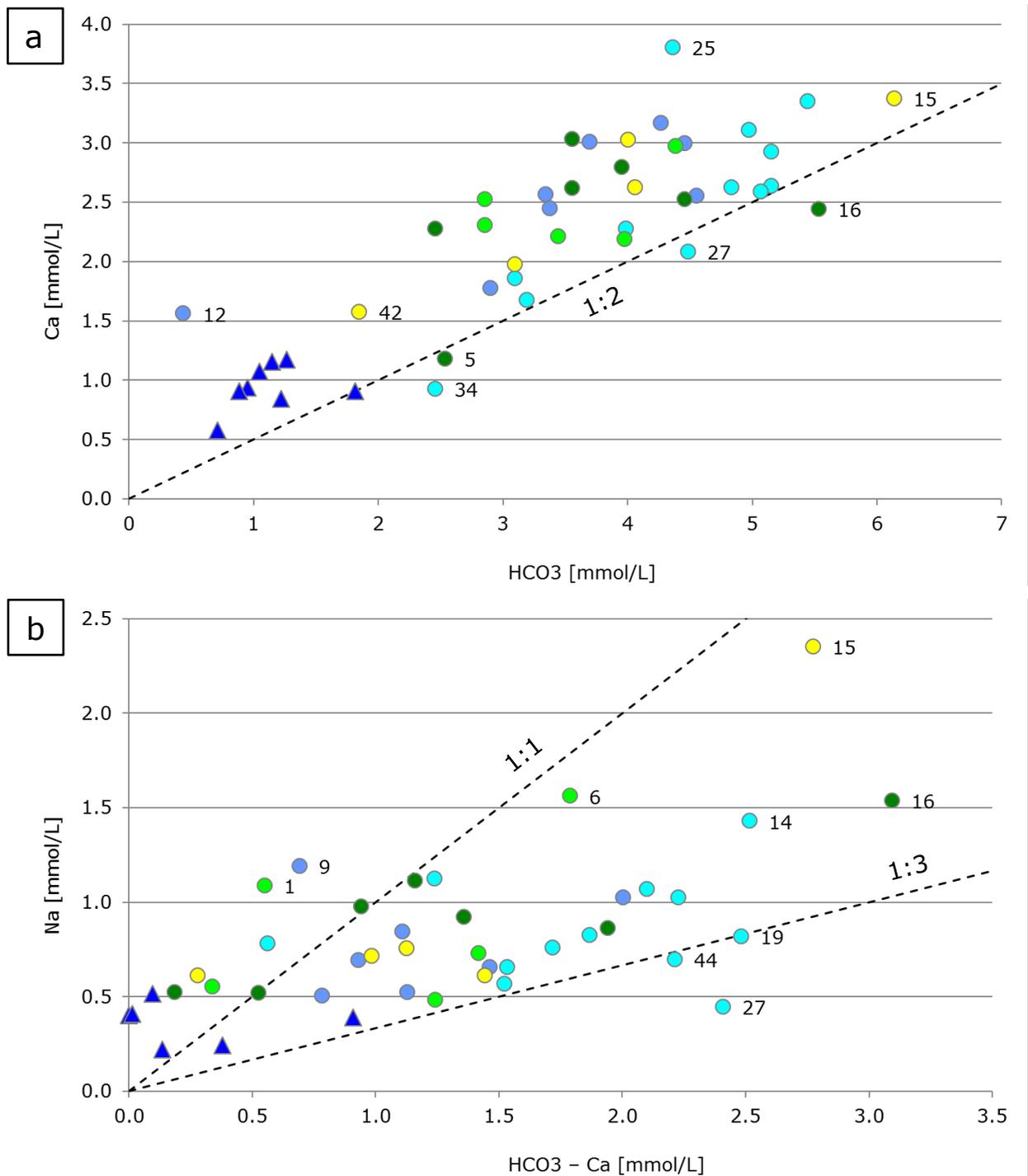
El ácido carbónico, derivado de la disolución del dióxido de carbono presente en el suelo ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$), favorece la disolución de estos minerales, donde las distintas plagioclasas liberan proporciones específicas de determinados iones: la albita libera una razón 1:1 de $\text{Na}:\text{HCO}_3^-$ (ecuación 1); la labradorita libera una razón 1:3 de $\text{Na}:\text{HCO}_3^-$ y $\text{Ca}:\text{HCO}_3^-$ (ecuación 2); y la anortita libera una razón 1:2 de $\text{Ca}:\text{HCO}_3^-$ (ecuación 3).



La Figura 41a muestra el gráfico del Ca versus HCO_3^- , donde se observa que prácticamente todos los datos se posicionan arriba de la línea 1:2 ($\text{Ca}:\text{HCO}_3^-$), mostrando una correlación positiva pero no tan bien definida. Esto sugiere que, además de la disolución de anortita (representada por la recta 1:2), hay otros procesos (tales como la disolución de carbonatos y sulfatos, evidenciada en gráficos previos) que influyen la composición de las muestras y provocan el exceso de Ca observado en el gráfico.

La Figura 41b muestra el gráfico del Na versus HCO_3^- -Ca, donde se omitieron las muestras n°12, n°50 y n°53 por presentar valores negativos. Este gráfico se utiliza para analizar la participación de las plagioclasas sódicas en la composición de las aguas. En este caso, se descontó al HCO_3^- la parte que podría provenir de los carbonatos. En el gráfico se observa que los datos se distribuyen en torno a las rectas 1:1 (albita) y 1:3 (labradorita), sugiriendo que la disolución de las plagioclasas sódicas tiene cierta influencia sobre la composición de las aguas analizadas.

Bustamante *et al.* (2012) señalan que las formaciones de la zona corresponden, principalmente, a depósitos sedimentarios continentales, rocas volcanosedimentarias y rocas ígneas intrusivas, con áreas de alteración hidrotermal. Taucare *et al.* (2020a) señalan que la mayor parte de las aguas subterráneas del Frente Cordillerano Andino en la zona son de tipo HCO_3^- -Ca producto de la disolución de silicatos. Lo anterior conforme a la geología de la zona, donde las rocas de la Formación Abanico (que abarcan gran parte del Frente Cordillerano Andino) se pueden representar por lavas básicas donde los minerales principales son la anortita, albita y diópsido (Jara, 2016).



Leyenda	Rango de profundidad del cribado	
	▲ Agua superficial	● 55-100 m
● 0-60 m	● 50-150 m	● > 80 m
● 0-100 m		

Figura 41. Gráfico de (a) Ca versus HCO₃ y (b) Na versus HCO₃ - Ca.

En Bustamante *et al.* (2012) no se describe la presencia de rocas calcáreas ni evaporíticas en la depresión, salvo al suroeste de San Felipe, donde afloran depósitos calcáreos correspondientes a los estratos basales de la formación Las Chilcas (Kilc-c). En estudios más recientes (*e. g.* Navarro, 2014; González, 2018; Taucare *et al.*, 2018) se describe la presencia abundante de calcita, laumontita y cuarzo como minerales de alteración asociados a las estructuras emplazadas en torno a la ZFP, en el margen oriental de la depresión. Estos minerales se habrían producido a partir del Mioceno debido a la circulación de fluidos clorurados de alta temperatura a través de las estructuras existentes en la Formación Abanico (González, 2018). Estos fluidos habrían cambiado su composición a una más carbonatada (de menor temperatura), precipitando grandes cantidades de calcita superpuesta al sistema de alteración previo.

Con respecto a las aguas superficiales, el estudio de DGA (2004b) señala que los sulfatos presentes en el río Aconcagua hasta San Felipe y en los tributarios altos se deberían a la lixiviación de piratas presentes en las rocas volcánicas (andesitas) y también a las aguas de drenajes de minas y depósitos de materiales de descarte minero (tortas). Por otro lado, en las partes altas de la cuenca del río Aconcagua, hacia la cabecera de los afluentes del río Juncal y cerca del límite con Argentina, se han descrito tres unidades geológicas que contienen rocas carbonatadas y yeso (Rivano *et al.*, 1993): la Formación Cristo Redentor (Kicr), la Formación San José (Ksj) y la unidad Yeso principal diapírico (Jsyp). Estas unidades se encuentran a 50 km de la zona de estudio, por lo que no tendrían influencia directa sobre la composición de las aguas subterráneas de la zona. Sin embargo, estas unidades sí podrían tener influencia sobre la composición de los afluentes del río Aconcagua debido a que están emplazadas en las zonas de recarga de estos. Consecuentemente, la disolución de los carbonatos y sulfatos presentes en dichas unidades tendría influencia sobre las aguas del río Aconcagua, explicando las tendencias observadas en las aguas superficiales en la Figura 39a y Figura 39b.

Es importante señalar que en la Región de Valparaíso se desarrolla una intensa actividad agropecuaria, donde es común la aplicación de fertilizantes, tales como el yeso agrícola, que buscan mejorar la productividad de los cultivos, aumentar la velocidad de infiltración del suelo, promover el crecimiento y la resistencia de las raíces, entre otras funciones (*e. g.* Valdés, 2011; Garcés, 2018; Gardiazabal *et al.*, 2007; Gardiazabal, 2004). Estos compuestos podrían tener influencia sobre la composición de las aguas analizadas, las cuales, en su mayoría, pertenecen a terrenos agrícolas.

En la base de datos hidrogeoquímica (Anexo F) se observa que las muestras poseen concentraciones apreciables de NO_3 . En efecto, 15 muestras superan los 10 mg/l y una alcanza los 58 mg/l. Esta última muestra sobrepasa

los niveles máximos establecidos en las normas nacionales e internacionales (50 mg/l de NO_3). La Figura 42a muestra la concentración de NO_3 y el rango de profundidad del cribado en los pozos muestreados durante la campaña hidrogeoquímica (muestras n°1 a n°10), donde se observa que la mayoría posee concentraciones superiores a 10 mg/l, indicando un origen antrópico asociado, probablemente, a la agricultura. Lo mismo ocurre en tramos inferiores del valle del río Aconcagua, donde Aguirre *et al.* (2019) midieron concentraciones, generalmente, superiores a 10 mg/l de NO_3 en pozos ubicados entre Quillota y Llay-Llay.

Por otro lado, destaca el mayor contenido de NO_3 que presentan las muestras tomadas en la campaña hidrogeoquímica (9-58 mg/l) en comparación a las mediciones previas a 2010 (0-19 mg/l). Algunos autores (e. g. Zalidis *et al.*, 2002; Ximenes *et al.*, 2018) señalan que el aumento del contenido de nitratos suele estar asociado con el desarrollo de una intensa actividad agrícola y el uso excesivo de fertilizantes, lo que tiende a reflejarse en la química de las aguas subterráneas más someras. Lo anterior sería coherente con la intensa actividad agrícola que hay en la zona de estudio.

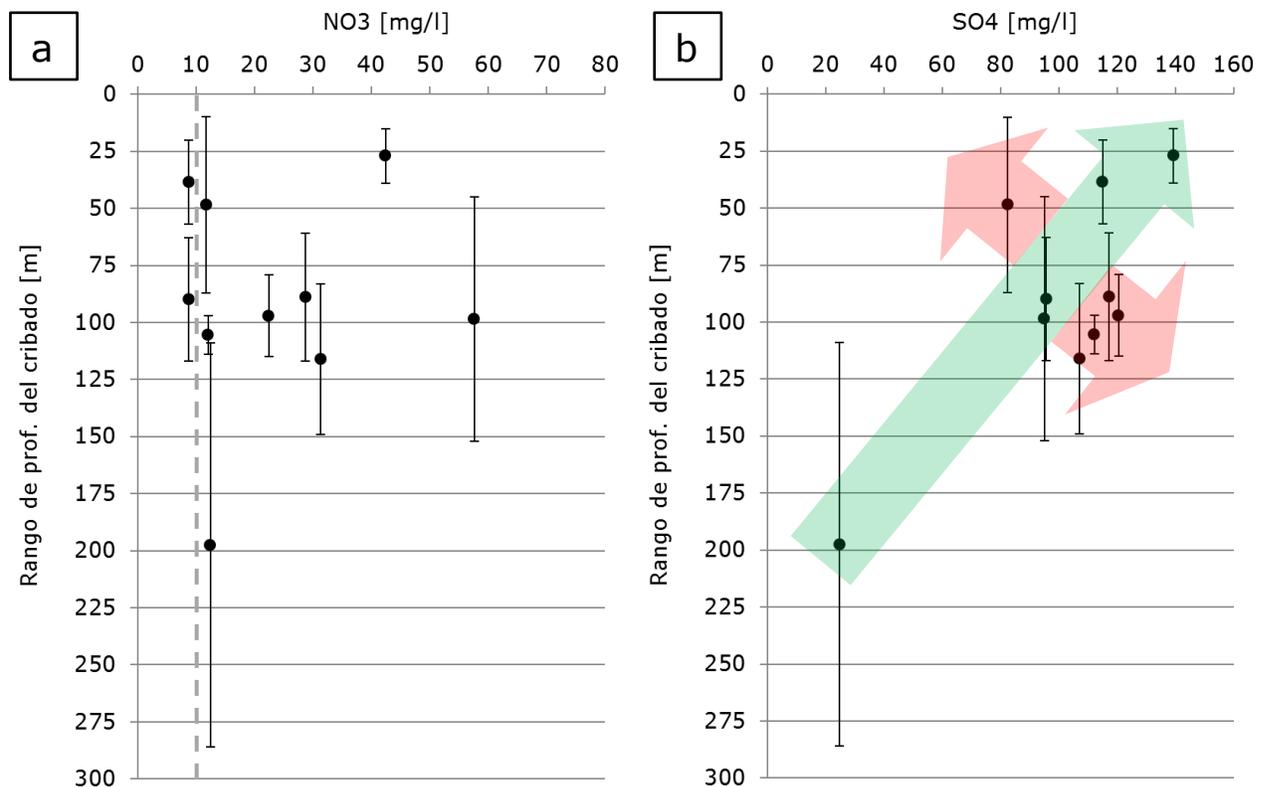


Figura 42. Perfil de profundidad de (a) NO_3 y (b) SO_4 . Las rectas verticales (barras de error) indican el rango de profundidad del cribado de cada pozo.

La Figura 42b muestra la concentración de SO_4 y el rango de profundidad del cribado de los pozos muestreados en la campaña hidrogeoquímica (muestras n°1 a n°10). En el gráfico se observa que, en una parte de las muestras, el SO_4 tiende a disminuir con la profundidad, pero esta tendencia no se refleja en todos los pozos. Cabe mencionar que la mayoría de pozos someros con más de 110 mg/l de SO_4 se encuentran cerca de ríos o canales, lo que podría indicar que parte del SO_4 en dichos pozos se debe a la infiltración de las aguas superficiales (las cuales tienen mayor proporción de este ión).

De acuerdo a los datos analizados, las aguas subterráneas de la zona presentan una química más bien homogénea. Pese a que no se consiguió un muestreo selectivo de las distintas unidades hidrogeológicas, las muestras de aguas subterráneas tomadas en distintos sectores y a distinta profundidad, en general, presentan una composición química similar. Esto coincide con el análisis de los registros estratigráficos, donde se descartó la existencia de una barrera impermeable entre las unidades hidrogeológicas, refutando la hipótesis de trabajo planteada inicialmente.

Para ilustrar lo anterior, se puede tomar como ejemplo el perfil PG1 (Figura 21), donde se observan dos diagramas de Stiff casi idénticos que corresponden a muestras de aguas subterráneas tomadas en lados opuestos del valle (los pozos muestreados se encuentran a una distancia aproximada de 6 km). Estas muestras fueron tomadas en unidades distintas: la muestra al oeste representa la hidrogeoquímica de la unidad hidrogeológica B, mientras que la muestra al este representa la hidrogeoquímica de las unidades hidrogeológicas L2 y D.

Otro ejemplo es el perfil PG3 (Figura 23), donde los diagramas de Stiff ubicados en su parte central y oriental son muy similares a pesar de encontrarse a más de 7 km de distancia y captar aguas subterráneas en unidades distintas. Estas muestras fueron tomadas en pozos que bombean aguas subterráneas desde las unidades B/D (sector central) y E1/E2 (sector oriental). La única diferencia química notable es con el tercer diagrama de Stiff, el cual corresponde a una muestra del río Aconcagua tomada en una estación DGA.

En el presente estudio no se pudo concretar un análisis selectivo de las aguas subterráneas en las distintas unidades hidrogeológicas. Esto debido a que la mayoría de los pozos de la zona son pozos de producción que presentan la "desventaja" de haber sido perforados solo en la unidad hidrogeológica B (e. g. Figura 21 y Figura 25) o tienen un tramo de cribado muy largo en términos de su extensión vertical (Anexo G). Esto último se traduce en que los datos químicos representan la mezcla de aguas que se produce al interior de los pozos. En efecto, de los 119 pozos con estratigrafía

disponible (Anexo H), 67 explotan la unidad hidrogeológica B, 36 bombean una mezcla de aguas subterráneas (de dos o más unidades) y 3 no poseen información acerca de su habilitación (P081, P082 y P083). Por lo tanto, de los 119 pozos con estratigrafía disponible, solo 13 explotan las unidades hidrogeológicas más profundas: 1 pozo con cribado restringido a la unidad C (P023); 7 pozos con cribado restringido a la unidad D (P026, P034, P035, P067, P075, P098 y P117); y 5 pozos con cribado restringido a las unidades E1/E2 (P008, P009, P010, P029 y P079).

De estos trece pozos, solo cinco poseen mediciones hidrogeoquímicas (los números de muestra se indican entre paréntesis): P009 (n°3), P029 (n°5), P067 (n°30), P079 (n°10) y P098 (n°39). De estas cinco muestras, cuatro fueron validadas mediante el cálculo del balance iónico (n°3, n°5, n°10 y n°30). En síntesis, la zona de estudio cuenta solo con una muestra selectiva de la unidad hidrogeológica D (n°30-P067) y tres de las unidades hidrogeológicas E1/E2 (n°3/P009, n°5/P029 y n°10/P079) (Anexo G).

Consecuentemente, la caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en roca (unidades hidrogeológicas E1 y E2) no pudo concretarse debido a que las captaciones, en su mayoría, fueron perforadas en el relleno sedimentario. Si bien 24 pozos alcanzan el basamento (Anexo H), la mayoría de estos no posee tubería cribada instalada a la profundidad de la roca. Y en los casos donde sí se cumple esta condición (10 pozos) (Anexo J), el cribado también fue ampliamente instalado en el relleno sedimentario, impidiendo realizar un muestreo selectivo de las aguas subterráneas en roca. En síntesis, para caracterizar selectivamente la hidrogeoquímica de las distintas unidades hidrogeológicas es menester disponer de un número significativo de pozos con cribado restringido a la profundidad de cada unidad, complementando esto con la medición de los niveles estáticos en una ventana de tiempo acotada, como ya se mencionó anteriormente.

6 Conclusiones

En Los Andes-San Felipe, la explotación de aguas subterráneas en roca fracturada se concentra en el margen sur y en el margen oriental de la depresión, destacando cuatro sitios donde se bombean aguas subterráneas desde roca fracturada: la cabecera del estero Pocuro dentro de la depresión (perfil PL1); el sector de Termas El Corazón, al este de San Esteban (perfil PL2); al suroeste de Rinconada, cerca del margen de la depresión (perfil PL3); y las terrazas fluviales al noreste de El Guape, 7 km al este de Los Andes. En todos estos lugares, los registros estratigráficos descartan la existencia de una barrera impermeable entre las unidades hidrogeológicas someras (A, B y C) y profundas (D, E1 y E2). En otras palabras, no existe aislamiento hidráulico entre la roca fracturada y las unidades sedimentarias sobreyacentes.

En la zona también se identificaron dos sitios con aguas subterráneas en paquetes sedimentarios profundos de alta permeabilidad intercalados entre los depósitos de baja permeabilidad de la unidad hidrogeológica D: al este de la ciudad de Los Andes, en torno al lecho del río Aconcagua (perfil PL4); y al noreste de la ciudad de San Felipe, cerca de la Quebrada Grande de Quilpué (perfil PL5). Estos paquetes sedimentarios, definidos como las unidades hidrogeológicas L1 y L2, tienen una extensión aproximada de 1-2 km y una baja potencia (3-4 m y 16-22 m, respectivamente) en comparación a la secuencia sedimentaria completa. Se desconoce si estas unidades se encuentran en condición de confinamiento, pues para determinar esto hacen falta mediciones de niveles en pozos con cribado instalado en las distintas unidades (limitando el cribado de cada pozo a una unidad específica).

De acuerdo a los datos analizados, las aguas subterráneas de Los Andes-San Felipe son, principalmente, de tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ y presentan una química homogénea, sin variaciones significativas en función de la profundidad, corroborando la conexión hidráulica entre las unidades hidrogeológicas analizadas. Algunas de las muestras más profundas son de tipo $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$, pero no marcan una tendencia generalizada. En cuanto a la distribución espacial, las aguas subterráneas de tipo mixto a $\text{SO}_4\text{-Ca}$ se presentan, preferentemente, cerca del río Aconcagua. Lo mismo ocurre con las aguas con una alta concentración de Cl (> 50 mg/l) y NO_3 (> 10 mg/l). Las aguas superficiales, por su parte, son principalmente de tipo $\text{SO}_4\text{-HCO}_3\text{-Ca}$ y poseen, en promedio, la mitad de sólidos disueltos que las aguas subterráneas, sugiriendo que éstas últimas reciben iones de las interacciones agua-roca que ocurren en el acuífero y desde la infiltración.

De acuerdo a los datos analizados, la composición de las aguas subterráneas está influenciada por la meteorización de silicatos como las plagioclasas cálcicas y, en menor medida, las plagioclasas sódicas, minerales muy abundantes en las rocas volcánicas del Frente Cordillerano Andino. En

contraparte, la composición de las aguas superficiales está controlada por el proceso de disolución de carbonatos y sulfatos. Por un lado, la calcita está presente en las áreas de alteración hidrotermal asociadas a las estructuras de la ZFP (al oriente de la depresión) y en los estratos basales de la formación Las Chilcas (al suroeste de San Felipe). Por otro lado, se tienen formaciones geológicas compuestas por yeso y rocas carbonatadas en la cabecera de los afluentes del río Aconcagua. Una parte de los sulfatos presentes en las aguas superficiales también se debería a la interacción con los minerales en zonas de alteración y a la oxidación de la pirita en sectores más altos de la cuenca. Otra posible fuente es el drenaje de minas y depósitos de materiales de descarte minero. Cabe mencionar que las aguas superficiales también reflejan, en menor medida, la influencia de la disolución de silicatos como las plagioclasas cálcicas.

Además de los procesos de interacción agua-roca, los datos analizados muestran indicios de contaminación antrópica asociada a la abundante actividad agrícola que hay en la zona: un cuarto de las muestras posee una concentración de nitrato que excede los 10 mg/l y una incluso alcanza los 58 mg/l. También se observa que las muestras tomadas en el presente estudio presentan un aumento en el contenido del NO_3 en comparación a las mediciones de estudios anteriores: los valores aumentan de 0-19 mg/l (mediciones previas a 2010) a 9-58 mg/l (mediciones de 2018). Por otro lado, el sulfato medido en algunas muestras de la campaña hidrogeoquímica tiende a disminuir con la profundidad, pero esta tendencia no se refleja en todas las muestras. Cabe mencionar que parte del sulfato podría tener relación con la cercanía de los pozos (especialmente, los pozos someros) a ríos o canales debido a la infiltración de las aguas superficiales, las cuales tienen una mayor proporción de este ión.

7 Bibliografía

- Aguirre, I., Claro, E., Lazo, K., Cerda, F., Rojas, R., Raiber, M., Martínez, J., Suckow, A., Luna, M., Acosta, O., Lizarde, L. (2019). *Exploración de Aguas Subterráneas Profundas y Acuíferos Periféricos en Cuencas de la Región de Valparaíso. Fundación CSIRO Chile. Programa Iniciativas de Fomento Integradas CORFO-ASOEX: Plan de Inversiones Estratégicas en Recursos Hídricos para la Competitividad Meso-Región Norte Chico.*
- Aguirre, L. (1960). *Geología de los Andes de Chile Central, provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago de Chile. Boletín N° 9.*
- Back, W. (1966). *Hydrochemical Facies and Ground-Water Flow Patterns in Northern Part of Atlantic Coastal Plain. U.S. Geological Survey.*
- Benítez, A. (1978). *Clasificación de cuencas hidrográficas de Chile. Departamento de Hidrología, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.*
- Bustamante, M., Lemus, M., Cortés, R., Vivallos, J., Cáceres, D., & Wall, R. (2012). *Exploración geológica para el fomento de la energía geotérmica: Área de Jahuel, Región de Valparaíso. Servicio Nacional de Geología y Minería. Informe Inédito.*
- Campbell, D. (2005). *Termocronología del sector comprendido entre los ríos Rocín y Aconcagua: Implicancias en la evolución Meso-Cenozoica de la zona. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología.*
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J., Gans, P., Kay, S., Muñoz, N., Wyss, A., & Zurita, E. (2002). *Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33°–36°S.L.). Journal of South American Earth Sciences 15(1), 117-139.*
- Charrier, R., Pinto, L., & Rodríguez, M. P. (2007). *Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. The Geology of Chile, 21-114.*
- Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J., Swisher III, C., Norell, M., Zapatta, F., McKenna, M., & Novacek, M. (1996). *New evidence for late Mesozoic-early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the upper Tinguiririca*

- valley (35 °S), central Chile. *Journal of South American Earth Sciences* 9(5-6), 393-422.
- CNR (1979). *Estudio integral de riego de los valles de Aconcagua, Putaendo, Ligua y Petorca. Informe de Hidrogeología. Consorcio Chileno-Británico: Comunidad de Ingenieros Consultores Asociados (CICA), Binnie & Partners y Hunting Technical Services Ltd. Comisión Nacional de Riego.*
- CORFO (1969). *Hidrogeología del Valle del Aconcagua. Informe preliminar: Santiago, Chile. Corporación de Fomento de la Producción.*
- Crites, R., Tchobanoglous, G., Camargo, M., Pardo, L., & Mejia, G. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones. McGraw-Hill Interamericana, S.A. Santafé de Bogotá.*
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea. Ediciones Omega, Barcelona (España). Ingeniería del agua (2000) 7(1), 23-36.*
- DGA (2004a). *Evaluación de los recursos hídricos superficiales en la cuenca del río Aconcagua: Informe Técnico. Departamento de Administración de Recursos Hídricos, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.*
- DGA (2004b). *Diagnóstico y Clasificación de cursos y cuerpos de agua según Objetivos de Calidad. Cuenca del río Aconcagua. Dirección General de Aguas.*
- DGA (2015). *Información Hídrica de las Cuencas Priorizadas, Fichas Temáticas: Cuenca del Aconcagua. Dirección General de Aguas.*
- DOH (1998). *Modelo de Simulación Hidrogeológico Valle del río Aconcagua. Dirección de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas. Organización investigadora: Ingendesa.*
- DOH (2006). *Estudio Geofísico en el Valle del Aconcagua de la Región de Valparaíso, Dirección, Coordinación e Interpretación. Dirección de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas. Organización investigadora: Ingedos.*
- DOH (2009). *Modificación Modelos DGA Visual Modflow-MOS y MOS-PS para Determinación Disponibilidad Real de Aguas Subterráneas en el Valle del Aconcagua, Segunda Etapa. Dirección de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas. Organización investigadora: Dictuc.*

- EH2030 (2018). Radiografía del Agua: Brecha y Riesgo Hídrico en Chile. Escenarios Hídricos 2030, Fundación Chile, Santiago, Chile.*
- Espíndola, R., & Pugliese, F. (2015). Fertilización razonada de la Vid. Principios básicos para crear estrategias de fertilización. Agencia de Extensión Rural Cauce, Estación Experimental Agropecuaria San Juan. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).*
- Esri (2021). How To: Select the correct geographic (datum) transformation when projecting between datums. Environmental Systems Research Institute. Disponible en la página web: support.esri.com/en/technical-article/000004829 [fecha de consulta: 28 de noviembre de 2022].*
- Facchini, A., & Laville, S. (2018). Chilean villagers claim British appetite for avocados is draining region dry. The Guardian (online). Disponible en la página web: [theguardian.com/environment/2018/may/17/chilean-villagers-claim-british-appetite-for-avocados-is-draining-region-dry](https://www.theguardian.com/environment/2018/may/17/chilean-villagers-claim-british-appetite-for-avocados-is-draining-region-dry) [fecha de consulta: 22 de diciembre de 2018].*
- Farías, M., Charrier, R., Carretier, S., Martinod, J., Fock, A., Campbell, D., Cáceres, J., & Comte, D. (2008). Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33°–35°S). *Tectonics* 27(1).*
- Fock, A. (2005). Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34° S. Memoria de Título (Inédito). Universidad de Chile, Departamento de Geología.*
- Garcés, I. (2018). Guía Interactiva de Minerales Industriales. Minerales Industriales Evaporíticos. Universidad de Antofagasta. Disponible en la página web: <https://intranetua.uantof.cl/salares/ficha.html> [fecha de consulta: 17 de noviembre de 2022].*
- Gardiazabal, F. (2004). Riego y nutrición en paltos. Sociedad Gardiazabal Y Magdahl Ltda. 2º Seminario Internacional De Paltos. Quillota, Chile.*
- Gardiazabal, F., Mena, F., & Magdhal, C. (2007). Estrategia para la recuperación de huertos de palto (*Persea americana* Mill) decaídos, en Chile. *Actas VI Congreso Mundial del Aguacate (Proceedings VI World Avocado Congress) 2007. Viña Del Mar, Chile.**
- Garreaud, R., Aldunce, P., Araya, G., Blanco, G., Boisier, J., Bozkurt, D., Bustamante, C., Bustos, S., Carmona, A., Christie, D., Farías, L., Gallardo, L., Galleguillos, M., González, M., Herrera, P., Huneeus, N.,*

- Jiménez, D., Lara, A., Latoja, D., Lillo, G., Masotti, Í., Moraga, P., Nahuelhual, L., Ossandón, J., Paredes, P., Rojas, M., Tondreau, N., Urquiza, A., Yévenes, M., & Zambrano, M. (2015). La megasequía 2010–2015: Una lección para el futuro. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, Santiago, Chile.*
- Garreaud, R., Boisier, J., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., & Veloso, D. (2020). The Central Chile mega drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. International Journal of Climatology 40(1), 421-439.*
- GeoH (2013). Informe Calidad de Aguas Subterráneas Cuenca del Río Aconcagua. GeoHidrología Consultores. ESVAL S.A.*
- Gibbs, R. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. Science 170(3962), 1088-1090.*
- Gómez, J. (2009). Geología, geofísica, hidrogeoquímica e isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación: acuífero costero municipio de Turbo. Tesis Doctoral: Universidad Nacional de Colombia.*
- González, C. (2018). Mineralogía de alteración hidrotermal asociada a la falla Pocuro entre los 32°50'S y 33°00'S, región de Los Andes. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad Andrés Bello.*
- Hubert, E., & Wolkersdorfer, C. (2015). Establishing a conversion factor between electrical conductivity and total dissolved solids in South African mine waters. Water SA 41(4), 490-500.*
- IDEAM (2015). Principios Básicos para el Conocimiento y Monitoreo de las Aguas Subterráneas en Colombia: Contenidos del Taller en Formación. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.*
- Iglesias, A., Estrela, T., & Gallart, F. (2005). Impactos sobre los recursos hídricos. En J. Moreno, Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático (303-353). Ministerio del Medio Ambiente y Universidad de Castilla-La Mancha.*
- Jara, M. (2016). Simulación de sistemas hidrotermales mediante modelos de transporte reactivo: el caso de San Felipe – Los Andes, Chile Central. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología.*

- Katz, B., Coplen, T., Bullen, T., & Davis, J. (1997). Use of chemical and isotopic tracers to characterize the interactions between ground water and surface water in mantled karst. *Groundwater* 35(6), 1014-1028.
- Leaney, F., & Herczeg, A. (2006). A rapid field extraction method for determination of radon-222 in natural waters by liquid scintillation counting. *Limnology and Oceanography: Methods* 4(7), 254-259.
- Lotfinasabasl, S., Gunale, V. R., & Rajurkar, N. (2013). Water quality assessment of Alibaug mangrove forest using multivariate statistical technique, Maharashtra, India. *Indian Journal of Geo-Marine Sciences* 42(7), 915-923.
- Machuca, C. (2017). *Estratigrafía y estructuras de la zona de Falla Pocuro entre los 32°30' y los 33°S. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología.*
- Mayo, A., & Loucks, M. (1995). Solute and isotopic geochemistry and ground water flow in the central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology* 172(1-4), 31-59.
- MMA (2016). *Tercera comunicación nacional de Chile ante la convención marco de las naciones unidas sobre cambio climático. Maval Spa, Santiago, Chile. Ministerio del Medio Ambiente.*
- Moscoso, R., Padilla, H., & Rivano, S. (1982). Hoja Los Andes, Región de Valparaíso. *Servicio Nacional de geología y Minería, Carta geológica de Chile* 52, 67.
- Muñoz, C., Pinto, L., Charrier, R., & Nalpas, T. (2014). Influence of depositional load on the development of a shortcut fault system during the inversion of an extensional basin: The Eocene Oligocene Abanico Basin case, central Chile Andes (33°-35°S). *Andean geology* 41(1), 1-28.
- Navarro, L. (2014). *Alteración hidrotermal asociada al sistema de falla "Pocuro-San Ramón". Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología.*
- Nkhoma, J., & Bäumle, R. (2007). *Groundwater resources for southern province: a manual with explanations for the use of the hydrogeological maps. Department of Water Affairs, Ministry of Energy and Water Development, Zambia and the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, Germany.*

- NVWSC (2005). *Excel for Hydrology*. Nevada Water Science Center, USGS. Disponible en la página web: nevada.usgs.gov/tech/excelforhydrology [fecha de consulta: 2 de mayo de 2019].
- Ochieng, G., Seanego, E., & Nkwonta, O. (2010). *Impacts of mining on water resources in South Africa: A review*. *Scientific Research and Essays* 5(22), 3351-3357.
- Parraguez, C. (1985). *Definición de Acuíferos y Calidad Química de las Aguas Subterráneas de los Valles de Aconcagua, La Ligua Y Petorca (V Región)*. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Pérez, J. (2012). *Stiff diagrams in shapefile*. Disponible en la página web: lists.maptools.org/pipermail/shapelib/2012-November/000625.html [fecha de consulta: 28 de agosto de 2019].
- Piper, A. (1944). *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses*. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 25(6), 914-928.
- Quintana, C. (2008). *Estrategias y métodos de monitoreo de aguas subterráneas*. Curso de aguas subterráneas. Concepción, Chile: Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.
- Reddy, A., & Kumar, K. (2010). *Identification of the hydrogeochemical processes in groundwater using major ion chemistry: a case study of Penna-Chitravathi river basins in Southern India*. *Environmental Monitoring and Assessment* 170(1), 365-382.
- Rey, M. (2010). *La escasez de Agua en el mundo y la importancia del Acuífero Guaraní para Sudamérica: Relación abundancia-escasez*. Centro Argentino de Estudios Internacionales (CAEI). Programa Recursos Naturales y Desarrollo.
- Rioseco, R., & Tesser, C. (2005). *Cartografía Interactiva de los climas de Chile*. Instituto de Geografía, Campus San Joaquín, Pontificia Universidad Católica de Chile. Disponible en la página web: http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva/Inicio/Paginas/UntitledFrameset-1.htm [fecha de consulta: 16 de abril de 2019].
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Boric, R., & Espiñeira, D. (1993). *Hojas Quillota y Portillo, V Región*. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Carta Geológica de Chile* 73(1).

- Rodier, J. (1990). *Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar; química, fisicoquímica, bacteriología, biología*. Omega.
- Sarricolea, P., Herrera, M., & Meseguer, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps* 13(2), 66-73.
- Sheikhy, T., Ramli, M., Aris, A., Sulaiman, W., Juahir, H., & Fakharian, K. (2014). Identification of the hydrogeochemical processes in groundwater using classic integrated geochemical methods and geostatistical techniques, in Amol-Babol plain, Iran. *The Scientific World Journal* 2014.
- Singh, T., & Kalra, Y. (1975). Specific conductance method for in situ estimation of total dissolved solids. *Journal of the American Water Works Association* 67(2), 99-100.
- Struckmeier, W., & Margat, J. (1995). *Hydrogeological Maps: A Guide And a Standard Legend*. International Contributions to Hydrogeology.
- Suckow, A., Wilske, C., Deslandes, A., Raiber, M., Gerber, C., Luna, M., Cerda, F., & Aguirre, I. (2020). *Environmental Tracers and Noble Gases in the Region Valparaiso, Chile*. CSIRO, Adelaide, Australia.
- Taucare, M. (2020). *Groundwater resources of the Western Andean Front: insights from the Aconcagua Basin, Central Chile*. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias, Mención Geología. Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Taucare, M., Daniele, L., Viguier, B., Vallejos, A., & Arancibia, G. (2020a). Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile. *Science of the Total Environment* 722, 137824.
- Taucare, M., Heuser, G., Roquer, T., Arancibia, G., Daniele, L., & Morata, D. (2018). Structural control in the evolution of an Andean hydrothermal system: The case of Pucuro fault zone (32°35'S - 33°00'S). In XV Chilean Geological Congress. Concepción, Chile.
- Taucare, M., Roquer, T., Heuser, G., Pérez, N., Arancibia, G., Yáñez, G., Viguier, B., Figueroa, R., Morata, D., & Daniele, L. (2022). Selective reactivation of inherited fault zones driven by stress field changes: Insights from structural and paleostress analysis of the Pucuro Fault Zone, Southern Central Andes (32.8° S). *Journal of South American Earth Sciences* 118, 103914.

- Taucare, M., Viguier, B., Daniele, L., Heuser, G., Arancibia, G., & Leonardi, V. (2020b). Connectivity of fractures and groundwater flows analyses into the Western Andean Front by means of a topological approach (Aconcagua Basin, Central Chile). *Hydrogeology Journal* 28(7), 2429-2438.
- Thomas, H. (1958). *Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de La Ligua y la cuesta Barriga (Geology of the Coastal Cordillera between the La Ligua Valley and Barriga Hill)*. Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago Bulletin 2.
- Treskow, V. (2019). *Drenaje ácido natural: el caso de Campos de Ahumada, Chile Central. Memoria para optar al título de Geóloga*. Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- Troncoso, M. (2014). *Evidencia geomorfológica de neotectónica en el borde oriental de la Depresión Los Andes – San Felipe, Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, Mención Geología*. Universidad de Chile, Departamento de Geología.
- USGS (2006). *FGDC Digital Cartographic Standard for Geologic Map Symbolization (PostScript Implementation)*. United States Geological Survey: Techniques and Methods 11-A2, Appendix A, Section 37. Disponible en la página web: <http://pubs.usgs.gov/tm/2006/11A02/> [fecha de consulta: 2 de mayo de 2019].
- Valdés, H. (2011). *Efecto de la aplicación del sulfato de calcio en las propiedades físicas y químicas de un suelo aluvial con altos niveles de calcio en uva de mesa en el Valle del Aconcagua, V Región*.
- Van Niekerk, H., Silberbauer, M., & Maluleke, M. (2014). Geographical differences in the relationship between total dissolved solids and electrical conductivity in South African rivers. *Water SA* 40(1), 133-138.
- Venegas, M., Helms, F., Arqueros, R., & Fernández, C. (2003). *Caracterización Hidrogeoquímica de los Diferentes Acuíferos del Valle del Río Aconcagua*. 10° Congreso Geológico Chileno 2003, Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Concepción. Servicio Nacional de Geología y Minería.

- Weiss, R. (1968). *Piggyback sampler for dissolved gas studies on sealed water samples*. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts* 15(6), 695-699.
- Ximenes, M., Duffy, B., Faria, M., & Neely, K. (2018). *Initial observations of water quality indicators in the unconfined shallow aquifer in Dili City, Timor-Leste: suggestions for its management*. *Environmental Earth Sciences* 77(19), 711.
- Younger, P. L., & Wolkersdorfer, C. (2004). *Mining impacts on the fresh water environment: technical and managerial guidelines for catchment scale management*. *Mine Water and the Environment* 23, S2-S80.
- Zalidis, G., Stamatidi, S., Takavakoglou, V., Eskridge, K., & Misopolinos, N. (2002). *Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology*. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88(2), 137-146.
- Zaporozec, A. (1972). *Graphical Interpretation of Water-Quality Data*. *Groundwater* 10(2), 32-43.

8 Anexos

Anexo A. Elaboración de climograma y curvas de variación estacional.

Con el fin de estudiar las condiciones hidrometeorológicas que dominan los principales cauces de Los Andes-San Felipe se efectuó una revisión de la información disponible en la zona de estudio. Concretamente, se examinaron los registros de la red hidrométrica de la DGA, la cual cuenta con siete estaciones operativas en la zona (Figura 5). La información requerida fue consultada y descargada a través del sitio web snia.dga.cl/BNAConsultas/. En esta web se obtuvieron reportes mensuales fluviométricos (caudales) y meteorológicos (temperaturas y precipitaciones) de las distintas estaciones.

Para el análisis se utilizaron los datos de seis estaciones emplazadas entre los 640-1100 m s. n. m. con mediciones mensuales registradas entre los años 1930 y 2018. En ciertos años, las estaciones tenían muchos meses sin medición, por lo que se aplicaron las siguientes medidas: (1) los años que tenían más de cuatro meses sin registro fueron descartados; (2) para los años con hasta cuatro meses sin registro, cada valor mensual faltante fue estimado como el promedio de todos los valores del mismo mes en los demás años.

El Anexo B muestra el listado de estaciones existentes en la zona con su ubicación e información disponible. En el Anexo B también se indican los años con datos estimados y los años descartados en cada estación. Los datos recopilados fueron representados de forma gráfica mediante un climograma, un gráfico de precipitaciones y nueve gráficos con curvas de variación estacional (seis de precipitaciones y tres de caudales). En cada tipo de gráfico se adoptaron diferentes medidas, las cuales se describen a continuación.

En el caso del *climograma*, para cada mes del año se calculó el promedio de las precipitaciones acumuladas mensuales y las temperaturas medias mensuales registradas en el mes durante todos los años con medición disponible. Para este gráfico solo se utilizaron los registros históricos de la estación Vilcuya por ser la única estación que contaba con registros de temperatura en la zona.

En el caso del *gráfico de precipitaciones*, se siguió el mismo procedimiento que con el climograma, pero solo considerando las precipitaciones. Este gráfico se empleó para visualizar de manera simple la información de las estaciones meteorológicas que no contaban con un registro de temperatura. Para facilitar el análisis y la comparación entre los datos de diferentes estaciones, se optó por unir los gráficos de las seis estaciones en una misma figura.

En el caso de las *curvas de variación estacional*, para cada mes del año se realizó el siguiente procedimiento (tanto para las precipitaciones acumuladas mensuales como para los caudales medios mensuales):

1. Se reordenaron los registros históricos de menor a mayor.
2. A cada registro se le asignó un rango ($r = 1, 2, 3\dots, n$) siguiendo el orden establecido en el paso anterior.
3. A cada registro se le asignó una PE dada por la siguiente fórmula (r : rango; n : número de datos):

$$PE = 1 - \frac{r}{n}$$

Finalmente, se extrajeron los valores requeridos. En el caso de las precipitaciones, se extrajeron los valores con una PE igual a 20%, 50% y 80%. En el caso de los caudales, se extrajeron los valores con una PE igual a 5%, 20%, 50%, 80% y 95%. Posteriormente, se repitieron estos pasos para todos los meses del año, obteniéndose así las curvas de variación estacional, donde cada curva representa una PE distinta. Todo el procedimiento descrito se repitió en cada estación para así obtener las curvas de variación estacional en varios puntos.

Anexo B. Estaciones meteorológicas y fluviométricas operativas al 2018 en el sector de Los Andes-San Felipe (fuente: SNIA, DGA).

Nombre estación	Código BNA	UTM 19S WGS84		Altitud [m s. n. m.]	Variables medidas*	Período de registro	Años con datos estimados	Años descartados
		Norte [m]	Este [m]					
Estero Pocuro en el Sifón	05411001-4	6356459	355682	1000	Qmm	1930-2018	1935, 1966, 1968, 1970, 2006, 2013, 2015-2017	1930, 1934, 1956-1962, 1981-1983, 1986, 2007-2008, 2018
Jahuel	05415004-0	6382255	350331	1020	Ppam	1989-2018	1989, 1991-1993, 1997-2001, 2015, 2017	1990
Los Andes	05410007-8	6368435	346279	820	Ppam	1971-2018	1988, 1990, 1992, 1997, 1999, 2016	1971, 1976, 1995, 2018
Río Aconcagua en Chacabuquito	05410002-7	6364286	358752	950	Ppam	1999-2018	2017	1999, 2018
					Qmm	1936-2018	1944, 1966-1967, 2011	1936, 2018
Río Aconcagua en San Felipe	05410005-1	6374251	337335	650	Ppam	1999-2018	-	1999, 2001, 2018
					Qmm	1962-2018	1964, 1966, 1970-1974	1962, 1967-1969, 1977-1980, 2007, 2009-2011, 2018
San Felipe	05410008-6	6374545	340094	640	Ppam	1962-2018	1962, 1981-1982, 1997-1999	2018
Vilcuya	05410006-K	6363236	362293	1100	Ppam	1964-2018	1976, 1990-1992	1964, 2018
					Tmm	1964-2018	1990-1992, 2000, 2012-2013, 2016-2017	1964, 1976, 2018

* Ppam: precipitación acumulada mensual. Qmm: caudal medio mensual. Tmm: temperatura media mensual.

Anexo C. Estadísticas de dispersión de las precipitaciones acumuladas mensuales (mm) registradas en las estaciones meteorológicas operativas al 2018 en Los Andes-San Felipe.

	Estadístico	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Jahuel	Promedio	0,978	0,385	4,074	13,348	37,838	71,011	41,814	37,557	18,261	10,375	3,161	2,565
	Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	3,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Máximo	14,200	6,400	30,500	70,000	125,800	341,500	159,600	123,800	96,100	52,100	44,000	38,000
	Desv. est.	3,405	1,375	7,431	18,456	39,081	67,410	39,826	33,398	24,249	15,881	9,750	8,630
	Coef. var.	3,483	3,570	1,824	1,383	1,033	0,949	0,952	0,889	1,328	1,531	3,085	3,364
Río Aconcagua en San Felipe	Promedio	0,535	0,347	3,059	8,788	26,312	57,759	30,918	25,582	10,212	8,594	4,776	2,194
	Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Máximo	6,200	4,100	15,100	62,600	93,600	189,500	132,700	84,900	66,800	37,800	41,900	19,700
	Desv. est.	1,529	1,061	5,488	17,459	28,377	51,579	36,212	26,700	15,707	12,584	11,602	6,205
	Coef. var.	2,857	3,056	1,794	1,987	1,078	0,893	1,171	1,044	1,538	1,464	2,429	2,828
San Felipe	Promedio	0,604	0,133	2,542	8,484	29,879	52,887	52,057	33,231	14,657	7,731	4,660	1,604
	Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Máximo	7,800	6,100	17,200	59,300	103,200	315,700	339,900	182,500	130,100	49,100	53,600	34,700
	Desv. est.	1,730	0,817	4,990	13,950	30,665	60,761	63,554	37,207	22,403	12,127	10,369	6,195
	Coef. var.	2,866	6,127	1,963	1,644	1,026	1,149	1,221	1,120	1,528	1,569	2,225	3,863

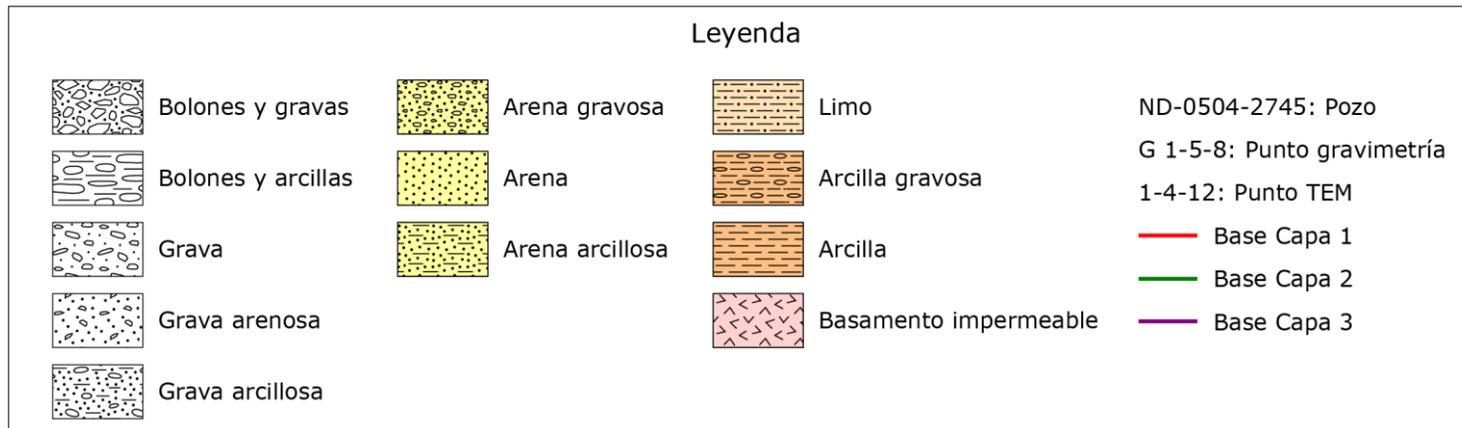
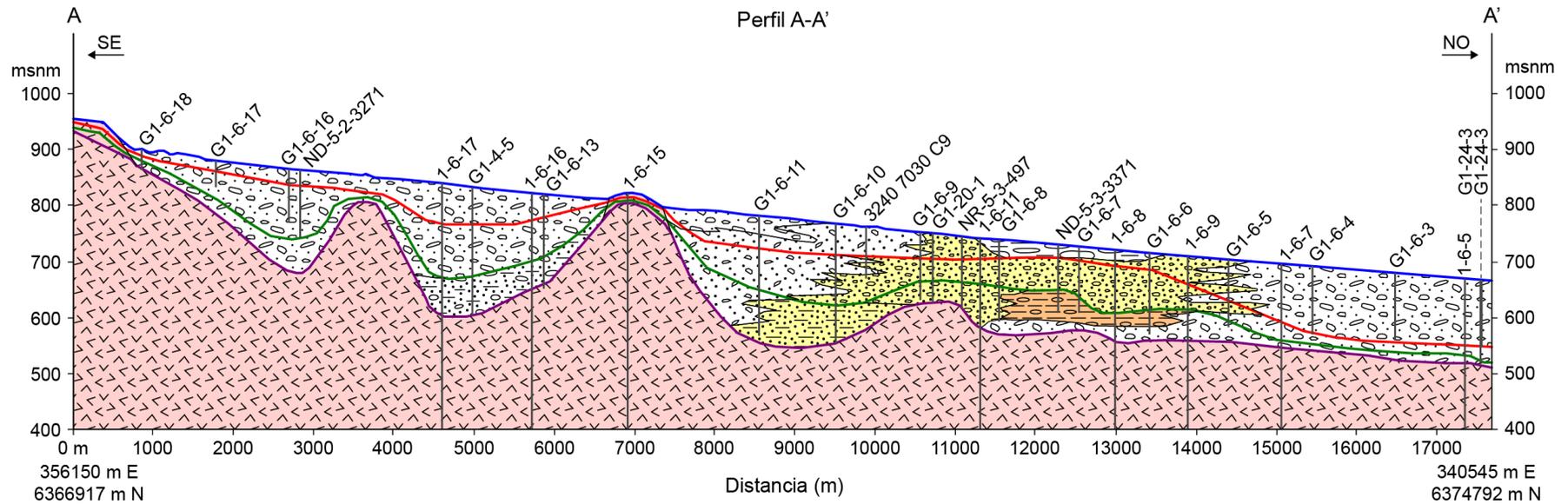
	Estadístico	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Los Andes	Promedio	0,470	0,614	3,177	12,984	40,282	69,700	60,832	39,244	19,067	9,750	6,581	1,864
	Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Máximo	6,600	9,500	22,000	76,700	136,000	326,000	242,000	151,500	74,500	54,000	61,000	37,000
	Desv. est.	1,414	2,220	5,640	19,582	37,565	70,475	62,422	35,434	20,547	13,619	13,549	6,447
	Coef. var.	3,005	3,618	1,775	1,508	0,933	1,011	1,026	0,903	1,078	1,397	2,059	3,458
Río Aconcagua en Chacabucuito	Promedio	2,322	0,839	5,522	12,678	38,489	68,317	51,100	45,850	20,972	16,589	7,572	3,929
	Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Máximo	19,800	4,900	34,300	76,400	139,500	198,500	207,300	125,100	96,400	48,700	49,700	46,600
	Desv. est.	5,319	1,422	9,632	20,019	40,138	48,654	51,404	40,979	24,132	16,538	15,027	11,578
	Coef. var.	2,291	1,695	1,744	1,579	1,043	0,712	1,006	0,894	1,151	0,997	1,985	2,946
Vilcuya	Promedio	1,906	2,002	4,209	15,998	48,457	82,770	79,455	56,725	26,337	15,347	8,987	3,040
	Mínimo	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Máximo	20,300	44,800	43,500	89,000	172,500	417,300	449,500	208,500	108,500	76,500	110,000	58,500
	Desv. est.	4,356	6,693	7,933	21,111	44,599	82,462	84,559	53,527	24,426	16,752	18,513	9,425
	Coef. var.	2,286	3,343	1,885	1,320	0,920	0,996	1,064	0,944	0,927	1,092	2,060	3,101

Anexo D. Estadísticas de dispersión de los caudales medios mensuales (m³/s) registrados en las estaciones fluviométricas operativas al 2018 en Los Andes-San Felipe.

	Estadístico	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Río Aconcagua en San Felipe	Promedio	38,040	18,616	9,034	6,075	7,254	11,966	12,459	12,593	10,639	14,828	39,396	51,620
	Mínimo	2,080	1,440	0,510	0,180	0,040	0,100	1,440	0,230	0,170	0,070	0,030	0,210
	Máximo	144,980	80,570	43,920	23,820	38,160	52,160	49,670	72,680	44,090	41,060	127,010	149,330
	Desv. est.	38,334	19,587	10,154	5,447	6,950	10,617	9,547	13,338	10,936	13,081	26,875	39,905
	Coef. var.	1,008	1,052	1,124	0,897	0,958	0,887	0,766	1,059	1,028	0,882	0,682	0,773
Estero Pocuro en El Sifón	Promedio	0,538	0,392	0,305	0,328	0,467	0,857	1,157	1,481	1,496	1,398	1,315	0,878
	Mínimo	0,060	0,050	0,060	0,060	0,070	0,090	0,120	0,080	0,110	0,110	0,120	0,090
	Máximo	2,370	1,520	1,450	1,290	2,290	9,840	6,860	7,920	7,000	6,550	5,820	3,230
	Desv. est.	0,447	0,312	0,237	0,246	0,409	1,340	1,359	1,641	1,470	1,343	1,096	0,765
	Coef. var.	0,832	0,794	0,777	0,749	0,876	1,564	1,174	1,107	0,982	0,961	0,833	0,872
Río Aconcagua en Chacabuquito	Promedio	61,386	39,217	24,342	15,788	13,363	14,026	14,507	15,931	20,216	31,712	57,564	76,581
	Mínimo	17,250	15,360	5,920	6,450	5,590	4,850	4,880	5,470	6,560	7,410	12,110	14,500
	Máximo	214,390	131,000	64,130	37,240	43,250	47,610	39,760	49,950	46,380	84,540	146,780	197,310
	Desv. est.	40,161	21,001	10,085	5,689	5,750	7,282	6,826	8,062	9,271	14,298	26,447	45,388
	Coef. var.	0,654	0,535	0,414	0,360	0,430	0,519	0,471	0,506	0,459	0,451	0,459	0,593

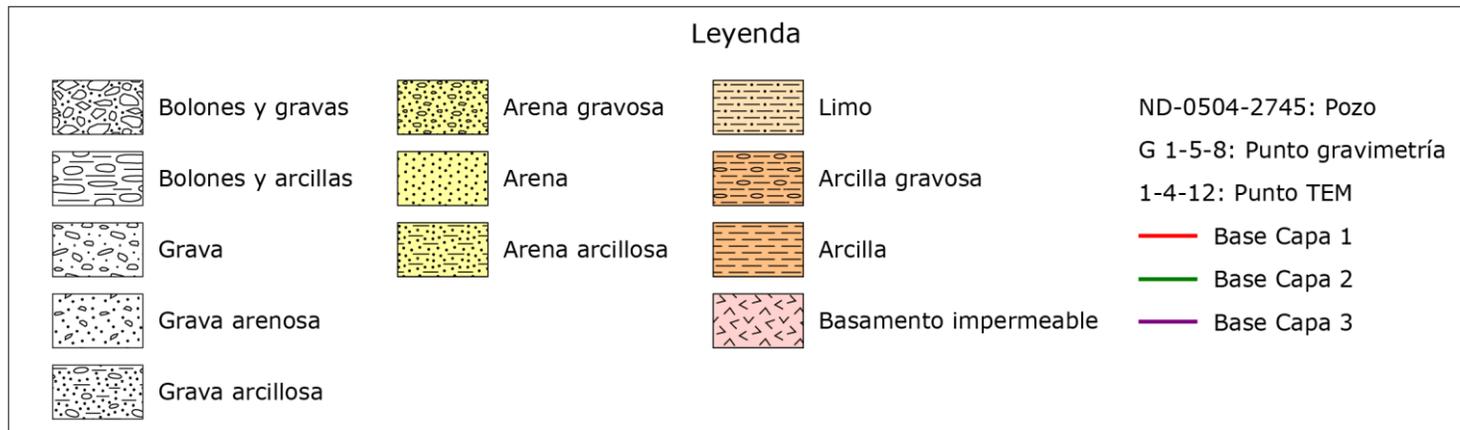
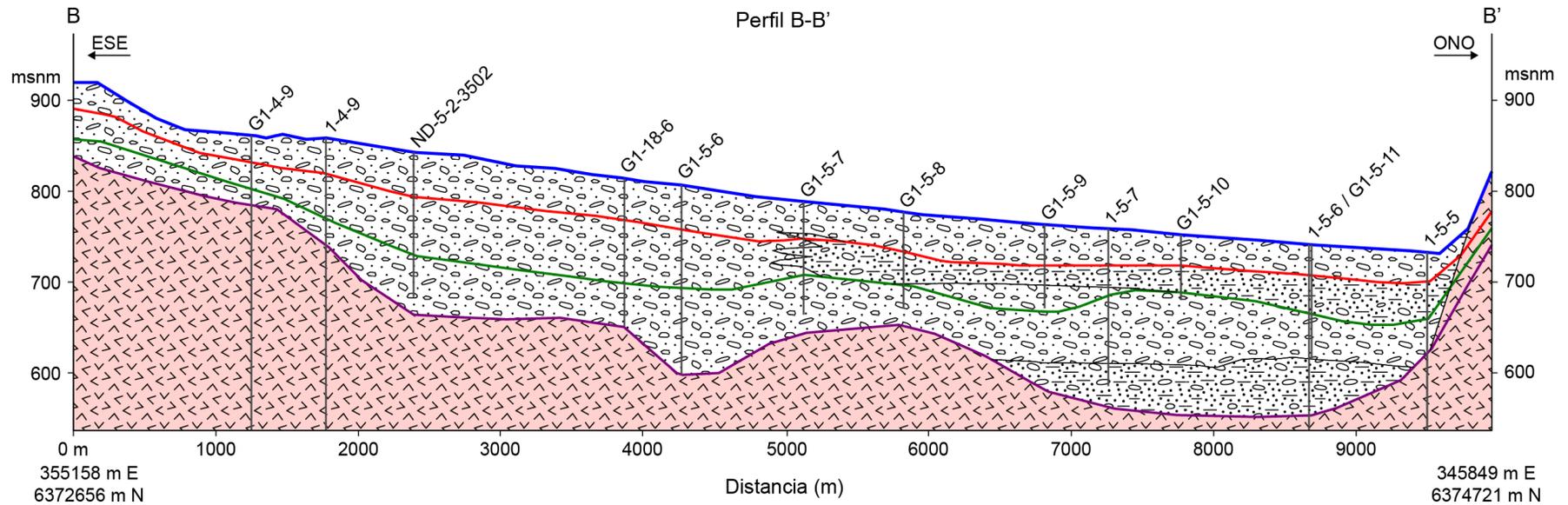
Anexo E. Perfiles geológicos propuestos por la DOH (2009) en Los Andes-San Felipe.

Anexo E-1. Perfil AA'.



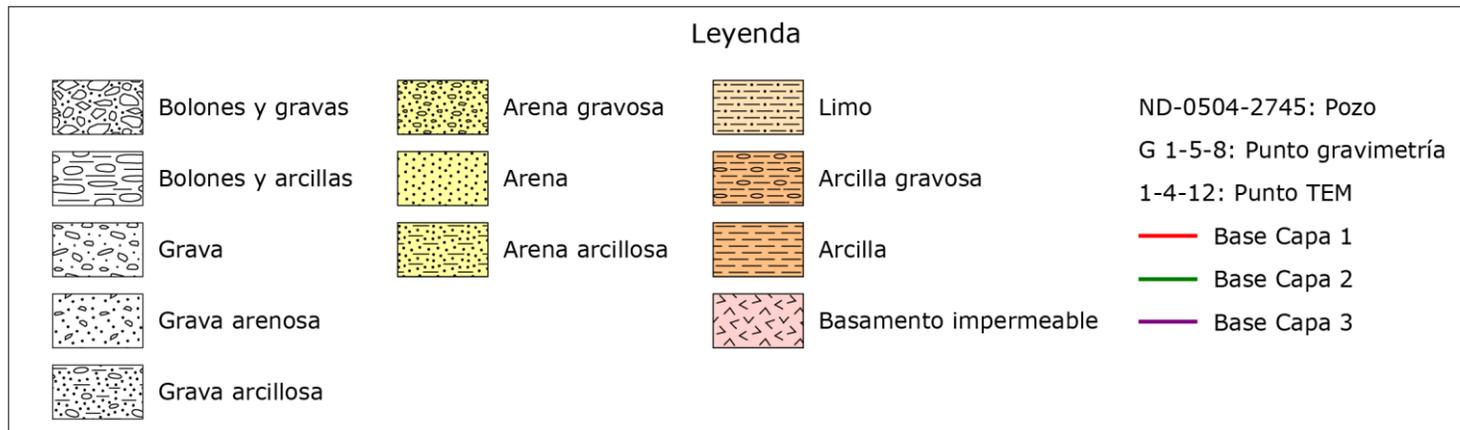
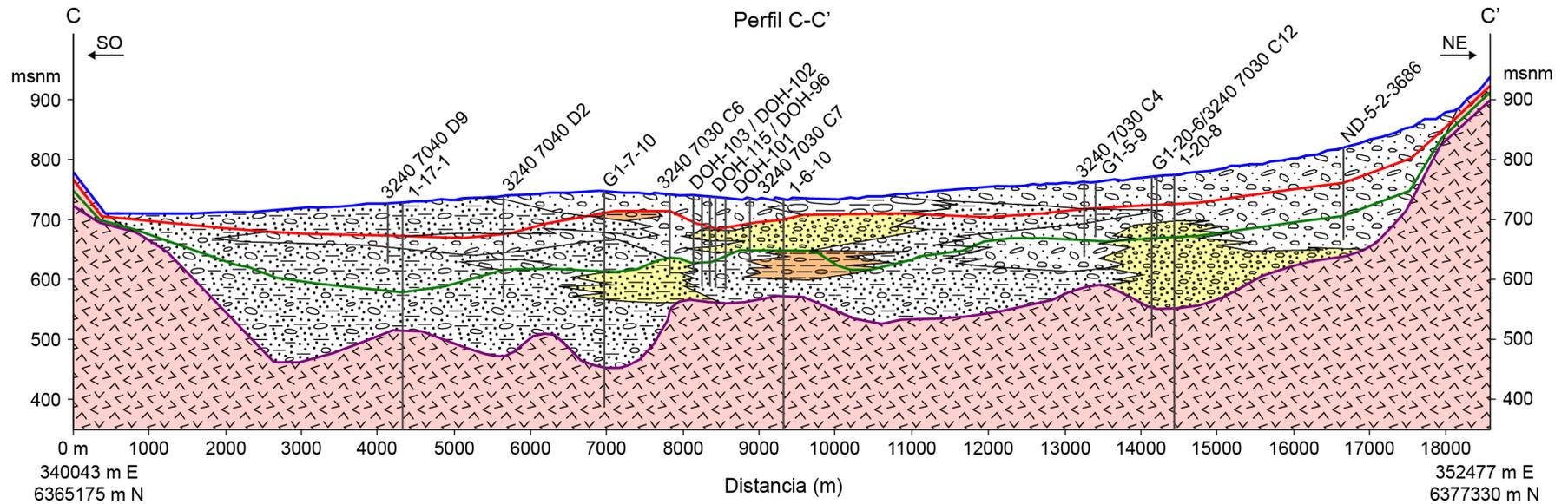
Las coordenadas extremas del perfil están expresadas en el sistema UTM, huso 19S, datum PSAD56.

Anexo E-2. Perfil BB'.



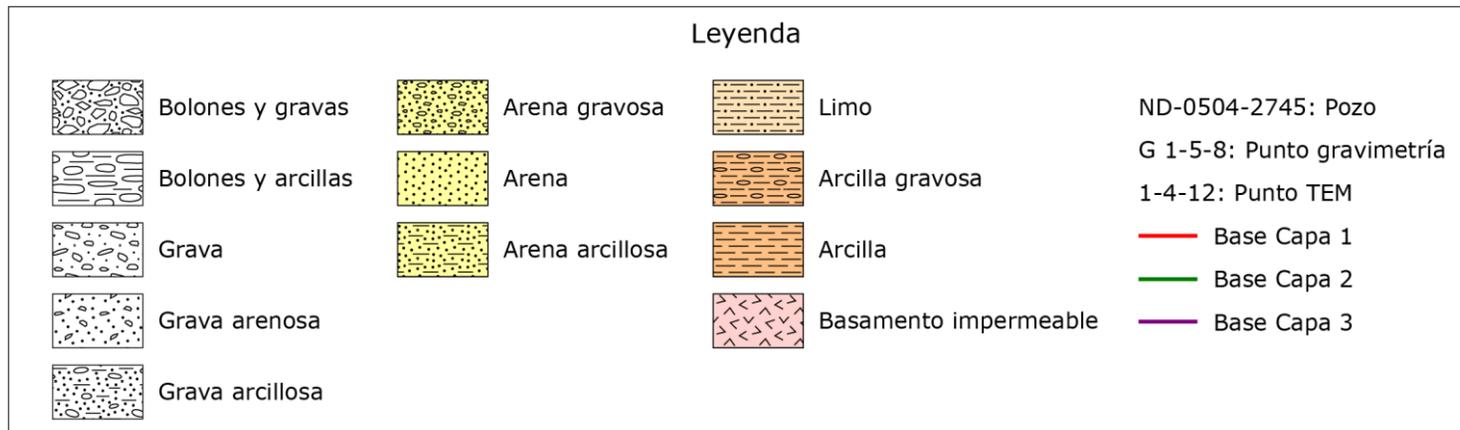
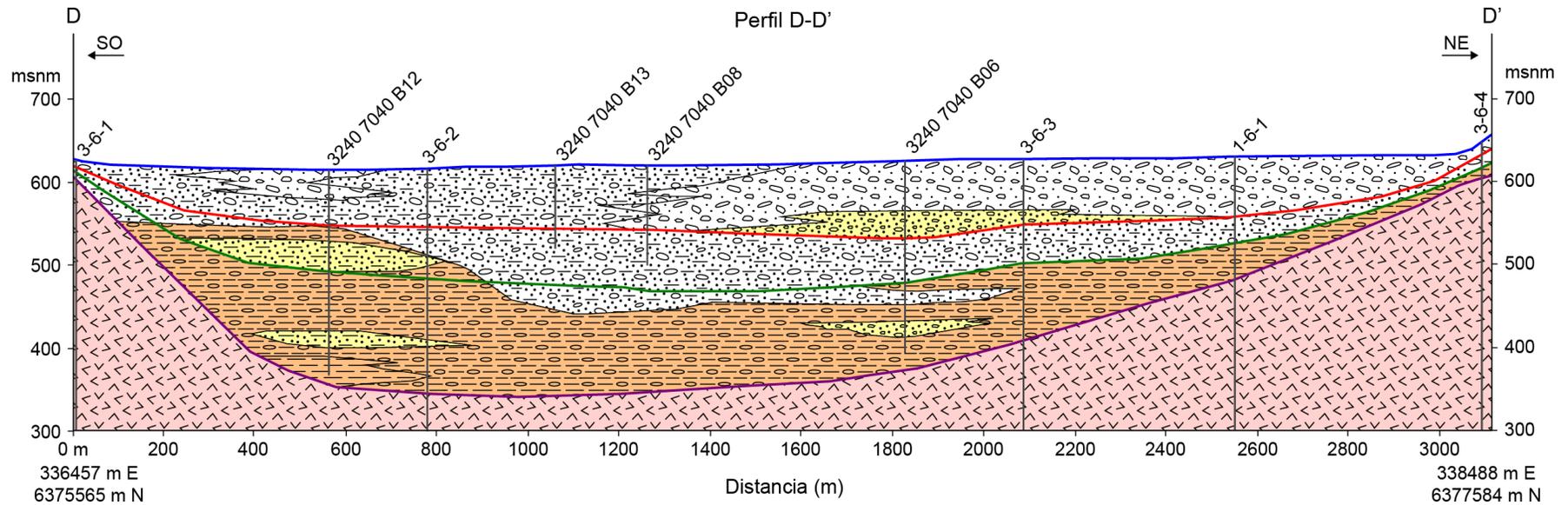
Las coordenadas extremas del perfil están expresadas en el sistema UTM, huso 19S, datum PSAD56.

Anexo E-3. Perfil CC'.



Las coordenadas extremas del perfil están expresadas en el sistema UTM, huso 19S, datum PSAD56.

Anexo E-4. Perfil DD'.



Las coordenadas extremas del perfil están expresadas en el sistema UTM, huso 19S, datum PSAD56.

Anexo F. Base de datos hidrogeoquímica: muestras de pozos (n°1- n°45) y agua superficial (n°46-n°53).

Anexo F-1. Identificación y ubicación de los puntos con hidrogeoquímica disponible en Los Andes-San Felipe.

ID	N°	Fuente de la información	Identificación	UTM 19S WGS84		Altitud [m s. n. m.]
				Este [m]	Norte [m]	
HQ001	1	Terreno CSIRO	ND-0503-3902	341634	6377835	672
HQ002	2	Terreno CSIRO	ND-0502-1125 Pozo 2	354965	6366124	891
HQ003	3	Terreno CSIRO	ND-0502-2564 Pozo 2	352870	6360351	918
HQ004	4	Terreno CSIRO	ND-0502-3794	349403	6364716	810
HQ005	5	Terreno CSIRO	ND-0502-3820 Pozo 2	357590	6367033	1111
HQ006	6	Terreno CSIRO	ND-0502-4472	341312	6362081	738
HQ007	7	Terreno CSIRO	ND-0503-2503	345886	6368871	766
HQ008	8	Terreno CSIRO	ND-0503-3371	345145	6371986	738
HQ009	9	Terreno CSIRO	ND-0503-3650	337989	6379141	629
HQ010	10	Terreno CSIRO	En trámite JPTC	354284	6370178	882
HQ011	11	Catastro DGA	ND-0502-1125 Pozo 2	354965	6366124	891
HQ012	12	Catastro DGA	ND-0502-1408 Pozo 1	352516	6366574	856
HQ013	13	Catastro DGA	ND-0502-2267	342447	6363624	736
HQ014	14	Catastro DGA	ND-0502-2363	340857	6363564	728
HQ015	15	Catastro DGA	ND-0502-3040	342060	6361540	741
HQ016	16	Catastro DGA	ND-0502-3212	347522	6360558	795
HQ017	17	Catastro DGA	ND-0502-3271	353707	6368216	875
HQ018	18	Catastro DGA	ND-0502-3326	343727	6362520	752
HQ019	19	Catastro DGA	ND-0502-3389	342150	6363588	735
HQ020	20	Catastro DGA	ND-0502-4451	344585	6363420	755
HQ021	21	Catastro DGA	ND-0502-4472	341312	6362081	738
HQ022	22	Catastro DGA	ND-0502-4492	354765	6366764	885
HQ023	23	Catastro DGA	ND-0503-2343	346217	6371326	755
HQ024	24	Catastro DGA	ND-0503-2392	334577	6376126	614
HQ025	25	Catastro DGA	ND-0503-2671	343073	6372971	706
HQ026	26	Catastro DGA	ND-0503-3284 Pozo 1	338101	6373064	654
HQ027	27	Catastro DGA	ND-0503-3284 Pozo 2	337541	6373444	648

ID	N°	Fuente de la información	Identificación	UTM 19S WGS84		Altitud [m s. n. m.]
				Este [m]	Norte [m]	
HQ028	28	Catastro DGA	ND-0503-3371	345145	6371986	738
HQ029	29	Catastro DGA	ND-0503-3573	342357	6377301	683
HQ030	30	Catastro DGA	ND-0503-3903	342897	6370136	726
HQ031	31	Catastro DGA	ND-0503-4083	343810	6373397	716
HQ032	32	Catastro DGA	VPC-0503-7 Pozo 1	346545	6378493	775
HQ033	33	Catastro DGA	VPC-0503-7 Pozo 2	346996	6378422	776
HQ034	34	CORFO 1969	3240 7030 A01 CELZAC N267	349396	6382754	975
HQ035	35	CORFO 1969	3240 7030 A08	348890	6382317	937
HQ036	36	CORFO 1969	3240 7030 C01 CORFO N833	345801	6366694	770
HQ037	37	CORFO 1969	3240 7030 C04 CORFO N597	348442	6373451	772
HQ038	38	CORFO 1969	3240 7030 C05 CORFO N640	346087	6371266	752
HQ039	39	CORFO 1969	3240 7040 B01 SACO N309	338050	6378696	625
HQ040	40	CORFO 1969	3240 7040 B02 CELZAC N768	336338	6379406	647
HQ041	41	CORFO 1969	3240 7040 D01	340242	6370783	693
HQ042	42	CORFO 1969	3240 7040 D02 CORFO N570	343567	6368576	739
HQ043	43	CORFO 1969	3240 7040 D06	338648	6373831	655
HQ044	44	CORFO 1969	3250 7040 B01 CORFO N526	342567	6363876	736
HQ045	45	Estaciones APR	APR El Higueral (05415010-5)	354254	6373396	904
HQ046	46	Estaciones DGA	Estero Pocuro en Asentamiento Cristo Redentor (05411003-0)	351700	6360106	800
HQ047	47	Estaciones DGA	Estero Pocuro en El Sifón (05411001-4)	355682	6356459	1000
HQ048	48	Estaciones DGA	Estero Quilpué antes Junta Río Aconcagua (05415001-6)	336137	6376959	530
HQ049	49	Estaciones DGA	Estero San Francisco antes Estero jahuel (05415003-2)	346765	6376666	700
HQ050	50	Estaciones DGA	Río Aconcagua en Chacabuquito (05410002-7)	358752	6364286	950
HQ051	51	Estaciones DGA	Río Aconcagua en Las Tinajas (05410022-1)	335027	6376293	632
HQ052	52	Estaciones DGA	Río Aconcagua en Los Andes (CA) (05410004-3)	351589	6367497	815
HQ053	53	Estaciones DGA	Río Aconcagua en San Felipe (05410005-1)	337335	6374251	650

Anexo F-2. Características de habilitación y fechas de muestreo de los puntos con hidrogeoquímica disponible en Los Andes-San Felipe.

N°	Fuente de la información	Profundidad de perforación [m]	Prof. mínima del cribado [m]	Prof. máxima del cribado [m]	Categoría cribado*	Fecha de muestreo			
						DD	MM	AAAA	Hora
1	Terreno CSIRO	155	45	152	CH4	21	11	2018	9:56
2	Terreno CSIRO	80	20	56.5	CH1	20	11	2018	11:25
3	Terreno CSIRO	87	10	87	CH2	29	11	2018	10:03
4	Terreno CSIRO	152	83	149	CH5	22	11	2018	15:32
5	Terreno CSIRO	290	109	286	CH5	29	11	2018	15:03
6	Terreno CSIRO	120	63	117	CH4	29	11	2018	17:09
7	Terreno CSIRO	117	79	115	CH5	21	11	2018	11:54
8	Terreno CSIRO	120	61	117	CH4	21	11	2018	15:24
9	Terreno CSIRO	42	15	39	CH1	20	11	2018	17:13
10	Terreno CSIRO	114	97	114	CH5	23	11	2018	15:37
11	Catastro DGA	80	20	56.5	CH1	23	4	1989	-
12	Catastro DGA	53	20	50	CH1	19	1	1995	-
13	Catastro DGA	100	35	87	CH2	31	5	1996	14:00
14	Catastro DGA	100	35	98	CH2	6	11	1996	-
15	Catastro DGA	90	58	88	CH3	22	10	1998	8:30
16	Catastro DGA	115	82	111	CH5	4	10	1998	9:00
17	Catastro DGA	120	57	117	CH4	1	2	1999	-
18	Catastro DGA	100	43	97	CH2	27	10	1998	-
19	Catastro DGA	90	45	87	CH2	14	7	1999	-
20	Catastro DGA	100	37	97	CH2	17	2	1997	-
21	Catastro DGA	120	63	117	CH4	19	2	2004	20:00
22	Catastro DGA	50	14.68	42.33	CH1	15	3	2002	12:15
23	Catastro DGA	94.3	76	93	CH3	13	2	1997	20:00
24	Catastro DGA	31	15	30	CH1	27	4	1997	-
25	Catastro DGA	100	48	96	CH2	21	10	1997	-
26	Catastro DGA	80	47	77	CH2	7	11	1990	8:00
27	Catastro DGA	73	22	70	CH2	27	10	1998	-

* Categorías definidas en la Tabla 5.

N°	Fuente de la información	Profundidad de perforación [m]	Prof. mínima del cribado [m]	Prof. máxima del cribado [m]	Categoría cribado*	Fecha de muestreo			
						DD	MM	AAAA	Hora
28	Catastro DGA	120	61	117	CH4	26	10	1998	18:30
29	Catastro DGA	149	103	146	CH5	22	10	1999	-
30	Catastro DGA	104	71.92	101.92	CH3	25	7	1990	19:00
31	Catastro DGA	101	44	98	CH2	5	9	1997	-
32	Catastro DGA	107.5	54	100	CH3	14	11	2008	13:40
33	Catastro DGA	109	74	100	CH3	11	9	2009	9:50
34	CORFO 1969	75	-	73.07	CH2	26	5	1968	-
35	CORFO 1969	72	-	33.5	CH1	11	12	1966	-
36	CORFO 1969	120	89.42	116.35	CH5	26	5	1968	-
37	CORFO 1969	125	-	93.92	CH2	25	1	1967	-
38	CORFO 1969	126	64	98	CH3	15	11	1967	-
39	CORFO 1969	30	21.20	29.70	CH1	25	10	1966	-
40	CORFO 1969	45	-	45	CH1	19	8	1969	-
41	CORFO 1969	40	-	-	CH1	26	5	1968	-
42	CORFO 1969	171	66	95	CH3	15	3	1967	-
43	CORFO 1969	63	-	58	CH1	4	6	1963	-
44	CORFO 1969	120	48.06	97.01	CH2	28	7	1965	-
45	Estaciones APR	40	5.2	34.2	CH1	30	10	2018	12:25
46	Estaciones DGA	0	0	0	CH0	4	12	1981	11:00
47	Estaciones DGA	0	0	0	CH0	5	10	2006	14:18
48	Estaciones DGA	0	0	0	CH0	19	10	2006	14:10
49	Estaciones DGA	0	0	0	CH0	25	10	1983	16:05
50	Estaciones DGA	0	0	0	CH0	3	10	2006	9:18
51	Estaciones DGA	0	0	0	CH0	19	10	2006	14:49
52	Estaciones DGA	0	0	0	CH0	25	10	1983	14:05
53	Estaciones DGA	0	0	0	CH0	6	10	2006	13:37

* Categorías definidas en la Tabla 5.

Anexo F-3. Parámetros fisicoquímicos y constituyentes mayoritarios en los puntos con hidrogeoquímica disponible en Los Andes-San Felipe.

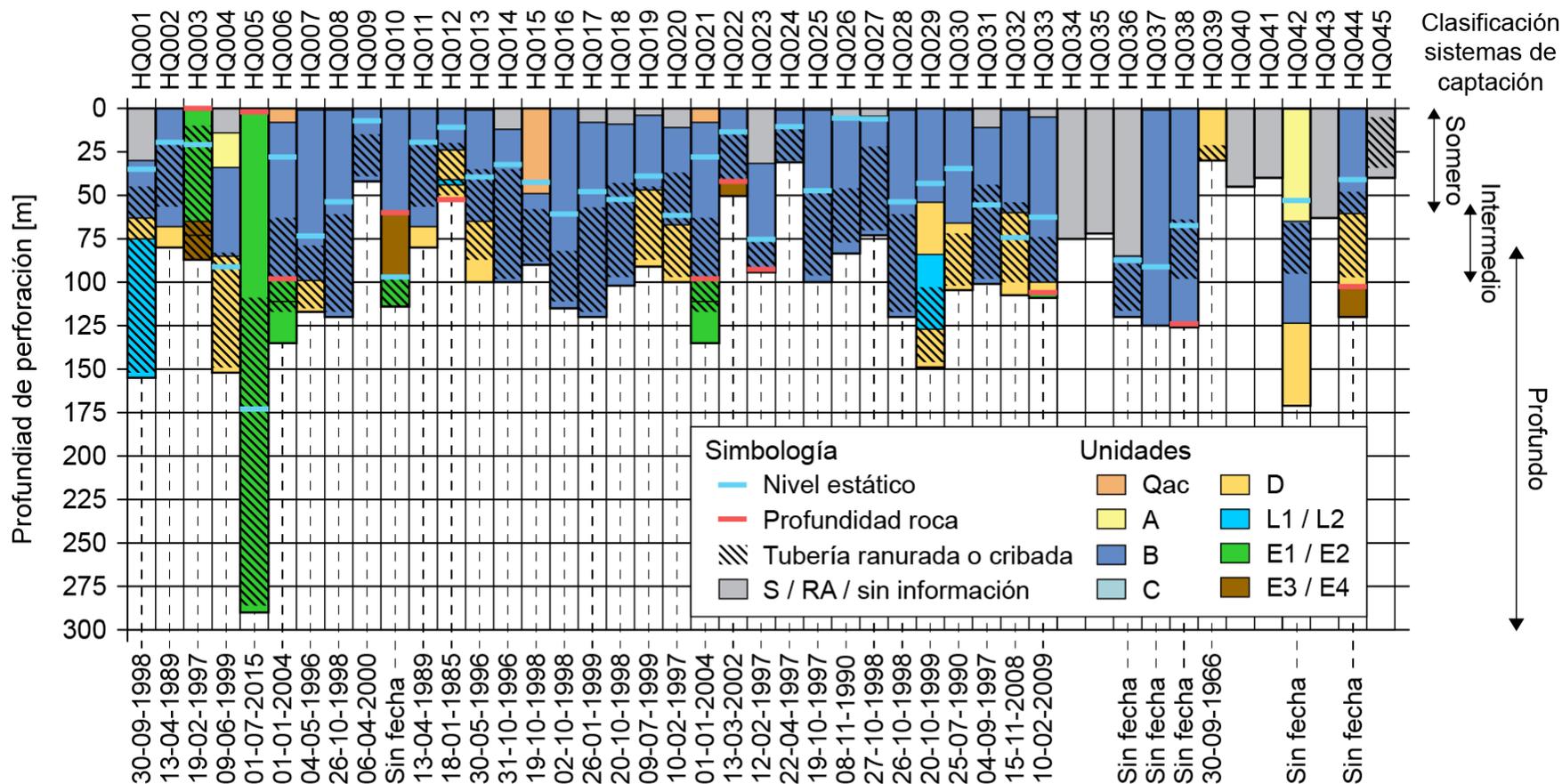
N°	T [°C]	pH	CE [μS/cm]	Eh [mV]	Dureza [mg/l de CaCO3]	Alc. [mg/l de CaCO3]	TDS* [mg/l]	Constituyentes químicos [mg/l]									
								Mg	Ca	Na	K	HCO3	CO3	Cl	F	SO4	NO3
1	19.1	7.56	678	-20	280.2	143.0	<u>501</u>	11.8	92.4	25.0	1.32	174.4	0.00	18.5	0.013	95.0	57.6
2	14.3	7.15	706	168	297.0	169.0	<u>522</u>	12.5	98.0	15.9	1.31	206.1	0.00	28.0	0.033	115.0	8.8
3	19.4	7.42	560	22	229.1	155.0	<u>414</u>	10.3	74.4	25.8	0.05	189.0	0.00	5.9	0.029	82.4	11.7
4	18.5	7.36	733	-95	332.3	178.0	<u>542</u>	16.9	104.8	22.4	0.73	217.0	0.00	18.7	0.021	107.1	31.3
5	22.2	7.64	401	75	151.9	127.0	<u>297</u>	8.1	47.2	21.1	0.07	154.8	0.00	14.0	0.018	24.7	12.4
6	19.3	7.22	725	88	276.4	199.0	<u>536</u>	13.8	87.6	35.8	0.99	242.6	0.00	21.5	0.022	95.7	8.7
7	15.5	7.36	737	80	367.3	178.0	<u>545</u>	15.3	121.4	11.9	1.99	217.0	0.00	28.7	0.025	120.4	22.4
8	16.6	7.33	690	53	326.0	143.0	<u>510</u>	17.7	100.9	12.7	2.31	174.4	0.00	20.8	0.014	117.1	28.7
9	18.3	7.13	904	83	419.4	185.0	<u>669</u>	28.4	120.4	27.4	0.95	225.6	0.00	38.1	0.013	139.2	42.4
10	18.0	7.24	766	103	346.9	198.0	<u>566</u>	16.1	112.0	25.5	1.66	241.4	0.00	26.8	0.016	112.1	12.1
11	22.0	7.35	590	-	328.8	228.0	<u>405</u>	17.6	102.2	23.5	1.60	278.0	0.00	28.6	0.150	98.0	1.5
12	27.0	7.50	350	-	157.3	30.0	<u>275</u>	0.3	62.4	34.1	1.70	26.8	4.80	64.3	0.180	136.8	0.8
13	19.0	7.30	685	-	516.7	272.5	<u>485</u>	43.6	134.0	24.5	1.70	332.3	0.00	30.8	0.230	160.4	2.8
14	20.0	7.00	560	-	419.8	257.9	<u>405</u>	37.4	105.6	32.8	1.20	314.5	0.00	49.2	0.070	114.0	3.0
15	22.5	7.60	801	-	377.9	-	<u>704</u>	9.7	135.0	54.0	0.60	374.8	0.00	29.4	0.020	157.0	0.8
16	24.2	7.92	546	-	260.8	-	<u>420</u>	3.9	97.8	35.3	0.97	337.7	0.00	9.9	0.030	73.3	3.7
17	26.0	7.60	530	-	316.8	172.6	<u>365</u>	23.0	88.4	11.1	0.43	210.4	0.00	51.1	0.100	130.0	2.0
18	25.0	8.00	640	-	327.0	241.3	<u>475</u>	37.5	68.3	11.1	0.26	268.9	12.47	41.8	0.090	147.5	4.0
19	18.0	7.20	560	-	325.9	253.8	<u>410</u>	16.0	103.7	18.8	0.43	309.5	0.00	17.0	0.130	124.5	1.9
20	25.0	7.40	540	-	440.1	257.9	<u>420</u>	35.3	117.2	23.5	1.20	314.5	0.00	42.5	0.200	138.5	4.2
21	26.8	7.35	749	-	290.8	275.0	<u>535</u>	12.8	95.0	22.9	1.75	335.3	0.00	23.2	0.046	111.1	3.4
22	25.0	7.60	500	-	272.2	167.5	<u>350</u>	3.7	102.7	11.6	0.76	204.2	0.00	26.8	0.280	101.0	3.1
23	25.0	7.60	630	-	419.7	200.6	<u>510</u>	28.0	121.2	16.4	1.90	244.6	0.00	66.7	0.300	138.8	4.9
24	23.0	7.40	650	-	373.8	213.8	<u>470</u>	13.7	126.7	19.4	2.20	260.7	0.00	55.4	0.190	132.0	3.8
25	20.0	7.40	660	-	447.4	218.4	<u>470</u>	16.0	152.3	17.9	2.40	266.3	0.00	68.1	0.110	167.5	5.3
26	19.0	7.40	700	-	365.4	249.0	<u>495</u>	13.0	124.5	18.9	2.20	303.6	0.00	19.6	0.500	125.0	3.7
27	25.0	8.10	700	-	367.4	249.6	<u>490</u>	38.2	83.3	10.2	0.48	273.8	14.99	51.1	0.100	131.3	4.6

* Los valores subrayados en el campo TSD fueron calculados a partir de la CE.

N°	T [°C]	pH	CE [μS/cm]	Eh [mV]	Dureza [mg/l de CaCO3]	Alc. [mg/l de CaCO3]	TDS* [mg/l]	Constituyentes químicos [mg/l]									
								Mg	Ca	Na	K	HCO3	CO3	Cl	F	SO4	NO3
28	25.0	7.79	596	-	321.7	-	458	5.8	119.0	16.7	3.40	267.8	0.00	19.6	0.050	105.0	2.3
29	22.3	7.77	570	-	297.1	-	438	10.7	101.0	19.8	2.10	272.3	0.00	14.0	0.070	113.0	4.3
30	17.0	7.60	870	-	312.9	155.0	615	27.7	79.0	17.3	1.30	189.0	0.00	83.8	0.300	78.0	-
31	20.0	7.40	650	-	327.9	199.7	490	24.1	91.0	17.4	2.50	243.5	0.00	33.6	0.110	141.5	5.9
32	23.0	7.53	-	-	-	-	230	6.4	-	-	-	-	-	6.6	0.050	12.3	11.8
33	-	-	412	-	-	-	<u>305</u>	-	-	-	-	-	-	8.7	0.050	36.2	-
34	-	-	-	-	109.0	-	174	4.1	37.0	15.0	0.70	150.0	0.00	2.1	-	12.0	0.1
35	-	-	-	-	214.0	-	368	14.0	62.0	-	-	234.0	-	9.0	-	68.0	0.3
36	-	-	-	-	277.0	-	400	12.0	91.0	12.0	2.10	150.0	0.00	22.0	-	130.0	19.0
37	-	-	-	-	217.0	-	296	12.0	67.0	13.0	0.80	195.0	0.00	9.1	-	70.0	0.3
38	-	-	-	-	32.0	-	438	14.0	105.0	14.0	2.80	248.0	0.00	17.0	-	111.0	18.0
39	-	-	-	-	358.0	-	582	29.0	90.0	-	-	298.0	-	25.0	-	148.0	0.1
40	-	-	-	-	202.0	-	283	5.8	71.0	12.0	0.60	177.0	0.00	11.0	-	58.0	12.0
41	-	-	-	-	365.0	-	498	16.0	120.0	15.0	2.30	272.0	0.00	20.0	-	127.0	19.0
42	-	-	-	-	211.0	-	325	13.0	63.0	14.0	2.60	113.0	0.00	17.0	-	115.0	13.0
43	-	-	-	-	255.0	-	389	13.0	81.0	-	-	171.0	-	20.0	-	86.0	1.5
44	-	-	-	-	344.0	-	460	20.0	105.0	16.0	3.60	295.0	0.00	17.0	-	105.0	5.3
45	17.2	7.37	-	-	-	-	160	5.1	-	-	-	-	-	3.1	0.109	32.1	18.2
46	18.0	7.30	377	-	154.2	-	<u>279</u>	9.4	46.1	9.2	4.69	70.2	0.00	15.6	-	96.1	-
47	13.3	7.87	267	-	109.6	-	<u>198</u>	4.5	36.4	9.0	0.17	110.9	0.00	2.8	-	37.8	3.0
48	14.5	8.04	311	-	114.2	-	<u>230</u>	4.9	37.6	9.4	1.90	58.0	0.00	11.8	-	61.0	1.7
49	19.2	7.10	170	-	73.8	-	<u>126</u>	3.9	23.0	5.1	0.78	43.3	0.00	8.5	-	36.0	-
50	8.6	7.84	296	-	108.6	-	<u>219</u>	4.3	36.2	9.5	1.24	54.1	0.00	14.3	-	55.1	1.3
51	16.9	8.04	374	-	136.9	-	<u>277</u>	4.7	46.9	11.8	1.95	77.3	0.00	17.0	-	72.2	3.0
52	12.5	7.15	186	-	100.4	-	<u>138</u>	3.9	33.7	5.5	1.17	74.4	0.00	8.5	-	38.4	-
53	15.2	7.97	343	-	128.7	-	<u>254</u>	5.1	42.9	11.8	1.66	63.8	0.00	16.3	-	69.6	1.9

* Los valores subrayados en el campo TSD fueron calculados a partir de la CE.

Anexo G. Características principales de los pozos de la base de datos hidrogeoquímica.



A la derecha del gráfico se indica la clasificación de los pozos en función de la profundidad del cribado (Tabla 5). Debajo del gráfico se indica la fecha de medición (formato DD-MM-AAAA) del nivel estático de cada pozo. Notar que hay tres pares de muestras que comparten pozo: n°2-n°11, n°6-n°21 y n°8-n°28. S: suelo. RA: relleno artificial.

Anexo H. Lista de pozos con registro estratigráfico disponible en Los Andes-San Felipe.

Nro.	Fuente	Identificación	UTM 19S WGS84		Largo del pozo [m]	Prof. roca [m]	Prof. roca c/criba [m]
			Este [m]	Norte [m]			
P001	Catastro DGA	ND-0502-1125 Pozo 1	354891	6366264	80	-	-
P002	Catastro DGA	ND-0502-1125 Pozo 2	354965	6366124	80	-	-
P003	Catastro DGA	ND-0502-1408 Pozo 1	352516	6366574	53	52,5	-
P004	Catastro DGA	ND-0502-1695	352717	6366146	60	-	-
P005	Catastro DGA	ND-0502-2179	350732	6360290	45	36	36
P006	Catastro DGA	ND-0502-2267	342447	6363624	100	-	-
P007	Catastro DGA	ND-0502-2363	340857	6363564	100	-	-
P008	Catastro DGA	ND-0502-2564 Pozo 1	353140	6360377	96	16	20
P009	Catastro DGA	ND-0502-2564 Pozo 2	352870	6360351	87	0	10
P010	Catastro DGA	ND-0502-2564 Pozo 3	352461	6360306	80	1	4
P011	Catastro DGA	ND-0502-2591	352617	6366326	66	-	-
P012	Catastro DGA	ND-0502-2922	351289	6360578	90	84	84
P013	Catastro DGA	ND-0502-2978	355167	6365696	103	-	-
P014	Catastro DGA	ND-0502-2994	342871	6361600	104	-	-
P015	Catastro DGA	ND-0502-3040	342060	6361540	90	-	-
P016	Catastro DGA	ND-0502-3178	351393	6367472	100	-	-
P017	Catastro DGA	ND-0502-3212	347522	6360558	115	-	-
P018	Catastro DGA	ND-0502-3271	353707	6368216	120	-	-
P019	Catastro DGA	ND-0502-3302	346292	6364526	128	-	-
P020	Catastro DGA	ND-0502-3326	343727	6362520	102	-	-
P021	Catastro DGA	ND-0502-3330	348017	6365276	121	-	-
P022	Catastro DGA	ND-0502-3389	342150	6363588	91	-	-
P023	Catastro DGA	ND-0502-3503	352727	6372796	160	-	-
P024	Catastro DGA	ND-0502-3599 Pozo 1	339167	6367426	71	48	48
P025	Catastro DGA	ND-0502-3686	351117	6375426	145	-	-
P026	Catastro DGA	ND-0502-3702	350956	6360959	100	-	-
P027	Catastro DGA	ND-0502-3794	349403	6364716	152	-	-
P028	Catastro DGA	ND-0502-3820 Pozo 1	357352	6365174	125	122	-
P029	Catastro DGA	ND-0502-3820 Pozo 2	357590	6367033	290	2	109
P030	Catastro DGA	ND-0502-3937	341249	6361323	77	75	-
P031	Catastro DGA	ND-0502-3938	341567	6363056	112	-	-
P032	Catastro DGA	ND-0502-4046 Pozo A	348981	6364764	185	-	-
P033	Catastro DGA	ND-0502-4046 Pozo B	349081	6364704	200	-	-
P034	Catastro DGA	ND-0502-4049 Pozo 1	349071	6364739	180	-	-
P035	Catastro DGA	ND-0502-4049 Pozo 2	349201	6364634	170	-	-
P036	Catastro DGA	ND-0502-4049 Pozo 3	349221	6364494	185	-	-
P037	Catastro DGA	ND-0502-4233	342861	6363830	87	-	-
P038	Catastro DGA	ND-0502-4380	354340	6369533	79	-	-
P039	Catastro DGA	ND-0502-4448	345909	6362058	115	-	-
P040	Catastro DGA	ND-0502-4449	346917	6361926	127	-	-
P041	Catastro DGA	ND-0502-4450	354873	6370047	145	-	-
P042	Catastro DGA	ND-0502-4451	344585	6363420	100	-	-
P043	Catastro DGA	ND-0502-4472	341312	6362081	135	98	99
P044	Catastro DGA	ND-0502-4492	354765	6366764	50	42	-
P045	Catastro DGA	ND-0503-2343	346217	6371326	94	93	-
P046	Catastro DGA	ND-0503-2392	334577	6376126	31	-	-
P047	Catastro DGA	ND-0503-2503	345886	6368871	117	-	-
P048	Catastro DGA	ND-0503-2559	339687	6372171	25	-	-
P049	Catastro DGA	ND-0503-2670	337556	6376607	231	-	-
P050	Catastro DGA	ND-0503-2671	343073	6372971	100	-	-
P051	Catastro DGA	ND-0503-2892	340717	6376061	58	-	-
P052	Catastro DGA	ND-0503-2893	339767	6376676	50	-	-
P053	Catastro DGA	ND-0503-2973	347291	6376554	133	-	-
P054	Catastro DGA	ND-0503-3251	342261	6377819	59	57	-
P055	Catastro DGA	ND-0503-3253	341841	6377894	151	-	-
P056	Catastro DGA	ND-0503-3284 Pozo 1	338101	6373064	84	-	-
P057	Catastro DGA	ND-0503-3284 Pozo 2	337541	6373444	73	-	-
P058	Catastro DGA	ND-0503-3306	346691	6372799	117	-	-
P059	Catastro DGA	ND-0503-3371	345145	6371986	80	-	-
P060	Catastro DGA	ND-0503-3536	339273	6374097	50	-	-

Nro.	Fuente	Identificación	UTM 19S WGS84		Largo del pozo [m]	Prof. roca [m]	Prof. roca c/criba [m]
			Este [m]	Norte [m]			
P061	Catastro DGA	ND-0503-3573	342357	6377301	149	-	-
P062	Catastro DGA	ND-0503-3650	337989	6379141	42	-	-
P063	Catastro DGA	ND-0503-3652	346817	6375426	96	-	-
P064	Catastro DGA	ND-0503-3716	339767	6370226	61	-	-
P065	Catastro DGA	ND-0503-3901	345227	6369546	101	-	-
P066	Catastro DGA	ND-0503-3902	341634	6377835	155	-	-
P067	Catastro DGA	ND-0503-3903	342897	6370136	105	-	-
P068	Catastro DGA	ND-0503-4041	341224	6377855	110	-	-
P069	Catastro DGA	ND-0503-4042	341191	6378124	110	-	-
P070	Catastro DGA	ND-0503-4083	343810	6373397	101	-	-
P071	Catastro DGA	ND-0503-4305	341850	6376300	52	-	-
P072	Catastro DGA	ND-0503-4636	344527	6375557	60	-	-
P073	Catastro DGA	ND-0503-4638	339733	6371234	23	-	-
P074	Catastro DGA	ND-0503-4639	341474	6371571	117	-	-
P075	Catastro DGA	NR-0502-918	348853	6367260	160	-	-
P076	Catastro DGA	VPC-0502-13	343316	6360735	105	56	-
P077	Catastro DGA	VPC-0503-7 Pozo 1	346545	6378493	108	-	-
P078	Catastro DGA	VPC-0503-7 Pozo 2	346996	6378422	109	106	-
P079	Catastro DGA (en trámite)	En trámite JPTC	354284	6370178	114	60	97
P080	Dictuc 2009	P103-S1 DOH	345090	6370377	131	123	-
P081	Dictuc 2009	SRP-1	347930	6360315	200	170	-
P082	Dictuc 2009	SRP-2	348202	6360528	167	141	-
P083	Dictuc 2009	SRP-3	349830	6361103	40	1	-
P084	Ingedos 2006	3240 7030 A10 CORFO N1329	346545	6376002	80	-	-
P085	Ingedos 2006	3240 7030 C01 CORFO N833	345801	6366694	120	-	-
P086	Ingedos 2006	3240 7030 C04 CORFO N597	348442	6373451	125	-	-
P087	Ingedos 2006	3240 7030 C05 CORFO N640	346087	6371266	126	124	-
P088	Ingedos 2006	3240 7030 C06 CORFO N751	345147	6370041	221	-	-
P089	Ingedos 2006	3240 7030 C07 CORFO N787	345417	6371076	105	-	-
P090	Ingedos 2006	3240 7030 C09 CORFO N1292	347051	6370546	93	-	-
P091	Ingedos 2006	3240 7030 C10 CORFO N1297	346652	6368595	120	-	-
P092	Ingedos 2006	3240 7030 C11 CORFO N1325	348395	6366241	133	-	-
P093	Ingedos 2006	3240 7030 C12 CORFO N1330	349247	6373977	106	-	-
P094	Ingedos 2006	3240 7030 D05 CAS N914	354897	6366251	78	-	-
P095	Ingedos 2006	3240 7030 D06 CAS N915	354897	6366210	80	-	-
P096	Ingedos 2006	3240 7030 D07 CORFO N1307	352178	6372305	140	-	-
P097	Ingedos 2006	3240 7030 D08 CELZAC N1134	354841	6366328	80	-	-
P098	Ingedos 2006	3240 7040 B01 SACO N309	338050	6378696	30	-	-
P099	Ingedos 2006	3240 7040 B05 CORFO N850	341202	6376757	81	-	-
P100	Ingedos 2006	3240 7040 B06 CORFO N1064	337445	6376549	231	-	-
P101	Ingedos 2006	3240 7040 B08 CORFO N1136	336987	6376217	120	-	-
P102	Ingedos 2006	3240 7040 B10 CORFO N1172	336817	6374926	156	-	-
P103	Ingedos 2006	3240 7040 B11 CORFO N1272	336506	6375704	90	-	-
P104	Ingedos 2006	3240 7040 B12 CORFO N1171	336597	6375646	246	-	-
P105	Ingedos 2006	3240 7040 B13 CORFO N1281	336917	6376026	100	-	-
P106	Ingedos 2006	3240 7040 B22 CELZAC N1505	337027	6375927	65	-	-
P107	Ingedos 2006	3240 7040 D02 CORFO N570	343567	6368576	171	-	-
P108	Ingedos 2006	3240 7040 D09 CELZAC N972	343092	6367336	100	-	-
P109	Ingedos 2006	3240 7040 D10 CELZAC N939	343400	6370278	90	-	-
P110	Ingedos 2006	3240 7040 D11 CELZAC N955	342567	6369326	80	-	-
P111	Ingedos 2006	3240 7040 D12 CELZAC N1009	338968	6371527	47	-	-
P112	Ingedos 2006	3240 7040 D15 CORFO N1197	337934	6374432	55	-	-
P113	Ingedos 2006	3250 7030 A01 SACO N337	346273	6364455	128	-	-
P114	Ingedos 2006	3250 7040 B01 CORFO N526	342567	6363876	120	103	-
P115	Ingedos 2006	3250 7040 B02 CORFO N792	343030	6365196	90	-	-
P116	Ingedos 2006	ND-0502-4462	345257	6362097	110	94	94
P117	Ingedos 2006	ND-0502-4466	354382	6374530	121	-	-
P118	Ingedos 2006	ND-0503-2310	339815	6375009	58	-	-
P119	Ingedos 2006	ND-0503-906	346817	6375626	90	-	-

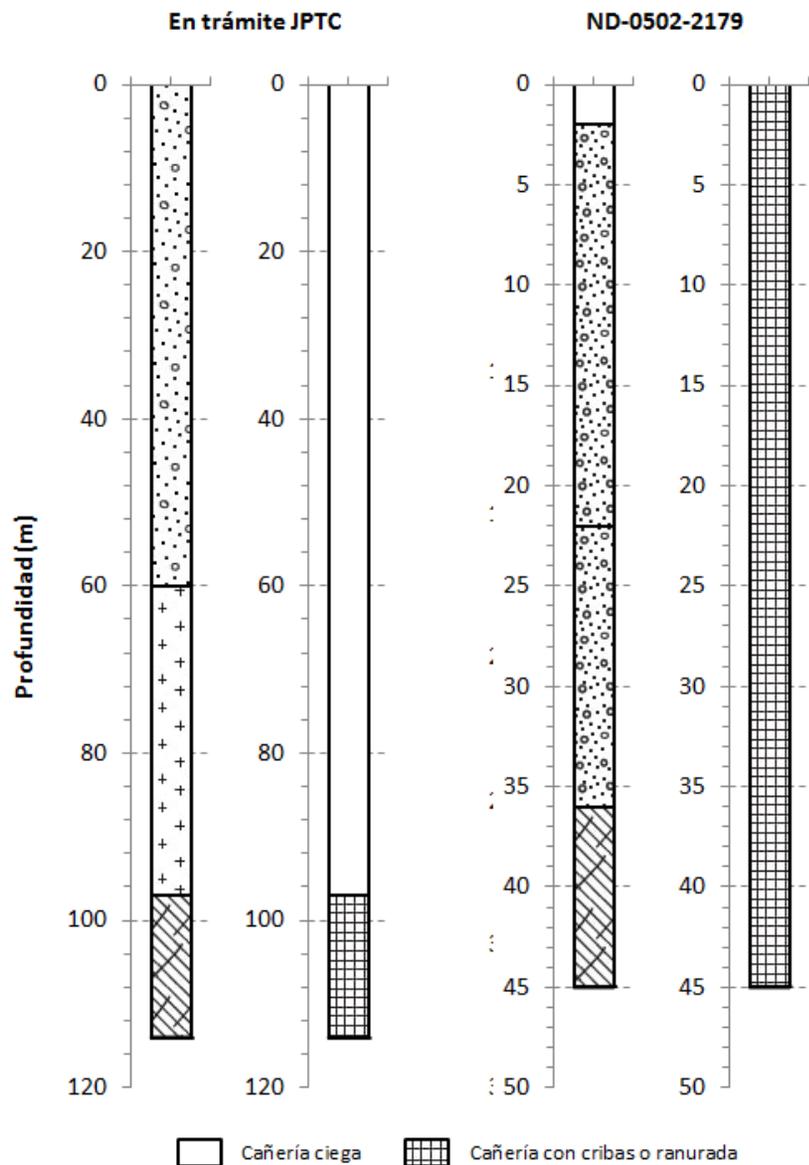
Anexo I. Resultados del balance iónico. Las últimas dos columnas a la derecha indican si se cumplen los criterios citados en el texto.

Nº	Fuente de la información	Σ cationes [mEq/l]	Σ aniones [mEq/l]	Error [%]	CE [µS/cm]	Criterio Σ aniones	Criterio CE
1	Terreno CSIRO 2018	6.70	6.29	3.20	678	x	√
2	Terreno CSIRO 2018	6.64	6.70	0.44	706	√	√
3	Terreno CSIRO 2018	5.69	5.17	4.78	560	x	√
4	Terreno CSIRO 2018	7.61	6.82	5.50	733	x	√
5	Terreno CSIRO 2018	3.95	3.65	3.89	401	x	√
6	Terreno CSIRO 2018	7.09	6.72	2.71	725	x	√
7	Terreno CSIRO 2018	7.89	7.23	4.30	737	x	√
8	Terreno CSIRO 2018	7.10	6.35	5.62	690	x	√
9	Terreno CSIRO 2018	9.56	8.35	6.73	904	x	x / √
10	Terreno CSIRO 2018	8.06	7.24	5.37	766	x	√
11	Catastro DGA	7.61	7.43	1.22	590	√	√
12	Catastro DGA	4.67	5.27	6.13	350	x	√
13	Catastro DGA	11.38	9.70	7.99	685	x	x / √
14	Catastro DGA	9.80	8.96	4.48	560	x	√
15	Catastro DGA	9.90	10.25	1.75	801	√	√
16	Catastro DGA	6.76	7.40	4.52	546	x	√
17	Catastro DGA	6.80	7.63	5.76	530	x	√
18	Catastro DGA	6.98	9.14	13.35	640	x	x
19	Catastro DGA	7.32	8.17	5.51	560	x	√
20	Catastro DGA	9.81	9.30	2.63	540	x	√
21	Catastro DGA	6.84	8.52	10.95	749	x	x
22	Catastro DGA	5.95	6.26	2.48	500	x	√
23	Catastro DGA	9.11	8.86	1.42	630	√	√
24	Catastro DGA	8.35	8.64	1.73	650	√	√
25	Catastro DGA	9.76	9.86	0.52	660	√	√
26	Catastro DGA	8.16	8.19	0.18	700	√	√
27	Catastro DGA	7.76	9.24	8.71	700	x	x / √
28	Catastro DGA	7.23	7.16	0.45	596	√	√
29	Catastro DGA	6.84	7.28	3.14	570	x	√
30	Catastro DGA	7.01	7.09	0.55	870	√	√
31	Catastro DGA	7.35	7.98	4.14	650	x	√
32	Catastro DGA	-	-	-	-	-	-
33	Catastro DGA	-	-	-	412	-	-
34	CORFO 1969	2.85	2.77	1.51	-	x	-
35	CORFO 1969	-	-	-	-	-	-
36	CORFO 1969	6.10	6.09	0.10	-	√	-
37	CORFO 1969	4.92	4.91	0.02	-	√	-
38	CORFO 1969	7.07	7.15	0.51	-	√	-
39	CORFO 1969	-	-	-	-	-	-
40	CORFO 1969	4.56	4.61	0.60	-	√	-
41	CORFO 1969	8.02	7.97	0.27	-	√	-
42	CORFO 1969	4.89	4.94	0.47	-	√	-
43	CORFO 1969	-	-	-	-	-	-
44	CORFO 1969	7.67	7.59	0.57	-	√	-
45	Estaciones APR	-	-	-	-	-	-
46	Estaciones DGA	3.59	3.59	0.00	377	√	√
47	Estaciones DGA	2.58	2.73	2.87	267	x	√
48	Estaciones DGA	2.73	2.58	2.80	311	x	√
49	Estaciones DGA	1.71	1.70	0.30	170	x	√
50	Estaciones DGA	2.61	2.46	3.01	296	x	√
51	Estaciones DGA	3.29	3.30	0.14	374	√	√
52	Estaciones DGA	2.27	2.26	0.22	186	x	√
53	Estaciones DGA	3.12	2.99	2.21	343	x	√

* Las muestras destacadas con negrita en el campo "Nº" fueron descartadas tras la validación de datos.

** La muestra nº34, pese a no superar los criterios, fue aprobada por presentar un error muy bajo.

Anexo J. Registro estratigráfico y perfil de habilitación de los pozos con cribado instalado en roca.



P079: En trámite JPTC

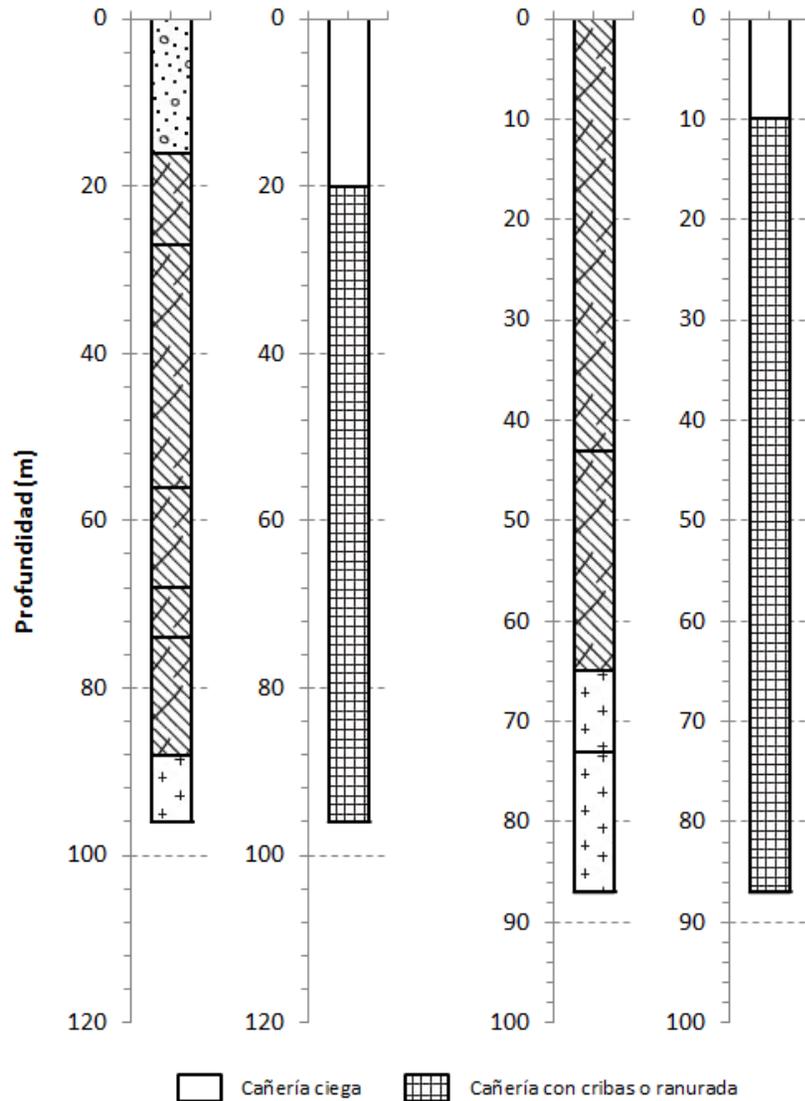
Desde [m]	Hasta [m]	Estratigrafía
0	60	Sedimento.
60	97	Roca de muy alta dureza.
97	114	Roca con presencia de agua.

P005: ND-0502-2179

Desde [m]	Hasta [m]	Estratigrafía
0	2	Capa vegetal.
2	22	Tierra con bolón.
22	36	Bolón, arena, roca descompuesta.
36	45	Roca fracturada.

ND-0502-2564 Pozo 1

ND-0502-2564 Pozo 2



P008: ND-0502-2564 Pozo 1

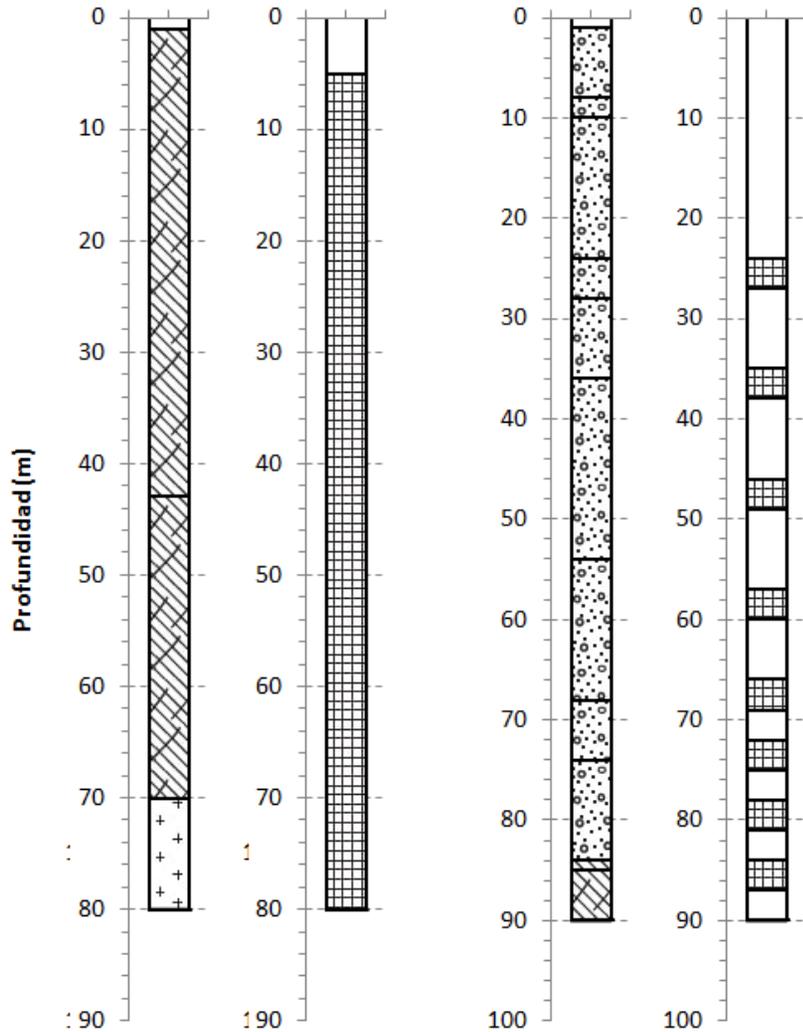
Desde [m]	Hasta [m]	Estratigrafía
0	16	Relleno, arena y bolón.
16	27	Roca granificada dura.
27	56	Roca fracturada blanda.
56	68	Roca descomp. lueramente blanda.
68	74	Roca dura.
74	88	Roca lueramente blanda, corrosiva.
88	96	Roca dura cerrada.

P009: ND-0502-2564 Pozo 2

Desde [m]	Hasta [m]	Estratigrafía
0	43	Roca corrosiva dura.
43	65	Roca corrosiva blanda.
65	73	Roca blanda descompuesta en forma de arcilla.
73	87	Roca dura cerrada.

ND-0502-2564 Pozo 3

ND-0502-2922



P010: ND-0502-2564 Pozo 3

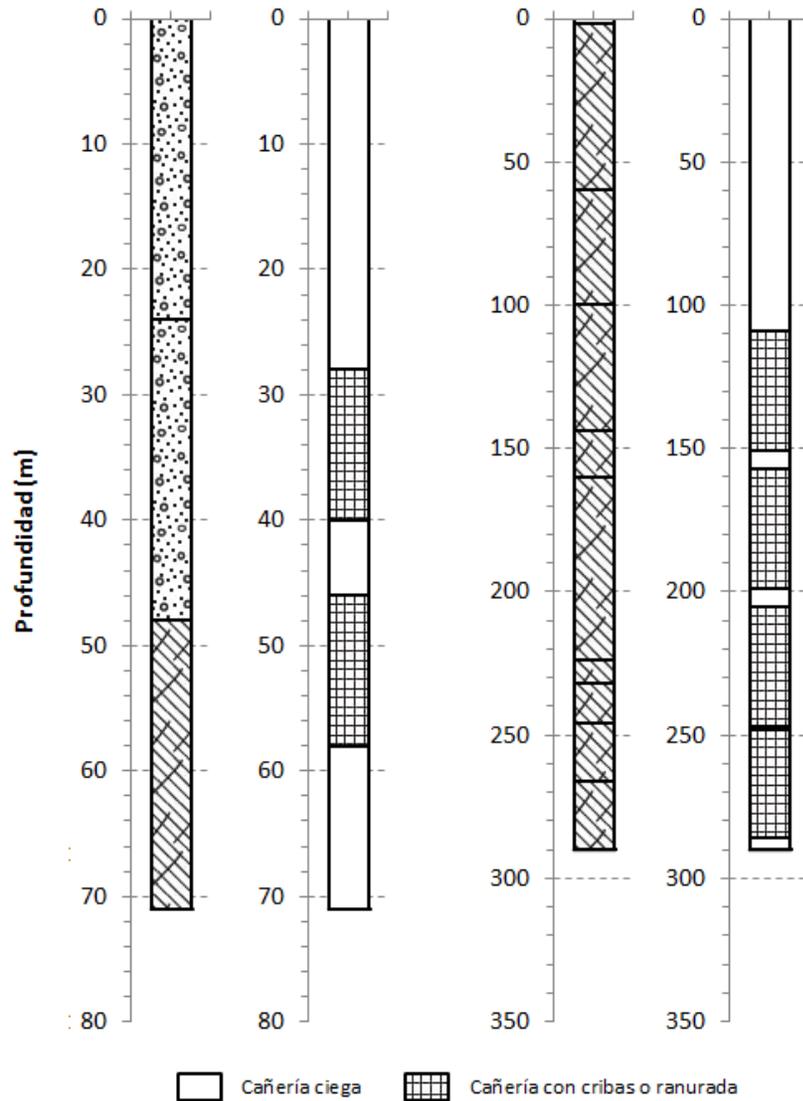
Desde [m]	Hasta [m]	Estratigrafía
0	1	Tierra vegetal.
1	43	Roca corrosiva blanda.
43	70	Roca descompuesta.
70	80	Roca cerrada.

P012: ND-0502-2922

Desde [m]	Hasta [m]	Estratigrafía
0	1	Tierra vegetal 100%.
1	8	Arcilla 20%, bolones 80%.
8	10	Bolones 90%, ripio 10%.
10	24	Bolones 40%, ripio 40%, arena fina 20%.
24	28	Bolones 40%, grava gruesa 40%, arena fina 20%.
28	36	Bolones 40%, mat. descomp. 20%, ripio 40%.
36	54	Bolones 40%, grava gruesa 30%, arena gruesa 20%, arcilla 10%.
54	68	Arcilla 10%, ripio 30%, bolones 40%, arena fina 20%.
68	74	Arcilla 10%, bolones 40%, arena gruesa 20%, grava gruesa 30%.
74	84	Arcilla 10%, mat. descomp. 20%, bolones 40%, arena fina 20%, ripio 10%.
84	85	Roca sólida 100%.
85	90	Roca sólida 80%, mat. descomp. 20%.

ND-0502-3599 Pozo 1

ND-0502-3820 Pozo 2

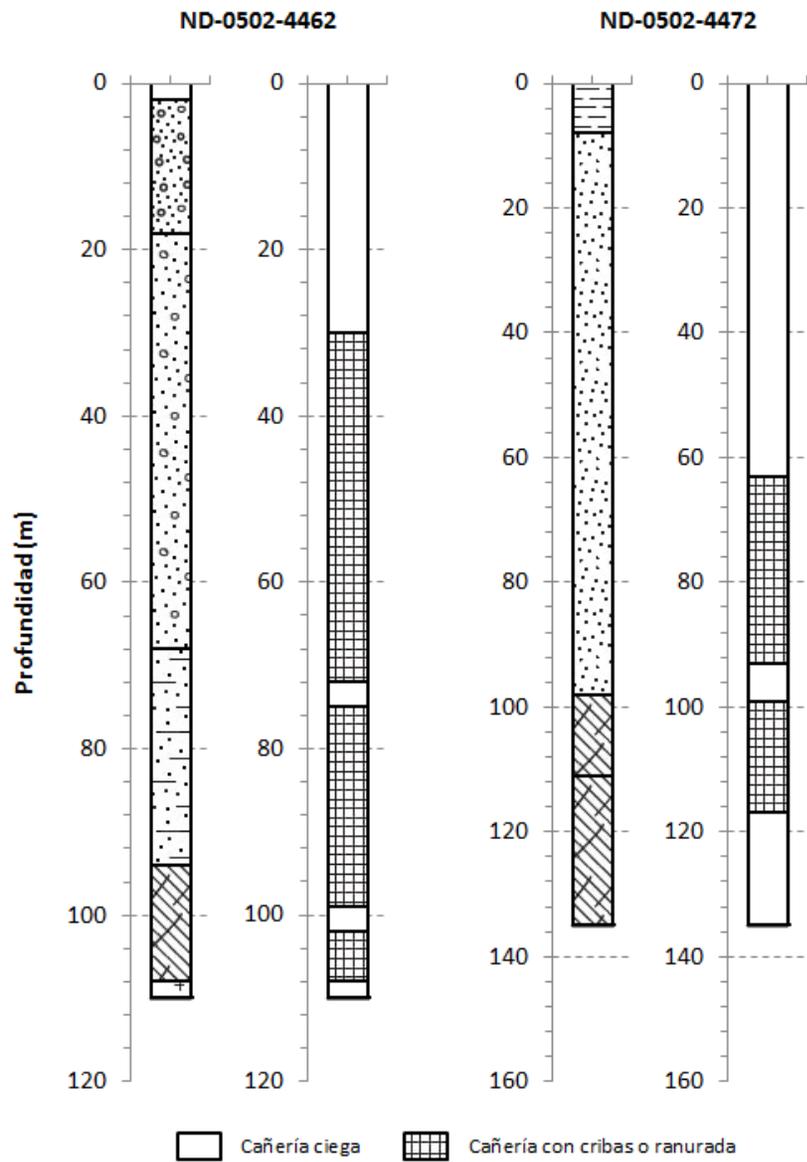


P024: ND-0502-3599 Pozo 1

Desde [m]	Hasta [m]	Estratigrafía
0	24	Bolones angulosos, ripio, arcilla.
24	48	Ripio, bolones, arena, poca arcilla.
48	71	Roca morada.

P029: ND-0502-3820 Pozo 2

Desde [m]	Hasta [m]	Estratigrafía
0	2	Suelo vegetal 100%.
2	60	Roca de cerro 60%, arcilla 40%.
60	100	Roca de cerro 70%, arcilla 30%.
100	144	Roca de cerro 80%, arcilla 20%.
144	160	Roca sólida 100%.
160	224	Roca de cerro 80%, arcilla 20%.
224	232	Roca sólida 100%.
232	246	Roca de cerro 70%, arcilla 30%.
246	266	Roca de cerro 50%, arcilla 20%, arena media 30%.
266	290	Roca de cerro 50%, arcilla 20%, arena gruesa 30%.



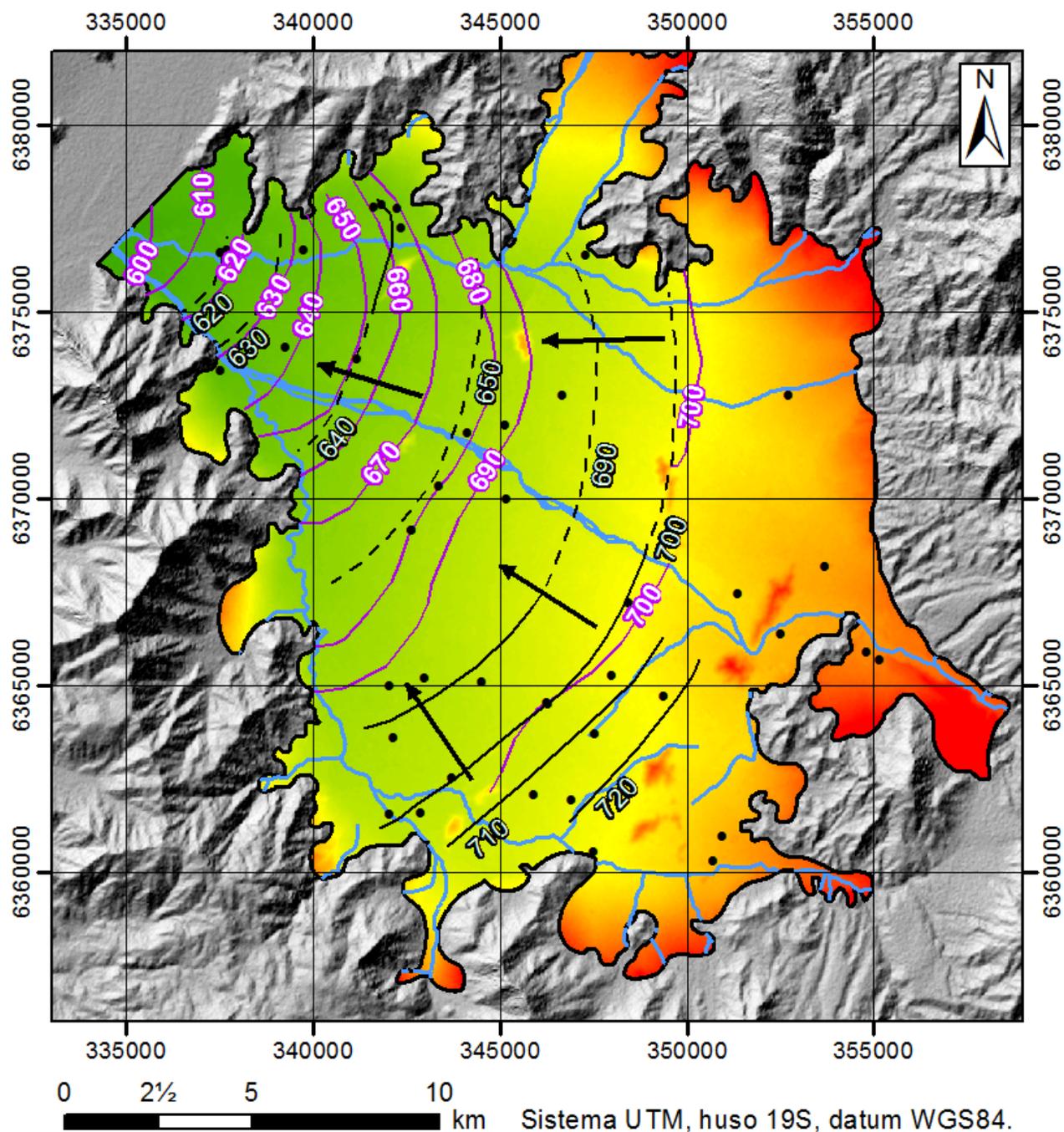
P116: ND-0502-4462

Desde [m]	Hasta [m]	Estratigrafía
0	2	Suelo vegetal
2	18	Gravas gruesas con arenas y arcilla
18	68	Arenas, gravas y arcilla
68	94	Maicillo y arcillas
94	108	Roca descompuesta y fracturada
108	110	Roca

P043: ND-0502-4472

Desde [m]	Hasta [m]	Estratigrafía
0	8	Arcilla.
8	98	Arcilla y bolones.
98	111	Ceniza volcánica con fracturas (ignimbrita).
111	135	Ceniza volcánica roca (ignimbrita).

Anexo K. Isopiezas del presente estudio (período 1998-1999) versus isopiezas de la DOH (2009) (período octubre de 1990-enero de 1991).



Leyenda

- Zona de estudio
 - Red hidrográfica
 - Cota hidráulica (m s. n. m.)
 - - - Cota hidráulica inferida (m s. n. m.)
 - Cota hidráulica Dictuc (m s. n. m.)
 - Pozo
 - Dirección flujo subterráneo
- Altitud topográfica (m s. n. m.)**
- 1182

596

Anexo L. Diagramas de Stiff de las estaciones DGA (muestras n°46 a n°53) en Los Andes-San Felipe.

