



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

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA E HIDROGEOQUÍMICA DE LA
CUENCA DEL RÍO CAUQUENES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

TAMARA FRANCESCA RABI MISLE

PROFESOR GUÍA:

CLAUDIO VERGARA SÁEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DRA. DOLORINDA DANIELE

DRA. CLAUDIA CANNATELLI

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OTRA AL TÍTULO DE: Geóloga

POR: Tamara Francesca Rabi Misle

Fecha: 04 de junio del 2018

PROFESOR GUÍA: Claudio Vergara Sáez

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA E HIDROGEOQUÍMICA DE LA CUENCA DEL RÍO CAUQUENES

En el presente trabajo de título se dan a conocer resultados hidrogeológicos e hidrogeoquímicos que aportan a la comprensión del sistema de aguas subterráneas de la cuenca del río Cauquenes, ubicada en la región del Maule, Chile. Los objetivos generales de este estudio fueron la identificación del potencial hídrico de la zona y la determinación de procesos que controlan la calidad de sus aguas.

Las aguas de la cuenca Cauquenes son de origen pluvial, por lo que su recarga depende fuertemente de las estaciones del año. Al entrar al sistema subterráneo, estas se mueven siguiendo la topografía, hacia el noreste.

El acuífero de Cauquenes corresponde a un acuífero multicapa, que fue dividido en 4 unidades hidroestratigráficas según diferencias litológicas e hidráulicas. Una de ellas corresponde a una unidad no acuífera conformada por rocas sedimentarias triásicas, intrusivos graníticos mesozoicos y el basamento cristalino. Las 3 unidades restantes se encuentran sobre la unidad no acuífera y son de origen aluvial, coluvial, fluvial y volcánico. Estas son: la UHA, que es una unidad de productividad moderada a alta y corresponde a depósitos sedimentarios gruesos con intercalaciones de arcillas limosas y arenosas en profundidad; la UHB, que es de productividad moderada a baja, se encuentra al sur del área y está conformada por intercalaciones de arenas gruesas y arcillas limosas; y la UHC, compuesta por depósitos piroclásticos consolidados que sobreyacen la subcuenca el estero Belco. Esta última es de carácter semipermeable y su productividad es baja, pero podría contener intercalaciones de mayor granulometría y productividad.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico, las aguas de la cuenca son en su mayoría de tipo bicarbonatado mixto, lo que indica que las aguas son jóvenes. Sus razones iónicas indican un origen meteórico de las aguas subterráneas. Al infiltrarse, las aguas pasan principalmente por procesos de interacción agua-roca, que hacen que estas evolucionen desde aguas cálcicas a sódicas. Por otra parte, al noreste de la zona de estudio existen procesos reductores, responsables de la reducción de sulfatos y de la disolución de elementos trazas como el arsénico y manganeso.

Se observó antimonio, arsénico, hierro y manganeso excediendo las normas de agua potable chilena y los valores recomendados por la OMS en algunos sectores.

Se estableció una relación de interacción entre las aguas subterráneas de la cuenca Cauquenes con su cuenca vecina Perquilauquén, al norte de la zona de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Claudio Vergara, por confiarme este trabajo. Por su motivación y compromiso a hacer el mejor trabajo posible. Por su orientación y su buena disposición a resolver mis dudas, y por ser un gran apoyo en este proceso.

Agradezco a las profesoras Linda Daniele y Claudia Cannatelli, miembros de la comisión, por su buen recibimiento y su excelente disposición a resolver dudas.

Agradezco a mi familia por su apoyo constante durante estos 6 años de estudio, especialmente a mi hermano, quien siempre me aconsejó y acompañó en esta última etapa de la carrera.

Agradezco a mi pololo Felipe, por su eterno apoyo, consejos y enorme paciencia durante todos estos años.

Agradezco a Álvaro Madrid y a Ignacio González por su interés y apoyo hacia este trabajo.

Agradezco a mis compañeros de carrera, por hacer de la estadía en la universidad un proceso más grato. Especialmente a mi equipo de Geoautistas, a Calipso y a Walter.

Agradezco a don René, por su disposición intachable y su compañía en los terrenos.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	viii
1 Introducción	1
1.1 Formulación del trabajo	1
1.2 Objetivos generales	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Hipótesis	3
1.5 Metodología	3
1.5.1 Metodología de trabajo.....	3
1.5.2 Metodología de muestreo.....	6
2 Antecedentes Generales	8
2.1 Ubicación y Accesos	8
2.2 Antecedentes de trabajos previos	10
2.3 Clima	11
2.4 Geomorfología	12
2.4.1 Morfoestructuras principales	12
2.5 Hidrografía	14
2.6 Uso del suelo en la cuenca de Cauquenes	15
3 Marco Geológico	16
3.1 Geología de superficie	16
3.1.1 Basamento metamórfico (Pz4b, PzTr4, Silúrico?-Carbonífero).....	16
3.1.2 Depósitos y Rocas Estratificadas.....	17
3.1.3 Rocas intrusivas	20
3.1.4 Estructuras principales	22
4 Resultados	24
4.1 Geofísica	24
4.2 Estratigrafía cuaternaria	25
4.3 Hidrogeología	29
4.3.1 Mapa de isopiezas y dirección del flujo subterráneo	29
4.3.2 Definición de unidades hidroestratigráficas.....	31
4.4 Hidrogeoquímica	35
4.4.1 Captaciones superficiales y subterráneas.....	35
4.4.2 Parámetros fisicoquímicos	37
4.4.3 Salinidad.....	41
4.4.4 Balance iónico	41
4.4.5 Elementos Mayores.....	43

4.4.6	Elementos Traza	48
5	Discusiones.....	56
5.1	Hidrogeología.....	56
5.2	Hidrogeoquímica.....	57
5.2.1	Fisicoquímica.....	57
5.2.2	Elementos Mayores.....	57
5.2.3	Elementos Traza	74
5.2.4	Relación con aguas de la cuenca Perquillauquén	80
6	Conclusiones y recomendaciones.....	82
6.1	Conclusiones.....	82
6.2	Recomendaciones.....	83
	Bibliografía.....	86
	Anexo A: Recopilación de datos geológicos.....	90
	Anexo B: Recopilación de datos geofísicos	92
	Anexo C: Medición de niveles freáticos.....	100
	Anexo D: Catastro de pozos con estratigrafía.....	101
	Anexo E: Cálculo de parámetros hidráulicos	103
	Anexo F: Química de las aguas	104
	Anexo G: Perfil BB''	113
	Anexo H: Descripción de muestras	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Precipitaciones en estación Quella entre 1970 y 2017. Elaboración propia a partir de datos de la DGA.	1
Figura 1.2: Muestras de agua tomadas en campaña de terreno el mes de Febrero, 2017.	6
Figura 2.1: Mapa de ubicación y accesos de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.	8
Figura 2.2: Vías de acceso y división en subcuencas.	9
Figura 2.3: Variación mensual de temperatura en Cauquenes. Fuente: Maldonado, I., 2004.	11
Figura 2.4: Variación de precipitaciones (Ppp), evapotranspiración (ETP) e índice de humedad (IH) en Cauquenes. Fuente: Maldonado, I., 2004.	11
Figura 2.5: Mapa de morfoestructuras en la cuenca Cauquenes. Fuente: Elaboración propia.	12
Figura 2.6: Hidrografía de la cuenca Cauquenes. Fuente: Elaboración propia.	14

Figura 2.7: Usos de suelo de la cuenca Cauquenes. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAF 2009.	15
Figura 3.1: Distribución de series metamórficas según la definición de González-Bonorino. Fuente: Escobar et al. 1977	17
Figura 3.2: Depósitos fluviales actuales	19
Figura 3.3: Basamento granítico	21
Figura 3.4: Falla en depósito fluvial antiguo	22
Figura 3.5: Geología regional de la zona de estudio. Fuente: Modificado de Escobar et al. (1977) y de SERNAGEOMIN (2001).	23
Figura 4.1: Mapa de profundidad de relleno de la cuenca Cauquenes en coordenadas UTM, WGS 84, huso 19S. Curvas destacadas cada 20 m. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 4.2: Distribución de perfiles estratigráficos.	25
Figura 4.3: Perfiles AA y BB. Fuente: Elaboración propia.	26
Figura 4.4: Perfiles CC y DD. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 4.5: Perfiles EE y FF. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 4.6: Mapa de isopiezas cada 5 metros. Fuente: Elaboración propia.	30
Figura 4.7: Perfiles hidrogeológicos AA' y BB'. La conductividad hidráulica K se encuentra en [m/día]. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 4.8: Perfiles hidrogeológicos DD' y FF'. La conductividad hidráulica K se encuentra en [m/día]. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 4.9: Ubicación de muestras tomadas en las campañas de invierno y de verano del 2017.	36
Figura 4.10: Mapa de conductividades eléctricas de aguas subterráneas y superficiales. La etiqueta muestra las profundidades de los pozos. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 4.11: Mapa de pH elaborado a partir de muestras de aguas subterráneas y superficiales. Fuente: Elaboración propia	39
Figura 4.12: Temperatura de aguas subterráneas. Fuente: Elaboración propia	40
Figura 4.13: Diagrama de Piper construido a partir de las muestras tomadas el año 2017. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 4.14: Diagramas de Stiff clasificado según Piper. Fuente: Elaboración propia. ...	47
Figura 4.15: Distribución y concentración del Antimonio a la izquierda y el Arsénico a la derecha.	51
Figura 4.16: Distribución y concentración del Cobre a la izquierda y el Cromo a la derecha.	52
Figura 4.17: Distribución y concentración del Fósforo a la izquierda y el Hierro a la derecha.	53
Figura 4.18: Distribución y concentración del Manganeso a la izquierda y el Vanadio a la derecha.	54
Figura 4.19: Distribución y concentración del Zinc.	55
Figura 5.1: Relación entre sodio y cloro para muestras profundas y someras.	58
Figura 5.2: Relación entre calcio y cloruros.	59
Figura 5.3: Relación entre magnesio y cloruros.	60
Figura 5.4: Relación entre bicarbonatos y cloruros.	60
Figura 5.5: Distribución de muestras del grupo G1.	61

Figura 5.6: Relación entre potasio y cloruros.	62
Figura 5.7: Relación entre nitratos y cloruros.	63
Figura 5.8: Relación entre sulfatos y cloruros.	63
Figura 5.9: Distribución de muestras con probable contaminación agrícola.	65
Figura 5.10: Relación $rHCO_3/rCl$ vs rCl	66
Figura 5.11: Relación rNa/rCl vs rCl	66
Figura 5.12: Relación rCa/rCl vs rCl	67
Figura 5.13: Relación rNa/rCa vs rCl	68
Figura 5.14: Relación rMg/rCa vs rCl	69
Figura 5.15: Razón entre sulfatos y cloruros. Indica reducción de sulfatos.	69
Figura 5.16: Interpolación de la constante K, la cual crecería hacia sectores con reducción de sulfatos. Se consideraron muestras de la cuenca vecina del río Perquillauquén.	70
Figura 5.17: Distribución de oxígeno disuelto. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de DGA (2013).	71
Figura 5.18: Diagrama de Gibbs. Muestra el mecanismo que controlan la química de las aguas subterráneas.	72
Figura 5.19: Diagrama de Durov.	73
Figura 5.20: Relación entre antimonio y la salinidad.	75
Figura 5.21: Relación entre el fósforo y antimonio.	75
Figura 5.22: Relación entre cloruros y manganeso.	76
Figura 5.23: Relación entre hierro y cloruros.	77
Figura 5.24: Relación entre Hierro y Manganeso.	77
Figura 5.25: Relación entre el arsénico y la salinidad.	78
Figura 5.26: Relación entre arsénico y pH.	79
Figura 5.27: Relación entre arsénico y Manganeso.	79
Figura 5.28: Relación de recarga entre las cuencas Cauquenes y Perquillauquén.	80
Figura 5.29: Relación entre elementos mayores y cloruros de las cuencas Perquillauquén y Cauquenes.	81
Figura 6.1: Mapa hidrogeológico de la cuenca del río Cauquenes. Fuente: Elaboración propia	85
Figura A.1: Avance geológico de las hojas Rancagua-Curico, Talca-Linares, Chanco y Concepción-Chillán. Elaborado por Escobar et. al, 1977.	90
Figura A.2: Mapa de relleno de la cuenca Cauquenes en coordenadas UTM según datum WGS 84 y huso 19S. Fuente: DGA 2013.	91
Figura B.1: Distribución de estudios geofísicos anteriores. Coordenadas en UTM, datum WGS 84 y Huso 19S. Fuente: DGA,2013.	92
Figura B.2: Perfil de gravedad elaborado por AC ingenieros (1999). Fuente: DGA 2013.	93
Figura B.3: Perfiles gravimétricos obtenidos por GCF ingenieros. Fuente: DGA 2013.	94
Figura B.4: Perfiles gravimétricos obtenidos por GCF ingenieros. Fuente: DGA 2013.	95
Figura B.5: Perfiles gravimétricos obtenidos por GCF ingenieros. Fuente: DGA 2013.	96
Figura B.6: Distribución de perfiles gravimétricos elaborados por la DGA. Fuente: DGA,2013.....	99
Figura G.1: Perfil estratigráfico BB' extendido hacia la cuenca Perquillauquén.	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Métodos usados por laboratorio químico del SERNAGEOMÍN.	7
Tabla 2.1: Tipos de suelo según uso de la cuenca del río cauquenes. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAF 2009.	15
Tabla 4.1: Valores promedio de las profundidades del nivel estático en metros por subcuenca y por período.	29
Tabla 4.2: Cantidad de datos tomados por subcuenca y por período.	29
Tabla 4.3: Productividad según tipo de acuífero, tomada de Lekgowe & Magowe 2009	31
Tabla 4.4: Caracterización hidráulica según el tipo de acuífero, según Struckmeier y Margat (1995).	31
Tabla 4.5: Clasificación de salinidad según IDA.	41
Tabla 4.6: Error de los análisis químicos.	41
Tabla B.1: Resultado de SEVs realizados por AC en 1999. Fuente: DGA 2013.	93
Tabla B. 2: Resultados TEMs para el sector de Pocillas y San Juan. Fuente: DGA 2013.	97
Tabla B.3: Resultados TEMs para el sector de Cauquenes-Belco. Fuente: DGA 2013.	98
Tabla C.1: Niveles freáticos medidos en las 3 campañas de terreno.	100
Tabla D.1: Pozos catastrados utilizados para la construcción del modelo 3D y elaboración de perfiles estratigráficos.	101
Tabla E.1: Cálculos de conductividad hidráulica y transmisividad.	103
Tabla F.1: Resultado análisis químicos de las muestras de agua. Muestras 001 a 023.	104
Tabla F.2: Resultado análisis químicos de las muestras de agua. Muestras 024 a 034.	106
Tabla F.3: Resultado análisis químicos de las muestras de agua. Muestras 035 a 045.	108
Tabla F.4: Resultado análisis químicos de las muestras de agua. Muestras 046 a 056.	110
Tabla F.5: Limite de detección y errores asociados a los análisis químicos.	112

1 INTRODUCCIÓN

1.1 FORMULACIÓN DEL TRABAJO

En las últimas décadas se han evidenciado claras señales de que el clima está cambiando rápidamente debido a la acción antrópica. Esta situación tiene diversos efectos en el mundo en que vivimos y según la zona geográfica en la que nos encontremos se pueden manifestar como aumentos de temperatura, aumentos en el nivel del mar, disminución de precipitaciones y deshielos de los glaciares (U.S global change research program, 2009).

Uno de los lugares que se ha visto particularmente afectado por estos cambios es la región del Maule, la cual ha mostrado un decaimiento lineal de sus precipitaciones en un 3% a 5% por década en el período entre los años 1961 y 2016 (Dirección general de aeronáutica civil, 2016). En Cauquenes y sus alrededores se observa claramente esta tendencia a la disminución (ver Figura 1.1), lo que se traduce en una menor recarga del secano interior y esto, junto a un aumento creciente en la demanda hídrica de la región, produce un déficit de agua disponible para la población. Este déficit se hace notar en la vida rural, principalmente en los meses de verano, cuando los pozos se secan y la sequía repercute en actividades cotidianas como tomar una ducha, lavar la ropa o regar los cultivos.

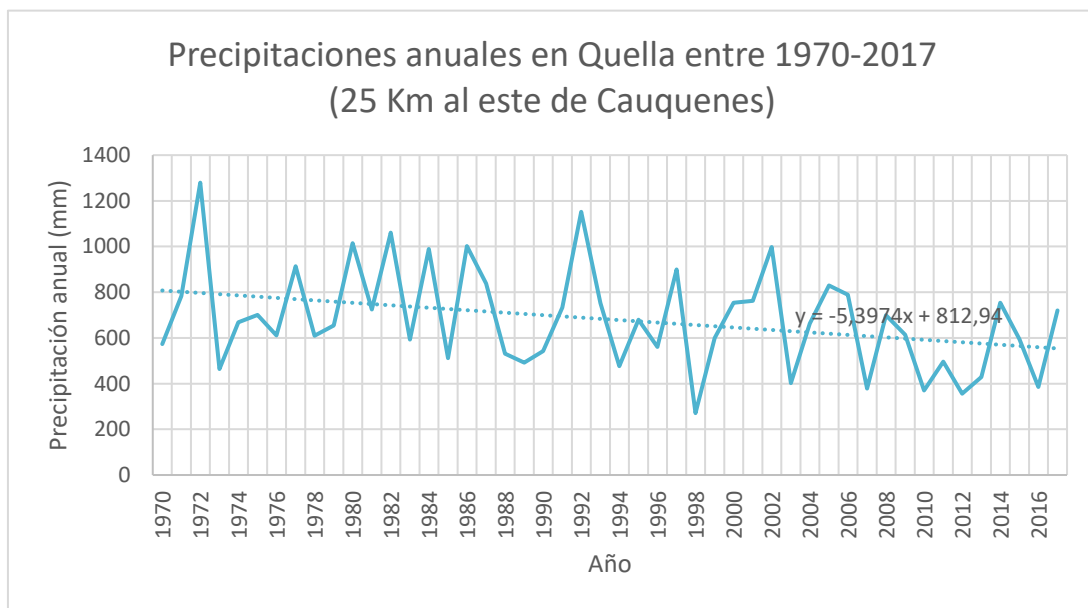


Figura 1.1: Precipitaciones en estación Quella entre 1970 y 2017. Elaboración propia a partir de datos de la DGA.

La cuenca del río Cauquenes, está ubicada al sur oeste de la región del Maule y ha sido declarada como zona de escasez hídrica junto a otras comunas de la región (DGA, 2017). Esta zona ha sido modelada desde el punto de vista hidrológico por

diversos organismos, entre los cuales se encuentran la *Dirección General de Aguas* (DGA), el *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura* (IICA) y la *Comisión Nacional de Riego* (CNR), pero a pesar de la gran relevancia de estos estudios existe un vacío de conocimiento en la comprensión detallada de la geología local.

El presente trabajo busca cubrir la falta de información existente desde el punto de vista hidrogeológico e hidrogeoquímico para así comprender de mejor manera el sistema de aguas subterráneas de la zona. Además, se espera establecer la productividad de la cuenca y determinar sectores en los que sería mejor explotar el recurso. Esto se pretende realizar mediante la definición de unidades hidroestratigráficas, considerando la morfología de la cuenca y su caracterización según parámetros hidráulicos, en conjunto con la determinación de la calidad actual de las aguas y la conceptualización de su evolución en consideración de su composición química.

Este estudio se enmarca en la propuesta del proyecto: “Caracterización hidrogeológica de la cuenca del río Cauquenes y comunas aledañas del Secano interior y costero: Chanco, Empedrado y Pelluhue” a cargo de la Dirección Regional del Maule del Servicio Nacional de Geología y Minería y se espera que constituya una línea base para la construcción de un mapa hidrogeológico de la zona. La importancia de este radica en que podría constituir una herramienta que aporte una visión más completa de las aguas subterráneas, lo que enriquecería la toma de decisiones con respecto a la gestión del recurso hídrico de la zona.

1.2 OBJETIVOS GENERALES

Se identifican dos:

1. Identificar la productividad del acuífero a través del estudio de la estratigrafía del relleno la cuenca y de sus parámetros hidráulicos.
2. Establecer los procesos que controlan la composición de las aguas mediante el análisis de las firmas hidrogeoquímicas de las aguas subterráneas.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Definir unidades hidroestratigráficas dentro de la cuenca Cauquenes y plasmarlas en un mapa hidrogeológico.
- b) Estudiar la composición de las aguas superficiales y subterráneas y conceptualizar su dinámica evolutiva.

1.4 HIPÓTESIS

Muchos hogares de la cuenca del río Cauquenes se abastecen de pozos poco profundos para consumo y para riego. De estos pozos, se han observado algunos que tienen una gran capacidad de extracción de agua, y otros que son de bajo rendimiento y que se secan rápidamente en verano, por lo que sus dueños deben depender del abastecimiento de agua en camiones aljibes. Existen también, pozos profundos que abastecen a pequeñas localidades, a empresas forestales y a viñedos, y que son en general pozos de buen rendimiento.

Estas diferencias de abastecimiento en la cuenca demuestran una distribución ineficiente del recurso, lo que ocurre debido al desconocimiento del funcionamiento del sistema subterráneo. A partir del estudio de las aguas superficiales y subterráneas y la conceptualización de su dinámica evolutiva en el acuífero de Cauquenes, se podría mejorar la gestión del recurso.

1.5 METODOLOGÍA

1.5.1 Metodología de trabajo

1.5.1.1 Con respecto al objetivo específico a)

Para determinar las unidades hidroestratigráficas de la cuenca se realizaron una serie de actividades:

1.5.1.1.1 Recopilación de antecedentes

A partir de estudios anteriores en la cuenca se recopiló información acerca de los pozos existentes en un catastro. Este catastro está conformado por 1209 pozos y abarca los siguientes parámetros: código, nombre, coordenadas, fuente de información, profundidad, propietario, dimensiones y otras características que pudieran estar presente en los documentos. Posteriormente, se recuperaron las fichas 80 de los pozos del catastro en el portal web de la DGA para finalmente obtener la estratigrafía, habilitación y pruebas de bombeo de cada pozo.

Por otra parte, se recopiló información geofísica para definir la profundidad del basamento de la cuenca. Para este proceso se usaron estudios de gravimetría, SEVs y TEMs.

1.5.1.1.2 Modelo tridimensional de la cuenca y mapa de basamento

A partir de la información estratigráfica y geofísica recopilada, se generó un modelo tridimensional de la cuenca, en el software *Leapfrog*. Este modelo se encuentra en el CD adjunto y es una herramienta que ayuda a comprender de mejor manera la composición granulométrica del relleno de la cuenca.

A partir del modelo en 3D, se extrajo la profundidad del basamento y se plasmaron en un mapa en forma de isolíneas.

1.5.1.1.3 Trabajo en terreno y mapa geológico y de isopiezas

Se realizó un terreno entre los días 27/11/2017 y 01/12/2017, el cual tuvo dos finalidades. Una de ellas fue la recopilación de información geológica para posteriormente, mejorar el detalle del mapa geológico que existe en la zona. La otra, corresponde a la medición de cotas hidráulicas a través de un pozómetro *Solinst* de 100 [metros] para posteriormente, dibujar las isopiezas de la zona de estudio en un mapa, considerando la topografía y datos tomados en terreno.

1.5.1.1.4 Perfiles Estratigráficos

Se trazaron 6 perfiles estratigráficos a partir de la información recopilada de estratigrafía y geofísica, utilizando los softwares *Strater* e *Illustrator*. Estos perfiles fueron utilizados para posteriormente, definir las unidades hidrogeológicas correspondientes.

1.5.1.1.5 Cálculo de Parámetros Hidráulicos

A partir de las pruebas de bombeos de los pozos recopiladas de las fichas obtenidas en la sección 1.5.1.1.1, se calcularon parámetros hidráulicos de coeficiente de almacenamiento, transmisividad y de conductividad hidráulica. La estimación de los dos primeros parámetros se realiza a partir del software *Aquifer Test*, el cual ajusta la curva de descenso v/s tiempo de la prueba de bombeo a la curva de Theis, Hantush o Neuman, dependiendo si el acuífero es confinado, semiconfinado o libre, respectivamente. Para estimar la conductividad hidráulica se utiliza la siguiente relación (Fetter, 1988):

$$T = Kb$$

Siendo T = transmisividad, K = conductividad hidráulica y b = espesor saturado del acuífero.

1.5.1.1.6 Definición de Unidades Hidroestratigráficas

A partir de los perfiles estratigráficos y del cálculo de parámetros hidráulicos, se definieron unidades estratigráficas. Para esto se utilizó la definición de Poehls y Smith (2009), quienes consideran la similitud de estratigrafía y de parámetros hidrológicos.

Por otra parte, a las unidades se les designaron niveles de productividad según Lekgowe y Magowe (2009) y Struckmeier y Margat (1995).

1.5.1.1.7 Mapa Hidrogeológico

A partir de estas isopiezas, las unidades hidroestratigráficas y diagramas de Stiff (los cuales se realizan como parte del objetivo específico b) se construyó un mapa hidrogeológico.

1.5.1.2 Con respecto al objetivo específico b)

En primer lugar, se plasmaron en un mapa los parámetros fisicoquímicos de temperatura, pH y conductividad eléctrica de las aguas superficiales y subterráneas mediante el software *ArcGis*.

En segundo lugar, se consideraron los resultados entregados por el laboratorio que entregaron un balance iónico menor al 5%. Las muestras que cumplían con esta condición fueron clasificadas según sus elementos mayoritarios mediante la construcción de diagramas de Stiff y de Piper. Estos diagramas fueron graficados en el software *AquaChem*. A partir de los diagramas anteriores y de razones iónicas, se buscaron relaciones entre los elementos disueltos en las aguas, elementos litológicos y procesos que puedan justificar su comportamiento.

Luego, se plasmó en un mapa la distribución de los elementos traza y se buscaron relaciones mediante diagramas binarios, que pudieran dar pistas sobre el origen de estos

1.5.2 Metodología de muestreo

Se realizaron 2 campañas de terreno para tomar muestras de agua. Una de ellas entre los días 24-02-2017 y 27-02-2017 y otra entre los días 30-08-2017 y 04-09-2017. En ambas campañas se utilizó la siguiente metodología:

Previamente al terreno se prepararon botellas de plástico de alta resistencia en un ambiente nitrógeno. Esto se hizo lavando las botellas en un concentrado de ácido nítrico (HNO_3), y posteriormente enjuagándolas 3 veces en agua destilada.

En terreno, primero se midieron los parámetros físicoquímicos de las aguas a través de un equipo multiparamétrico Hanna HI-98130. Para esto se ambientaron el jarro y las sondas del equipo con el agua a muestrear. Luego, se colocó esta agua a muestrear en el jarro y se midió la conductividad eléctrica, temperatura y pH con la sonda. Una vez finalizada cada medición, el equipo se lavó con agua destilada.

Por otra parte, se utilizaron las botellas previamente lavadas para tomar las muestras que serían enviadas a ser sometidas a análisis químico. Para esto se utilizaron 3 tamaños de botella:

- 1) De un litro para elementos mayores.
- 2) De 125 ml para elementos traza.
- 3) De 125 ml para isotopía.

Para los alcances de este trabajo, solamente se utilizaron los resultados de elementos mayores y traza. Para la toma de muestras, se ambientaron las botellas 3 veces. Luego, las botellas de elementos mayores y de isotopía, fueron llenadas y tapadas procurando no dejar burbujas dentro. La muestra fue rotulada y sellada con parafilm para luego ser guardada en un cooler que permitió mantener las muestras en frío.

Para la toma de muestras de elementos traza, además de ambientar la botella, se ambientó 3 veces una jeringa de 50 ml. Luego, se acopló un filtro de $45[\mu\text{m}]$ a la jeringa para filtrar el agua a medida que se llenaba la botella. Posteriormente, se añadieron $2[\text{ml}]$ de ácido nítrico diluido al 50% mediante un gotario graduado y se cerró la botella procurando eliminar cualquier burbuja que podría quedar dentro de ella. Finalmente, se selló la tapa con papel film extensible y auto adherible, y se guardó en una nevera con aislantes de gel fríos.



Figura 1.2: Muestras de agua tomadas en campaña de terreno el mes de Febrero, 2017.

Después de la campaña de terreno se enviaron todas las muestras al laboratorio de químico del Servicio Nacional de Geología y Minería, siguiendo una cadena de frío.

Los métodos utilizados por el laboratorio para determinar los parámetros fisicoquímicos y los elementos químicos en las muestras fueron los siguientes:

Tabla 1.1: Métodos usados por laboratorio químico del SERNAGEOMÍN.

Parámetro	Método
pH	Potenciometría
Conductividad eléctrica	Conductivimetría
Alcalinidad	Volumetría
Fluoruros	Electrodo ión selectivo
Cationes Mayores	Espectrometría de absorción atómica
Aniones	Cromatografía iónica
Elementos traza	ICP-MS
Mercurio	Espectrometría de fluorescencia atómica

2 ANTECEDENTES GENERALES

2.1 UBICACIÓN Y ACCESOS

La cuenca de Cauquenes se ubica en el flanco oriental de la cordillera de la costa y corresponde a una subcuenca de la cuenca del río Maule. Se encuentra en las Regiones del Maule y Biobío, específicamente en las provincias de Cauquenes y Ñuble entre las latitudes $35^{\circ}40'S$ y $36^{\circ}20'S$ y tiene una superficie aproximada de 1980 [km²]. A esta zona se puede acceder desde el norte a través de la Ruta Los Conquistadores, desde el sur por Av. Prat, desde la costa por la ruta M-50 o desde Parral a través de la ruta M-26.

La cuenca Cauquenes se puede subdividir en 5 subcuencas: La ciénaga del Name, del estero Belco, del río San Juan, del río Tutuvén y de Pocillas (ver Figura 2.2).

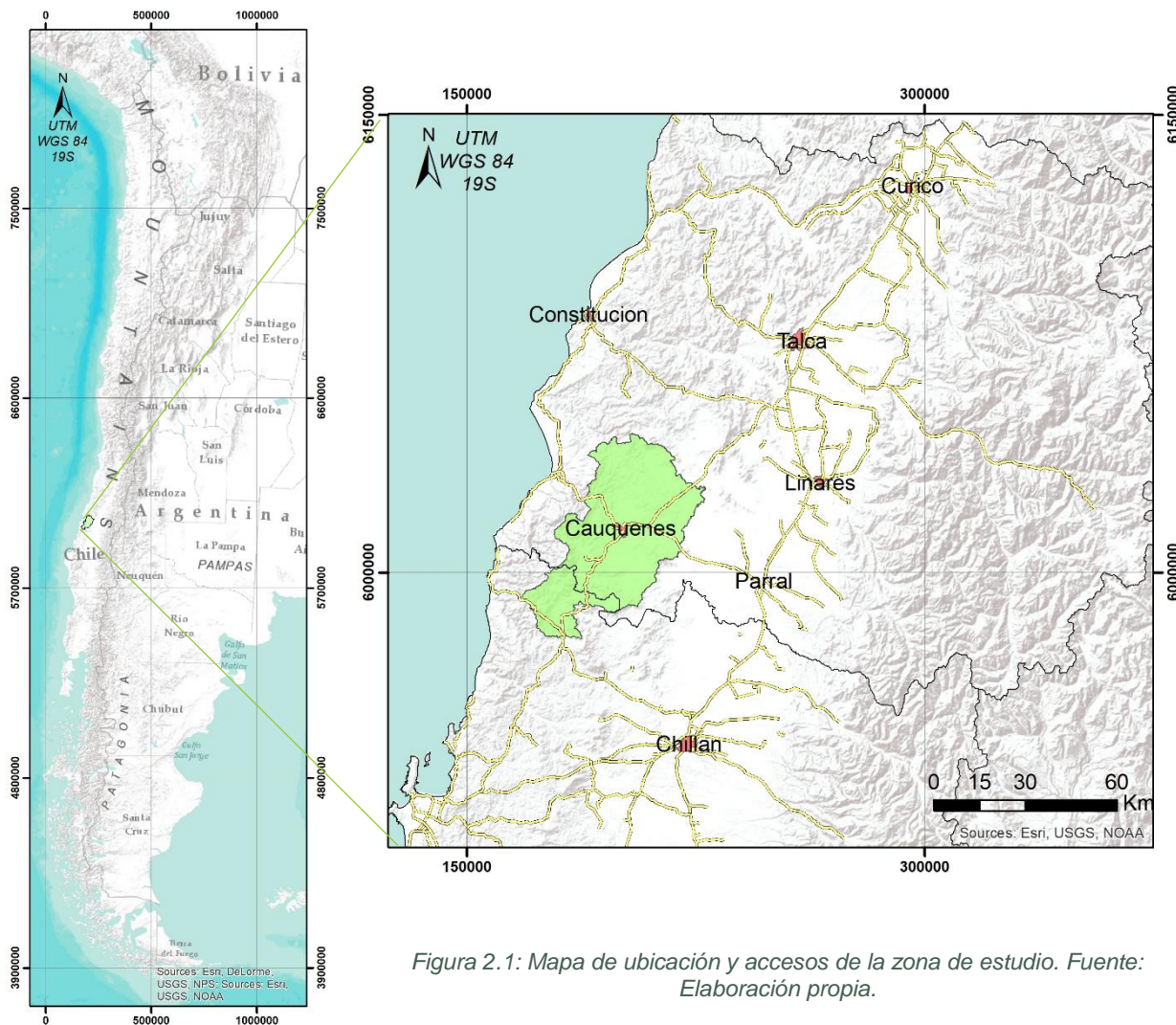


Figura 2.1: Mapa de ubicación y accesos de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

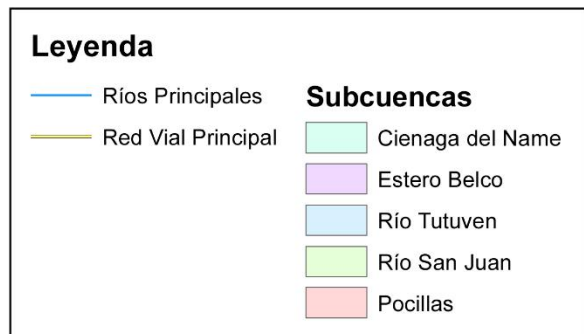
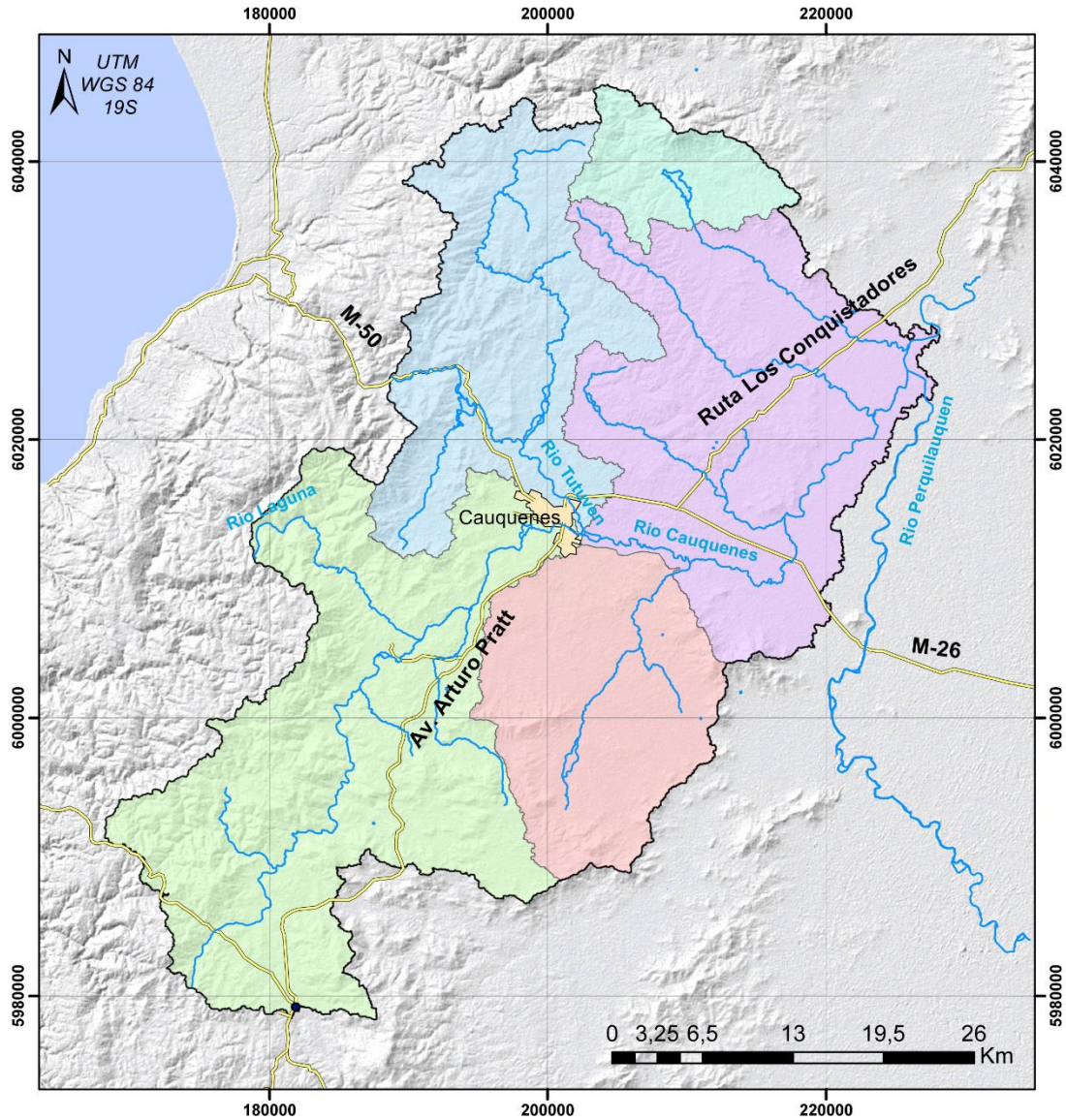


Figura 2.2: Vías de acceso y división en subcuencas.

2.2 ANTECEDENTES DE TRABAJOS PREVIOS

El año 2014 la DGA publicó el estudio “Estimación preliminar de las recargas de agua subterránea y determinación de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos”. En este informe se definieron sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común de las cuencas antes mencionadas y se estimó la recarga en contraste a los derechos aprobados y las solicitudes de derechos en sectores de la cuenca del Maule. Se concluyó que no existe riesgo a la sustentabilidad del acuífero considerando la explotación actual.

El año 2013 la dirección general de aguas presentó un modelo hidrológico de la cuenca de Cauquenes, el cual se basa en cuantificar la disponibilidad del recurso hídrico e identificar zonas con potencial hidrogeológico. Este estudio presenta una serie de mapas de parámetros hidrológicos (permeabilidad, conductividad, profundidad del relleno de la cuenca, entre otros) que dan una idea general de la cuenca. Además, se presentaron resultados de gravimetría y estimaciones de la demanda y recarga de la cuenca. Por último, postularon un modelo en el cual concluyen que, si se usa el valor promedio de 18% del caudal de los pozos catastrados, podría ser factible la extracción de los derechos otorgados y los pendientes.

El año 2011 la dirección general de aguas realizó una evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca de Cauquenes. Este estudio estimó la demanda y recarga total de la cuenca para así determinar el volumen de los derechos de aguas subterráneas que se pueden otorgar. El estudio concluye que se puede seguir aceptando solicitudes de derechos de agua hasta copar el volumen sustentable.

Los datos geofísicos conocidos de la zona corresponden a los ya antes mencionados tomados por la DGA (2013), a datos tomados el 2001 por la empresa Geodatos por encargo de GCF ingenieros y a un estudio de AC ingenieros de 1999. La geofísica realizada por Geodatos corresponde a TEMs y a gravimetría, mientras que AC ingenieros incluyó sondajes eléctricos verticales (SEVs) y un perfil de gravedad.

2.3 CLIMA

La cuenca de Cauquenes forma parte de lo que se conoce como el secano interior de Chile. El secano interior corresponde a una zona agroecológica que se extiende por el flanco oriente de la cordillera de la costa entre Hualañe, en la región del Maule, hasta parte de Yumbel, en la Región del Biobío. Según la definición de Papadakis el clima en el secano interior corresponde a un clima mediterráneo costero, es decir, posee un período seco de 6 a 7 meses. Las precipitaciones varían entre 640 mm y 1100 mm, de los cuales el 80% del agua precipita entre marzo-agosto y el 15% entre septiembre-noviembre (Del Canto y Del Pozo, 1999).

En el secano interior se distinguen 3 agroclimas: Hualañe, Cauquenes y Angol. La temperatura media anual de Cauquenes es de 14,7°C, siendo máximas en enero (27°C) y mínimas en julio (4,7°C). Las precipitaciones promedio de las estaciones ubicadas en la zona de estudio varían entre 667 mm y 727 mm (Del Canto y Del Pozo, 1999).

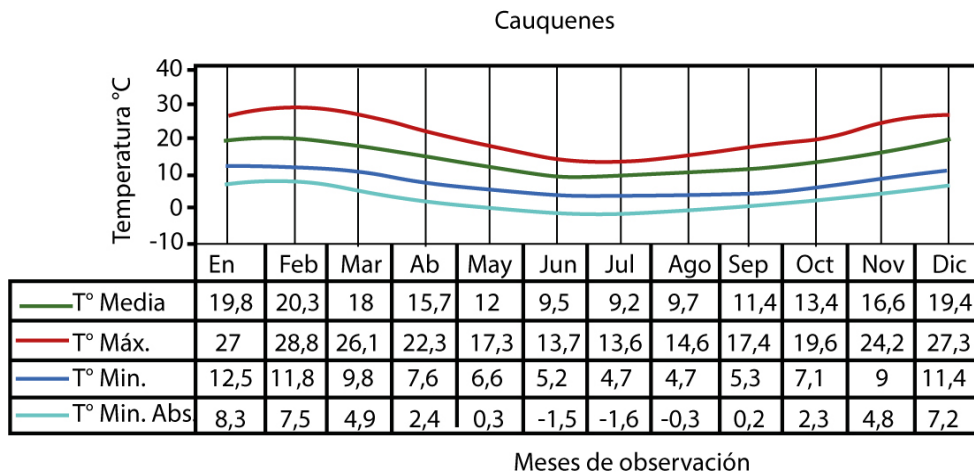


Figura 2.3: Variación mensual de temperatura en Cauquenes. Fuente: Maldonado, I., 2004.

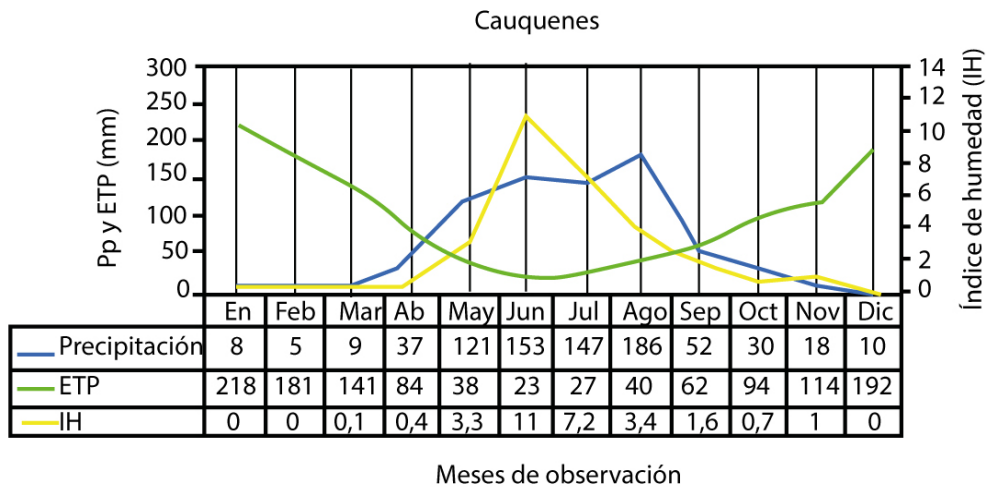


Figura 2.4: Variación de precipitaciones (Ppp), evapotranspiración (ETP) e índice de humedad (IH) en Cauquenes. Fuente: Maldonado, I., 2004.

2.4 GEOMORFOLOGÍA

2.4.1 Morfoestructuras principales

En la Región del Maule se reconocen 4 unidades morfoestructurales principales. De este a oeste son: La Cordillera Principal, la depresión intermedia, la Cordillera de la Costa y las planicies litorales. Particularmente en la cuenca del río Cauquenes se reconocen sólo dos de ellas: la Cordillera de la Costa y la depresión intermedia (Figura 2.5).

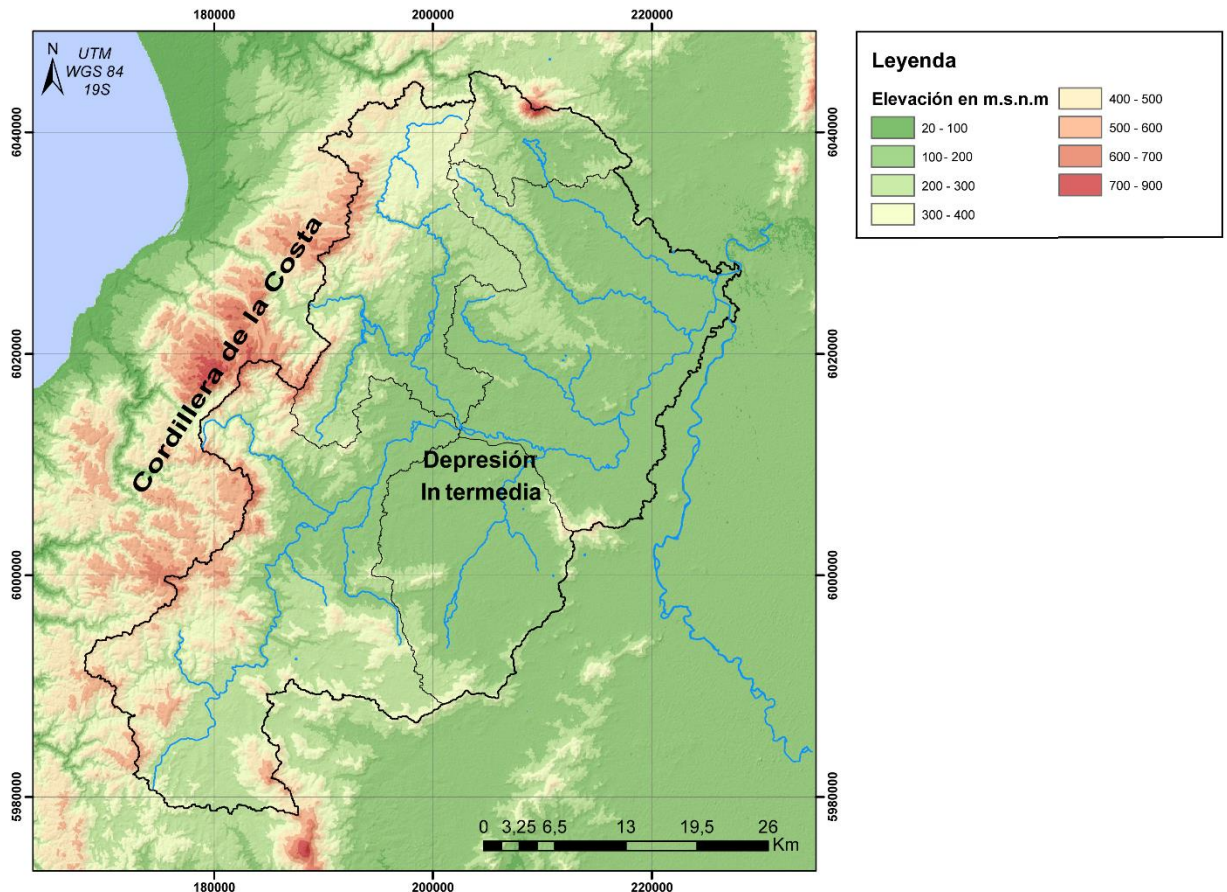


Figura 2.5: Mapa de morfoestructuras en la cuenca Cauquenes. Fuente: Elaboración propia.

2.4.1.1 *Cordillera de la Costa*

Corresponde a un cordón montañoso de orientación norte-sur. Sus cerros, que poseen pendientes entre 10° y 50°, tiene alturas hasta 700 m.s.n.m. la zona de estudio. El flanco occidental de la cordillera constituye a una sucesión de quebradas y valles que actúan como vías naturales de evacuación del agua hacia el mar, por lo que es común encontrar abanicos aluviales dentro de estas quebradas (Ministerio de vivienda y urbanismo, 2012). En este sector la cordillera de la costa está constituida por rocas del Paleozoico Superior en dos franjas: La franja occidental, que corresponde a rocas metamórficas; y la franja oriental, conformada por granitoides (Escobar *et al.*, 1977).

2.4.1.2 *Depresión Intermedia*

Corresponde al relleno sedimentario de edad Pleistocena-Holocena y se extiende entre los 33°S y los 40°S. La pendiente de la depresión intermedia es pequeña, aunque aumenta a medida que se acerca a las cordilleras. Está constituida principalmente por depósitos fluviales asociados a los cursos de agua que atraviesan la depresión intermedia y por depósitos aluviales provenientes de abanicos que se forman a la salida de la Cordillera de la Costa y Principal (Ministerio de vivienda y urbanismo, 2012).

2.5 HIDROGRAFÍA

La cuenca de Cauquenes corresponde a una subcuenca de la cuenca del Río Maule. Sus esteros y ríos nacen en el flanco oriental de la Cordillera de la Costa para generar una red de drenaje que desemboca en el río Perquilauquén. El río Cauquenes es el río principal de la cuenca y se alimenta desde el noroeste por el río Tutuvén, desde el sur por el río San Juan y desde distintas direcciones por una serie de esteros (Figura 2.6). El curso del río Cauquenes tiene dirección EW, pero casi al llegar a la cuenca vecina del río Perquilauquén cambia su rumbo y adquiere un curso NNE-SSW (indicado en la figura por la estrella).

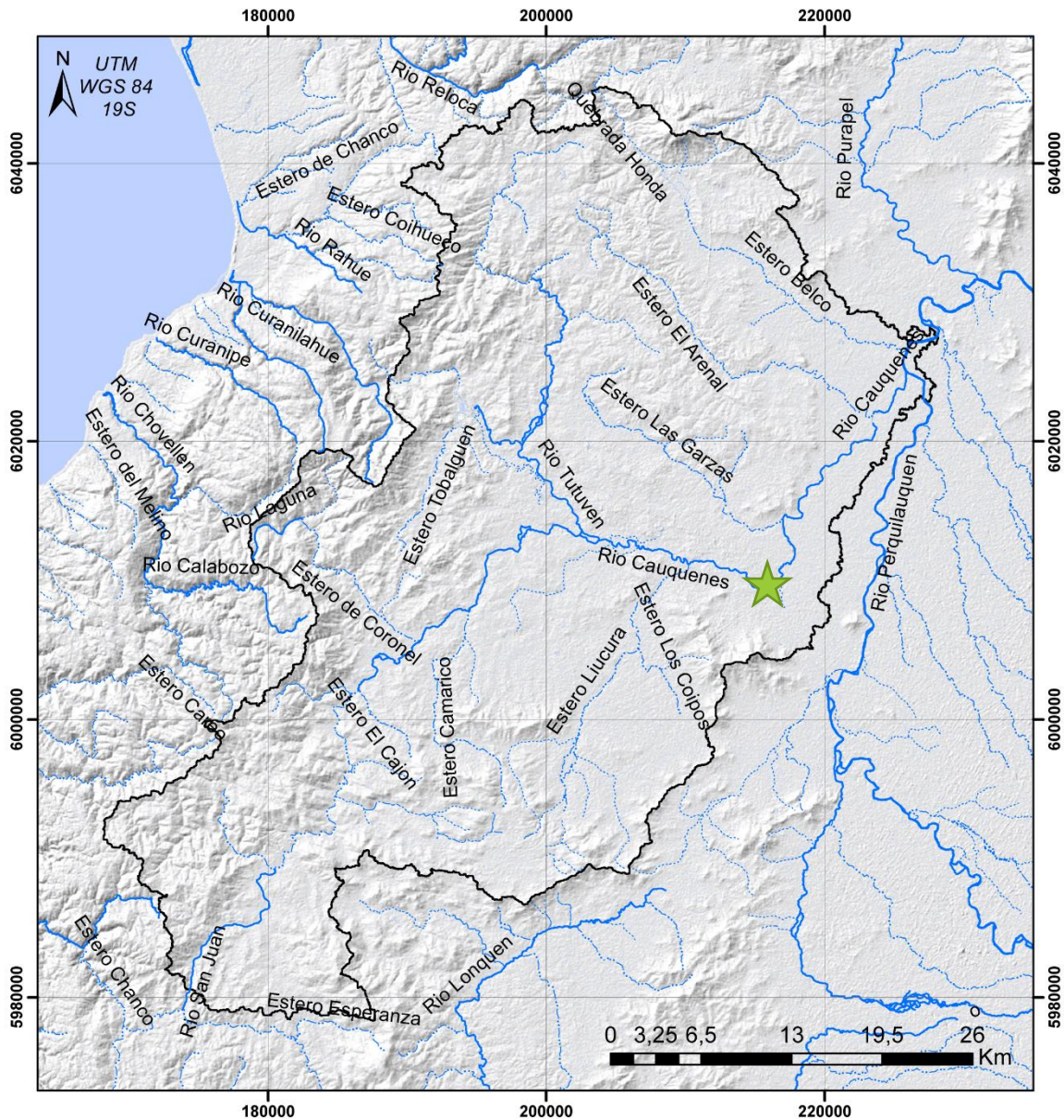


Figura 2.6: Hidrografía de la cuenca Cauquenes. Fuente: Elaboración propia.

2.6 USO DEL SUELO EN LA CUENCA DE CAUQUENES

De acuerdo con la CONAF (2009) se ha generado un mapa de uso de suelos (Figura 2.7). Considerando esto, se estimaron áreas dependiendo del uso que se le da a cada suelo. En este se observa que el terreno usado para la agricultura está repartido por toda la cuenca, pero existen mayores concentraciones de estos hacia el centro de ella. Los bosques aumentan hacia la Cordillera de la Costa dominando el límite oeste de la cuenca. Los cuerpos de agua corresponden al embalse Tutuvén al centro-oeste de la cuenca y a la laguna el Ciénago al norte de ella.

Tabla 2.1: Tipos de suelo según uso de la cuenca del río cauquenes. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAF 2009.

Tipo de suelo	Área calculada (km ²)
Ciudades, pueblos y uso industrial	7,43
Terreno de uso agrícola	316,25
Bosques	1018,87
Matorrales y praderas	630,85

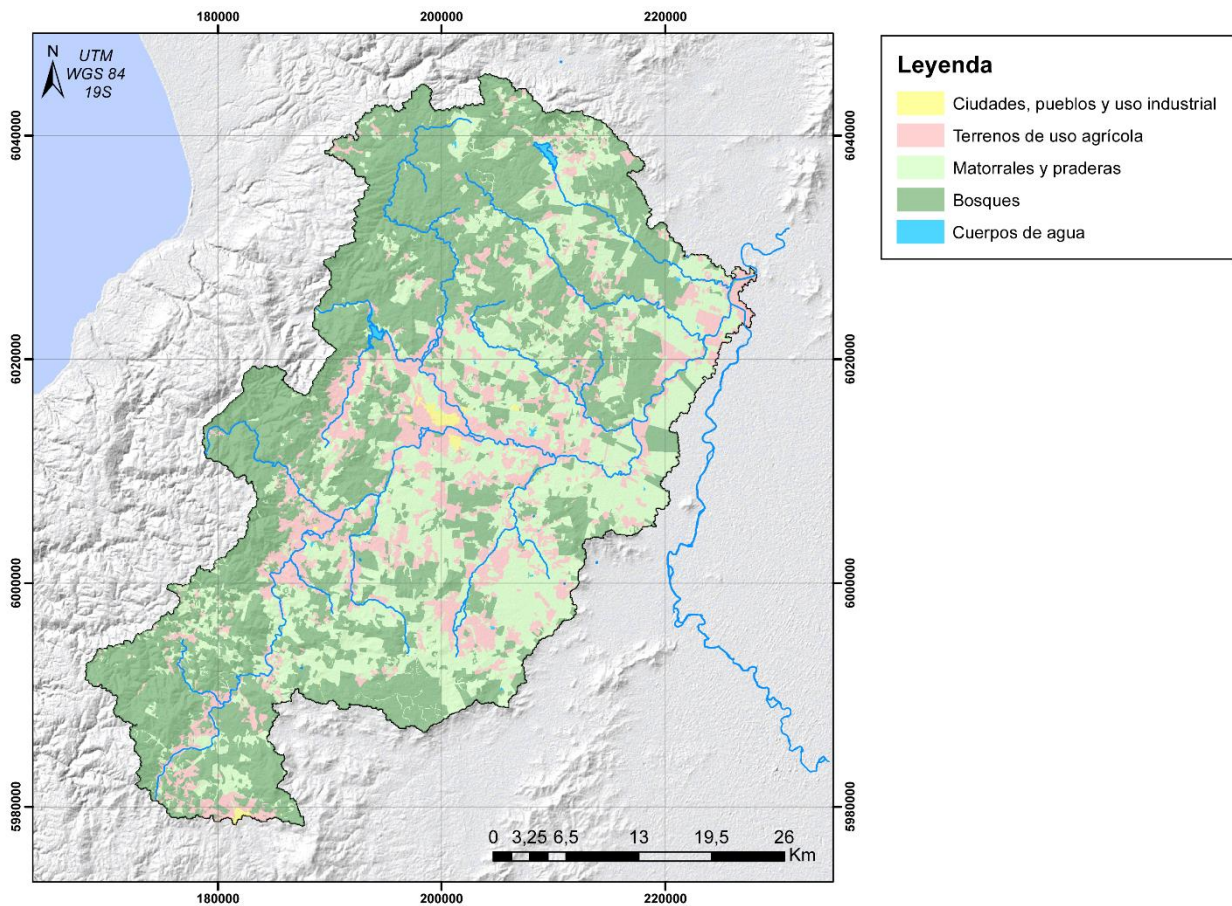


Figura 2.7: Usos de suelo de la cuenca Cauquenes. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la CONAF 2009.

3 MARCO GEOLÓGICO

3.1 GEOLOGÍA DE SUPERFICIE

A partir del mapa geológico de avance de Escobar *et al.* (1977), el mapa geológico de Chile 1:1.000.000 de SERNAGEOMIN (2002), datos recopilados en terreno (Anexo H) e información obtenida a partir de pozos se construye el mapa geológico de la Figura 3.5. En él, se reconocen las siguientes unidades rocosas:

3.1.1 Basamento metamórfico (Pz4b, PzTr4, Silúrico?-Carbonífero)

Corresponde a pizarras, filitas, esquistos, metareniscas y rocas cornéanas (Escobar *et al.*,1977). Su orientación en la zona de estudio es NNE-SSW, paralela al litoral. Existen dos divisiones del basamento metamórfico, las que se revisan a continuación.

La primera fue establecida por González-Bonorino en 1970. Él define 3 series de metamorfismo progresivo al norte de los 36° 30': Las serie Nirivilo, Curepto y Pichilemu. En la zona de estudio sólo afloran las dos primeras y su distribución se puede ver en la Figura 3.1. La serie Nirivilo muestra condiciones de formación de baja presión y presenta un metamorfismo térmico con un gradiente creciente hacia el este debido a la intrusión de un granito paleozoico. La serie Curepto muestra condiciones de formación de presión alta y presenta un metamorfismo dinámico-térmico con un gradiente creciente hacia el oeste. Se observan de este a oeste: pizarras, filitas y esquistos, todas en facies esquistos verdes. En la zona de estudio solamente afloran las pizarras (Escobar *et al.*,1977).

La segunda división la hacen Godoy (1970) y Aguirre *et al.* (1972). Ellos definen dos series metamórficas paralelas: la serie Oriental, de bajo gradiente P/T, y la serie Occidental, de intermedio a alto gradiente P/T. En la zona de estudio se reconoce solamente la serie Oriental. En 1974, Hervé define esta última como una serie constituida por metagrauwackas, metapelitas y rocas córneas asociadas a granitoides en facies que van desde esquistos verdes a anfibolita o granulita.

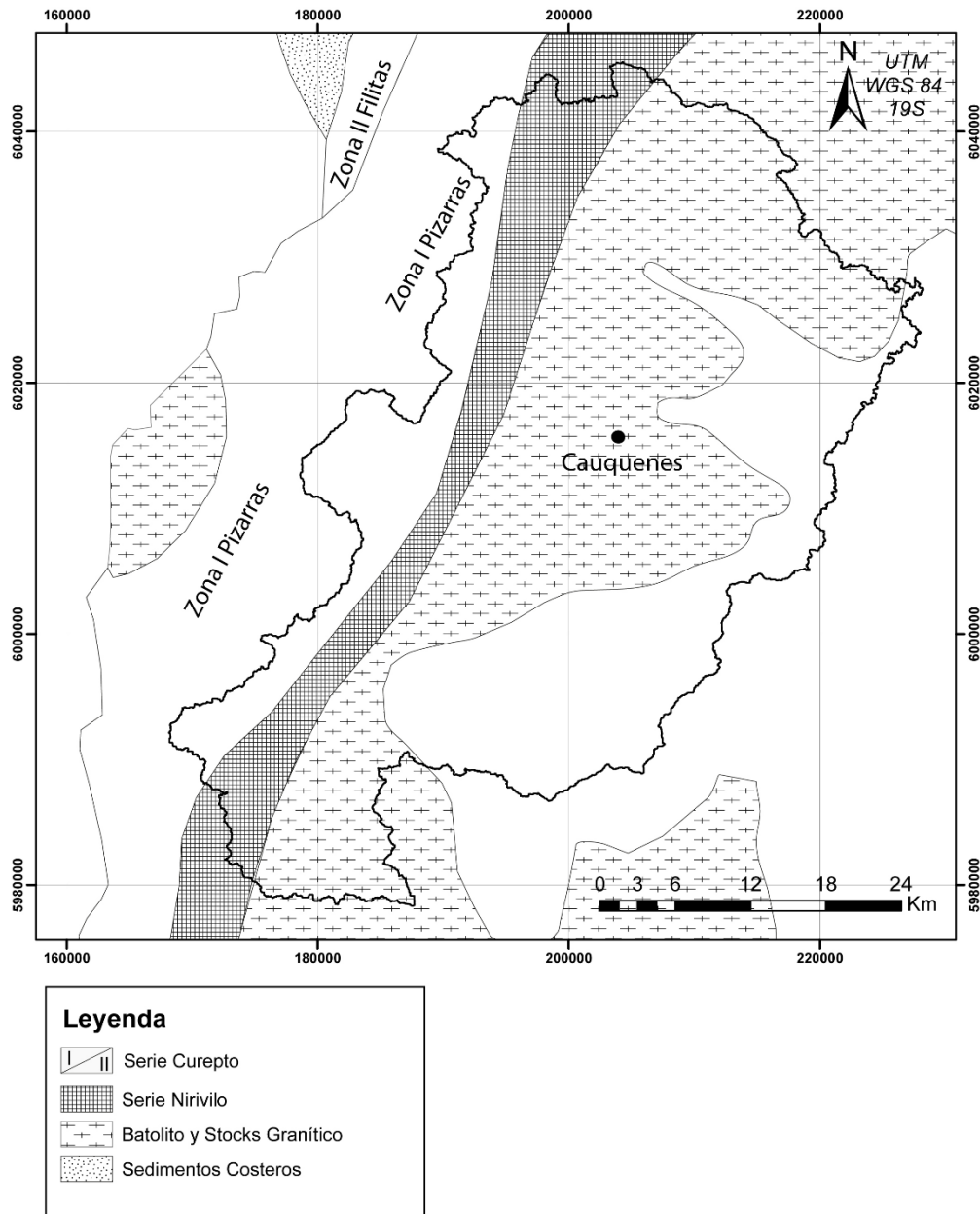


Figura 3.1: Distribución de series metamórficas según la definición de González- Bonorino. Fuente: Escobar et al. 1977

3.1.2 Depósitos y Rocas Estratificadas

3.1.2.1 Formación Patagua o Estratos de Pocilla (Tr1m, Triásico superior)

Corresponden a depósitos sedimentarios marinos y volcánicos que se encuentran en contacto transgresivos con el basamento cristalino o en contacto mediante fallas (Escobar et. al,1977).

La Formación Patagua fue definida por Muñoz, J. y González, E. en 1953. También se conoce como Estratos de Pocillas a la cual le asigna una edad rética. Ellos sostienen que esta formación se encontraría en discordancia de erosión sobre rocas graníticas paleozoicas, y hacia el norte se encontraría intruída por un cuerpo granodiorítico-diorítico y por otros plutones dacíticos. Esta secuencia aflora en la localidad de Pocillas, entre Parral y Cauquenes.

Se reconocen 4 sub-unidades (Moreno *et al.*,1976):

- a. Lutitas pizarrosas y areniscas: Serían las rocas basales de la secuencia y afloran de mejor manera al SE de pocillas. En este sector se presenta como lutitas pizarrosas intercaladas con areniscas de grano fino a medio, ricas en cuarzo, ferruginosas y con muscovita detrítica. Al sureste del cerro Hualve, se encuentran como areniscas de grano fino a medio de color gris amarillo intercalados con lutitas pizarrosas gris negras. En el flanco oeste del cerro Pocillas se encuentra como areniscas arcillosas de grano medio con abundante cuarzo y biotita.
- b. Rocas volcánicas: Afloran en el sector central del cerro Hualve, en el cerro Pocillas y en los Arrayanes (3 km al este de Pocillas). Corresponden a lavas y brechas en su mayoría andesítica-dacítica. Las lavas son porfíricas, presentan amígdalas y tienen cristales de plagioclasa y anfíbola. Las brechas tienen clastos angulosos de rocas andesíticas y fragmentos de plagioclasa y cuarzo.
- c. Pedernal: Se reconocen en los alrededores de Pocillas y al sur del cerro Hualve. Corresponden a rocas volcánicas ácidas fuertemente silicificadas que en algunas zonas están completamente obliteradas.
- d. Conglomerado de cuarzo: Aflora al sureste del cerro Hualve y en el sector de los Arrayanes. Está constituido por fragmentos muy redondeados de cuarzo policristalino lechoso. Localmente gradan a areniscas.

3.1.2.2 Depósitos piroclásticos pleistocenos (Pl3t)

Se pueden distinguir al norte de la zona de estudio. Moreno y Varela (1985) asignan su origen a los flujos piroclásticos del grupo de volcanes de Los Nevados de Chillán y lo definen como: "...una extensa planicie constituida por cenizas de colores claros y carácter ácido con diferentes grados de consolidación (o cementación) en los cuales se intercalan algunos estratos cineríticos-lacustres". Además, describen que estos últimos tienen espesores mínimos de 30 metros. Moreno (2015) define los depósitos cineríticos-lacustres como cenizas ácidas con intercalaciones de sedimentos finos de origen lacustre (limos y arcillas), lo que condicionaría el desarrollo de acuíferos semiconfinados de bajo rendimiento.

3.1.2.3 Depósitos no consolidados

Esta unidad se encuentra en el Valle Central y comprende sedimentos generalmente no consolidados de origen fluvial y gravitacional (Escobar *et al.*, 1977). Se distinguen los siguientes:

3.1.2.3.1 Depósitos fluviales actuales y antiguos (Qf)

Los depósitos fluviales actuales están distribuidos en las cercanías de los ríos y esteros. Se estima que tienen espesores de hasta 15 metros y corresponden a arenas gruesas y gravas finas, con intercalaciones de gravas medias de matriz arenosa y de arenas finas. Poseen buena selección y matriz escasa de arena fina y limo. El grado de compactación es bajo y casi no existe cementación. Sus clastos son subredondeados y polimícticos (DGA, 2013).

Los depósitos fluviales antiguos corresponden a sedimentos fluviales de edad pleistocena, eventualmente pliocena (DGA, 2013). Se ubican en al norte del río Cauquenes antes de que este cambie su curso hacia una dirección norte-sur (indicado por la estrella en la Figura 2.6) y cercanos a Pocillas. Al norte del río Cauquenes se observan como depósitos de grava clasto soportada, de clastos redondeados y con matriz de arena fina a gruesa. Presentan capas intercaladas de arenas medias y se encuentran en su mayoría cubiertos por depósitos piroclásticos.

En el sector de Pocillas los depósitos fluviales antiguos corresponden a arenas medias y gruesas, con intercalaciones de grava gruesas, cenizas y arenas finas limo-arcillosas. Su selección es baja a moderada y sus clastos son polimícticos. Su matriz es de arena media con arcilla y su grado de compactación es medio con escasa cementación (DGA, 2013).



Figura 3.2: Depósitos fluviales actuales

3.1.2.3.2 Depósitos gravitacionales (Qc)

Corresponden a escombros de falda y depósitos aluviales actuales y son de origen gravitacional. Se forman debido a la fragmentación de rocas expuestas en superficie, remoción y posterior deposición. Este proceso da origen a la formación de taludes y conos de deyección que terminan en algunos casos en pequeñas llanuras aluviales (DGA, 2013).

En la zona de San Juan y en Cauquenes su presencia es escasa, y están constituidos por arena media a gruesa y grava fina a media, las cuales están mal seleccionadas y su matriz es arcillosa. Sus clastos monomícticos van desde 5 a 50 cm. Su grado de compactación es bajo y no presenta cementación (DGA, 2013).

En la zona de Pocillas corresponde a arena media a gruesa y grava media a gruesa con arcilla. Son de mala selección y tienen una matriz de hasta 70% de arcillas. Sus clastos van desde 1 a 15 cm y son monomícticos. Su compactación es baja y su cementación es nula (DGA, 2013).

3.1.3 Rocas intrusivas

3.1.3.1 *Basamento granítico (Cpg, Carbonífero inferior-Pérmico medio)*

Corresponde a una unidad de entre 340 ± 40 a 292 ± 35 millones de años formada por tonalitas y granodioritas de grano medio a grueso y generalmente muestran haber estado sometidos a fuertes efectos cataclásticos. Los granitoides que lo conforman se caracterizan por presentar grandes cristales de microclina. En esta zona, la unidad se distribuye al oriente del basamento metamórfico y de manera paralela a este, con un contacto aproximadamente norte-sur (Escobar *et al.*, 1977).



Figura 3.3: Basamento granítico

3.1.3.2 Intrusivos Mesozoicos (Jig, Jurásico Inferior)

En 1977 Abad y Cucurella le asignan una edad máxima triásica y mínima jurásica y Escobar *et al.* (1977) plantea que esta unidad puede ser confundida con el basamento granítico y que se encuentran ubicadas generalmente en accidentes topográficos, destacándose por una gran altura debido a su gran resistencia a la meteorización.

Moreno *et al.* (1976) los define en el cerro Hualve como dioritas y granodioritas de grano medio constituidas por plagioclasa, cuarzo, anfíbola y/o piroxeno, biotita y menor ortoclasa. Estas estarían intruyendo a la serie del triásico superior y a su vez, estarían intruidas por pórfidos andesíticos y dacíticos.

Los pórfidos andesíticos afloran en el cerro Hualve y al este de Pocillas (en el cerro Quilvo). Presentan fenocristales de anfíbola, piroxeno y plagioclasa en una matriz afanítica o microcristalina. Están alterados a clorita, epidota, calcita, sericita, prehnita y pumpellita. Los pórfidos dacíticos tienen fenocristales de plagioclasa y anfíbola y afloran al suroeste de la estación Hualve y al noroeste de Pocillas (Moreno *et al.*, 1976).

3.1.4 Estructuras principales

La característica estructural más notable de la zona de estudio corresponde al lineamiento entre el basamento granítico y el basamento metamórfico con dirección NNE-SSW. La falla que se observa al NW de la cuenca posee esta misma dirección, y es la responsable de hacer aflorar el basamento granítico en el basamento metamórfico. Las estructuras más pequeñas tienen dirección NNE-SSW y NNW-SSE, y están asociadas a los intrusivos mesozoicos. Además, se observaron fallas de menor relevancia en los depósitos cuaternarios fluviales más antiguos. Estas se observan en la Figura 3.4.



Figura 3.4: Falla en depósito fluvial antiguo

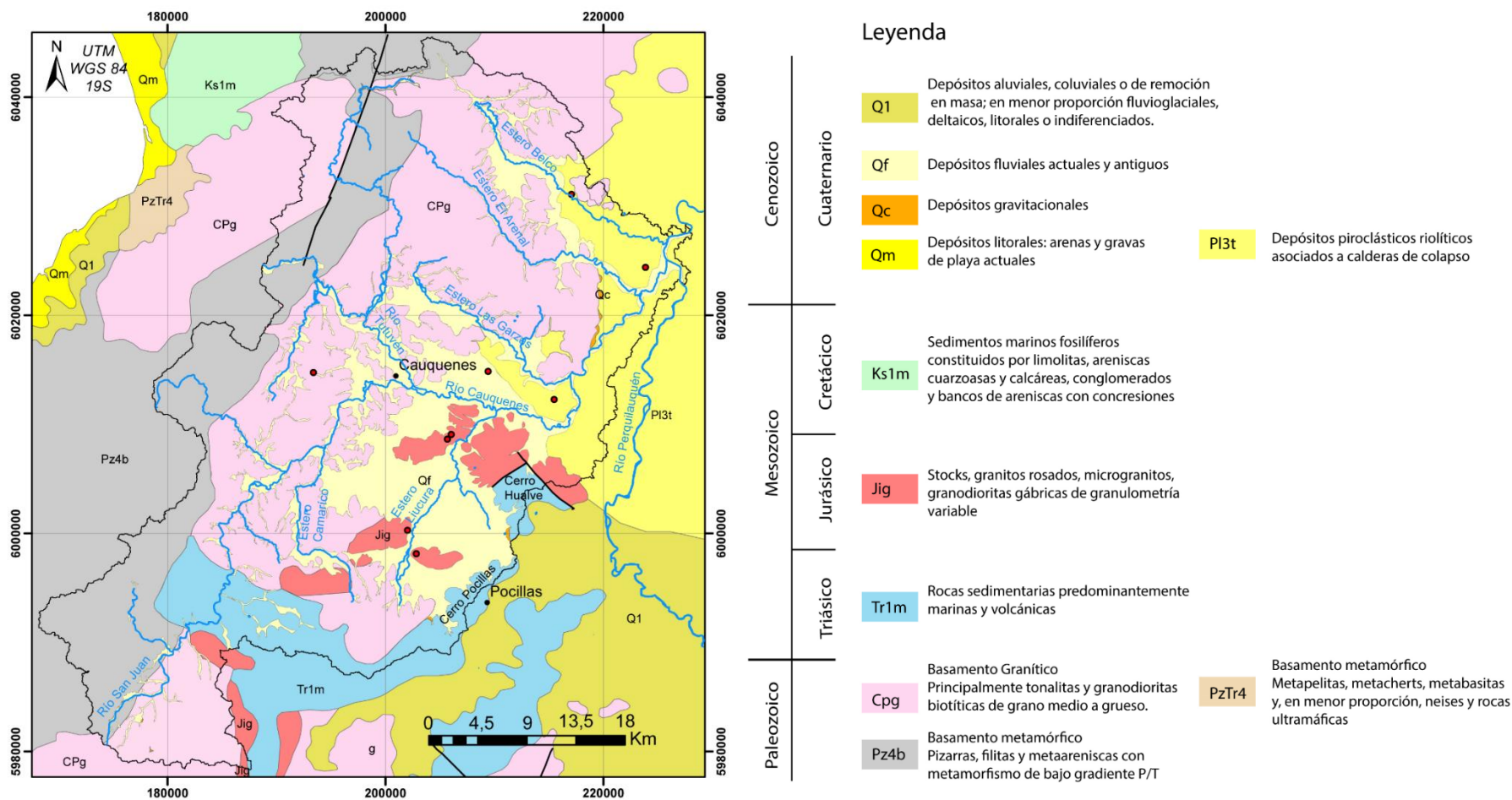


Figura 3.5: Geología regional de la zona de estudio. Fuente: Modificado de Escobar et al. (1977) y de SERNAGEOMIN (2001).

4 RESULTADOS

4.1 GEOFÍSICA

A partir del modelo de profundidad de basamento presentado por DGA (2013), el cual incluía datos de GCF (2001) y AC ingenieros (1999), se procedió a modificar su trazado en base a los nuevos antecedentes recopilados en los catastros de pozos y estratigrafía y a las observaciones geológicas realizadas en este trabajo. El resultado de esta labor se presenta en la siguiente figura:

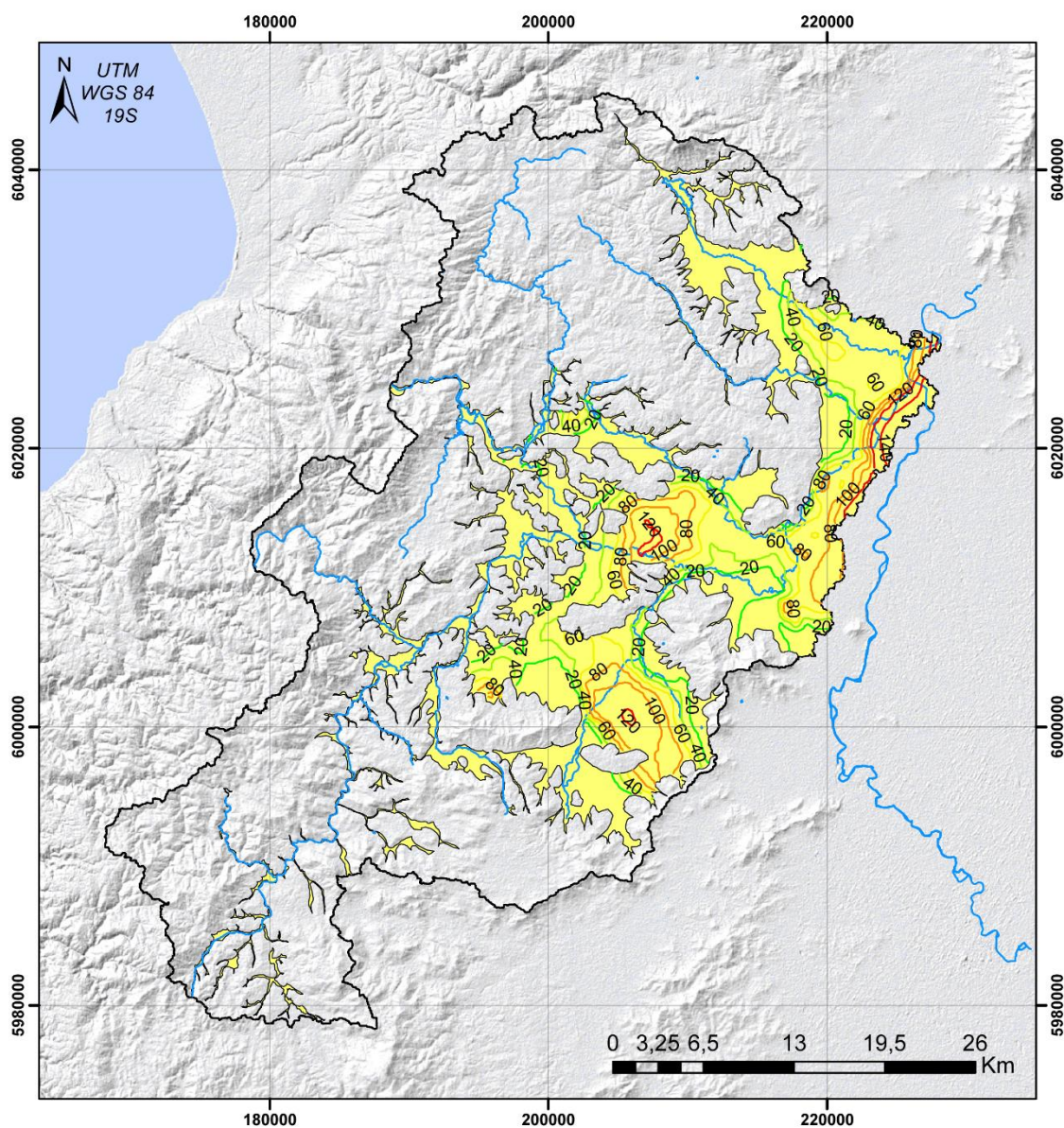


Figura 4.1: Mapa de profundidad de relleno de la cuenca Cauquenes en coordenadas UTM, WGS 84, huso 19S. Curvas destacadas cada 20 m. Fuente: Elaboración propia.

4.2 ESTRATIGRAFÍA CUATERNARIA

Mediante un trabajo de recopilación bibliográfica se generó un catastro de 1209 pozos. Este catastro fue utilizado tanto para determinar puntos para muestrear aguas subterráneas, como para realizar perfiles estratigráficos del relleno de la zona de estudio y para realizar un modelo en 3 dimensiones del relleno de la cuenca. Para esta tarea se necesitan pozos con estratigrafía conocida, información que se obtuvo del portal web de la Dirección General de Aguas, lo que reduce el catastro a 80 pozos y el cual se puede observar en el Anexo D. En la Figura 4.2 se muestran los perfiles que se trazaron con la información disponible y en consideración de los pozos más profundos. La profundidad de basamento se obtuvo de diversos estudios realizados en la zona que se muestran en detalle en el Anexo B.

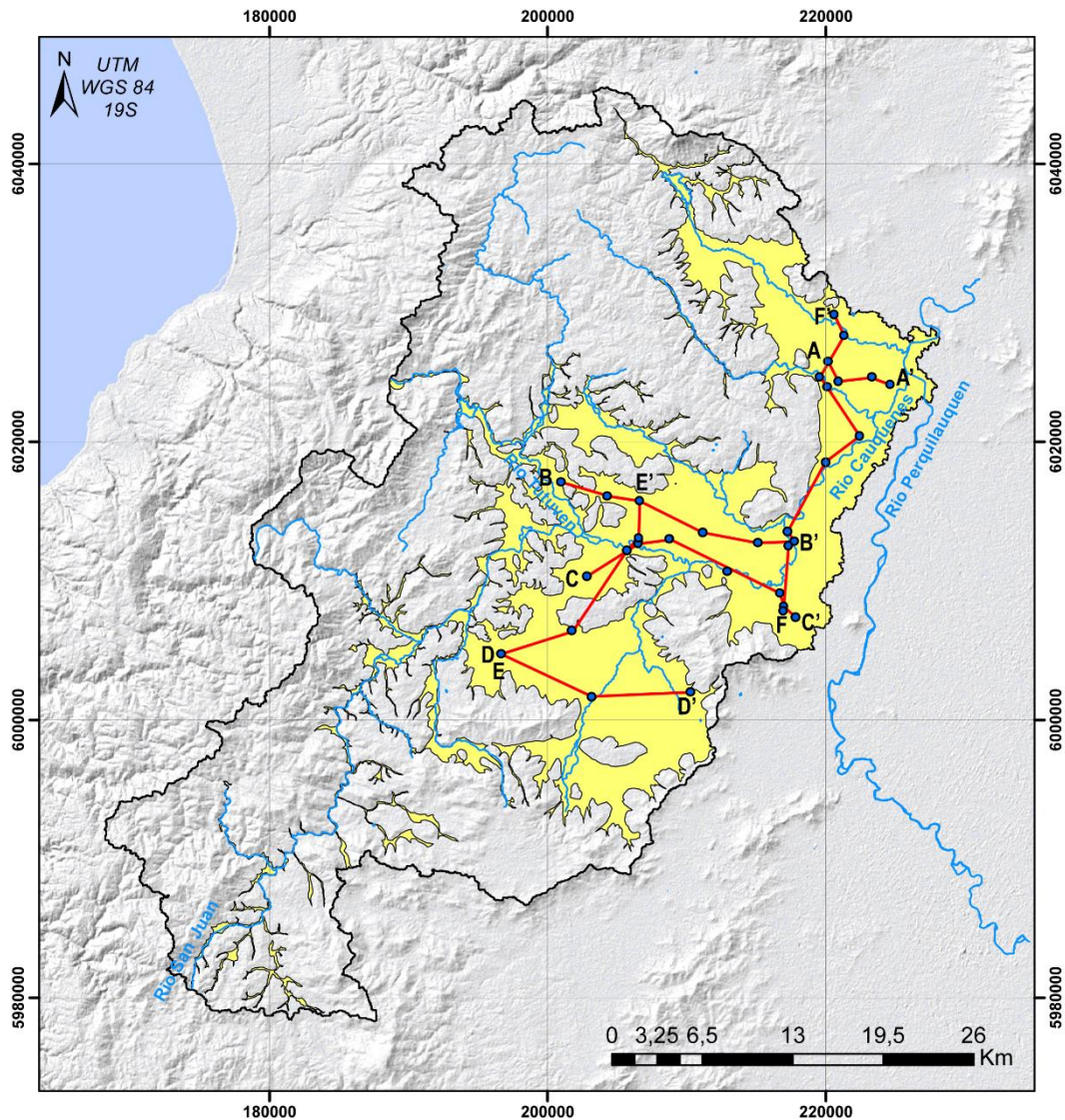
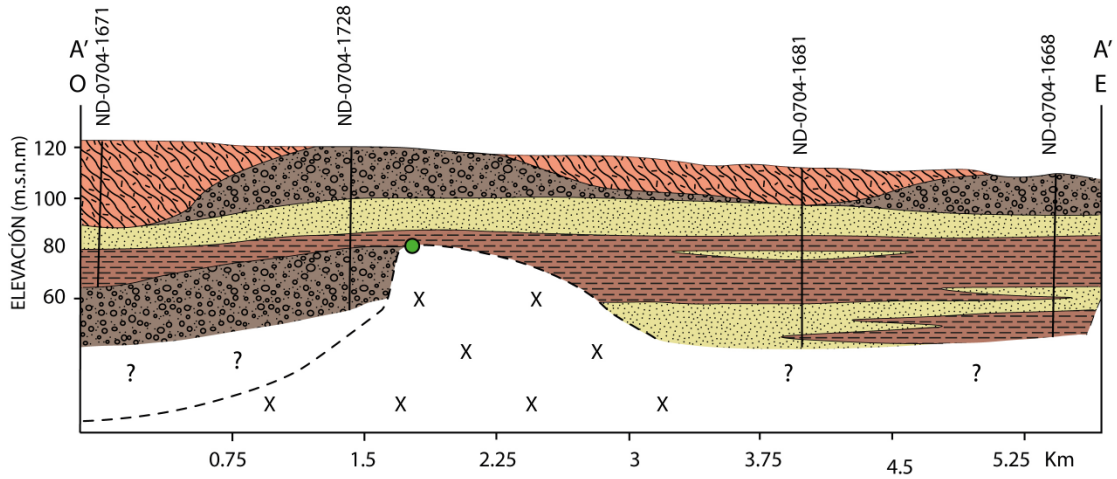


Figura 4.2: Distribución de perfiles estratigráficos.

Perfil AA'



Perfil BB'

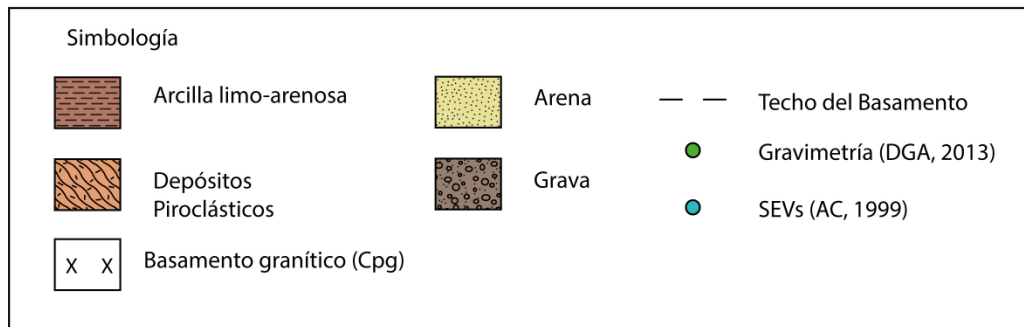
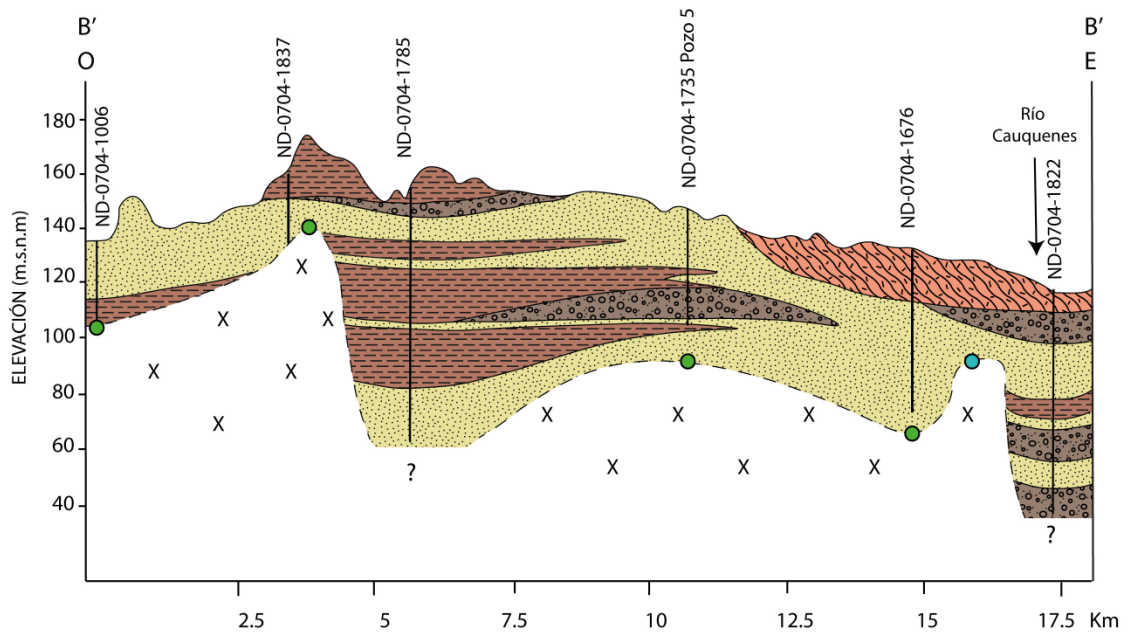
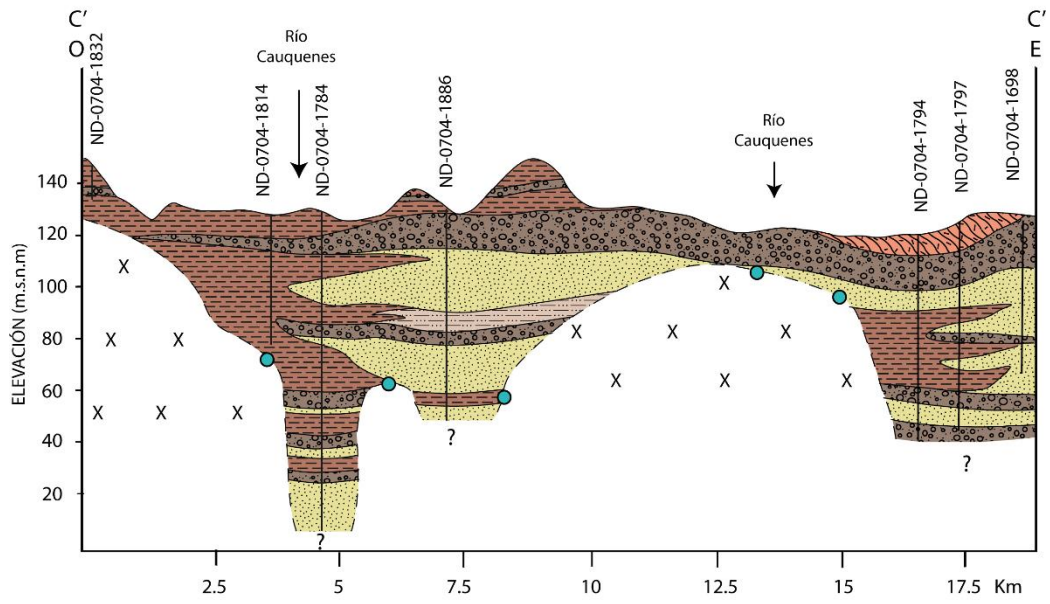


Figura 4.3: Perfiles AA y BB. Fuente: Elaboración propia.

Perfil CC'



Perfil DD'

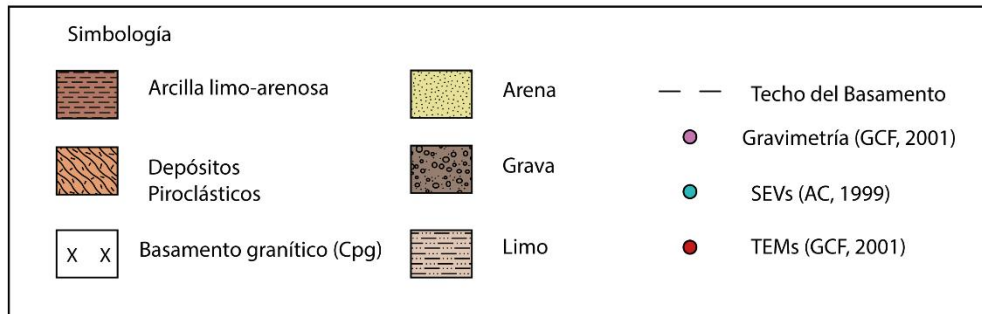
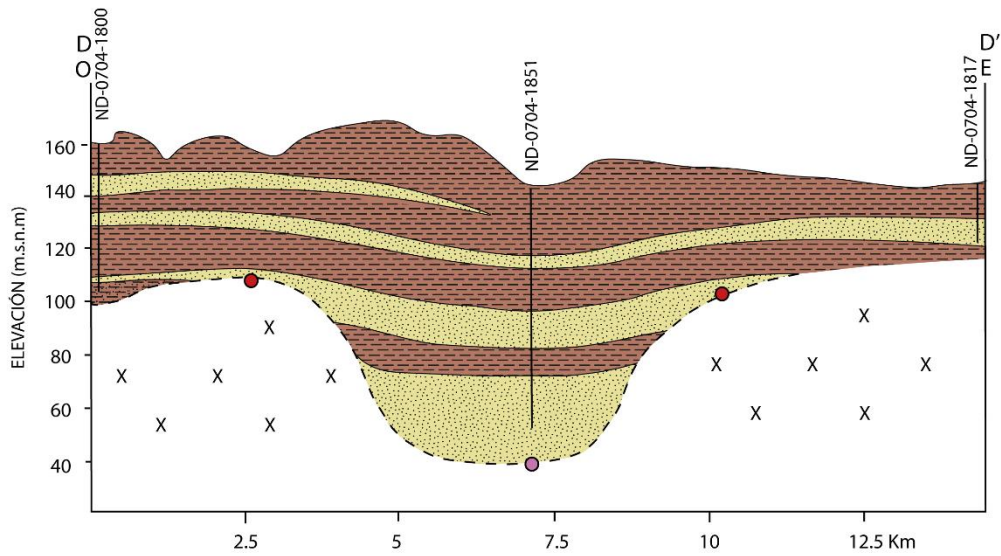
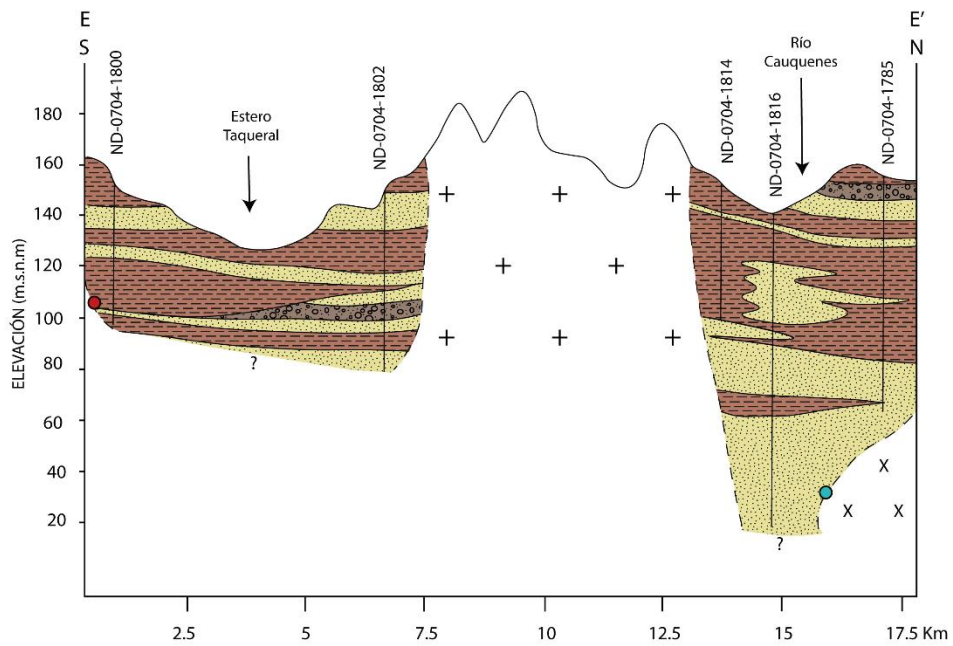


Figura 4.4: Perfiles CC y DD. Fuente: Elaboración propia.

Perfil EE'



Perfil FF'

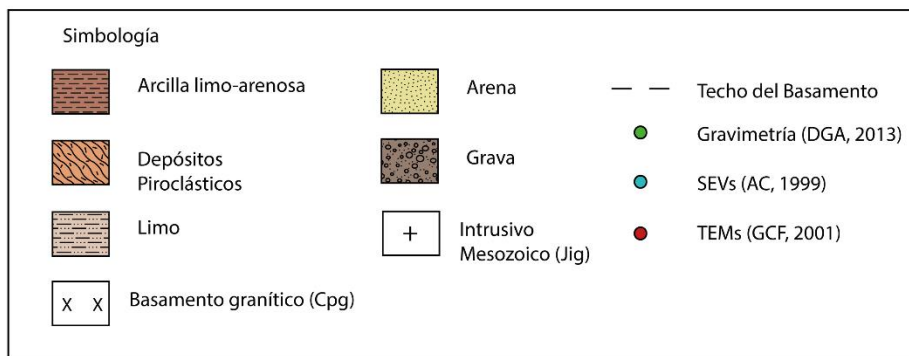
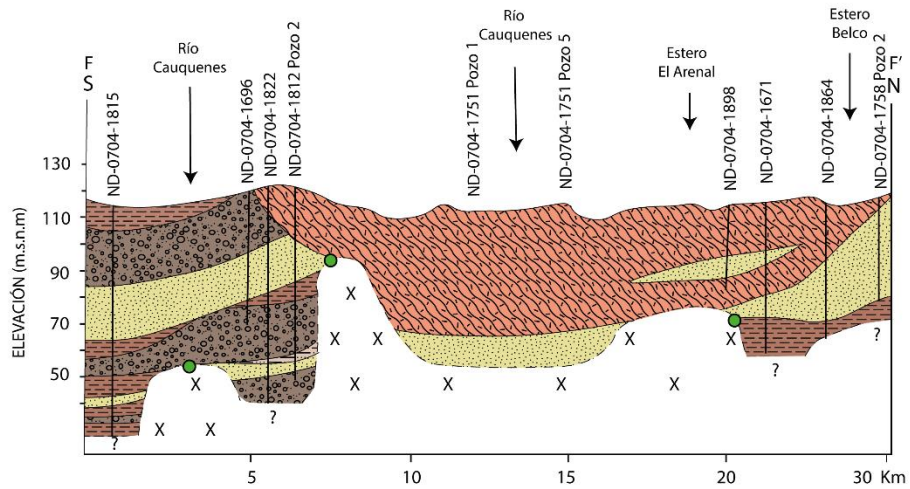


Figura 4.5: Perfiles EE y FF. Fuente: Elaboración propia.

4.3 HIDROGEOLOGÍA

4.3.1 Mapa de isopiezas y dirección del flujo subterráneo

El nivel freático fue medido con un pozómetro, estas mediciones se muestran en la tabla del Anexo C. A partir de ellas se hace una interpolación del tipo “Topo to raster” en el software Arcgis, función que interpola a través del método de diferencias finitas iterativas, para luego, construir un mapa de isopiezas en coherencia con la topografía (ver Figura 4.6).

Para este trabajo se midieron 27 niveles estáticos en el relleno de la cuenca. En la Tabla 4.1 se muestran los valores promedios de las profundidades del nivel freático según período y zona en la que fueron tomados, y en la Tabla 4.2 se muestra la cantidad de datos medidos según período y zona para calcular estos promedios.

El nivel freático es más profundo en período de verano (en promedio 11,25 m en febrero) y más somero en el período de invierno (en promedio 4,98 m en agosto).

En el mes de agosto la subcuenca del río Tutuvén es la que presenta los niveles freáticos más profundos (13,27 m en promedio) y los más someros se encuentran en la subcuenca el río San Juan (0,73 m en promedio). En el mes de noviembre los valores más profundos se encuentran en la subcuenca del estero Belco (15,11 m en promedio) y los más someros en Pocillas (6,46 m en promedio).

Tabla 4.1: Valores promedio de las profundidades del nivel estático en metros por subcuenca y por período.

Mes	Cuenca Cauquenes				Cuenca Perquilauquén	Promedio por período
	Belco	Pocillas	San Juan	Tutuvén		
Febrero	18,32	7,72	-	-	-	11,25
Agosto	4,18	3,40	0,73	13,27	9,67	4,98
Noviembre	15,11	6,46	7,25	-	-	9,43

Tabla 4.2: Cantidad de datos tomados por subcuenca y por período.

Mes	Cuenca Cauquenes				Cuenca Perquilauquén	Total por período
	Belco	Pocillas	San Juan	Tutuvén		
Febrero	1	2	0	0	0	3
Agosto	4	6	2	2	1	15
Noviembre	3	5	1	0	0	9

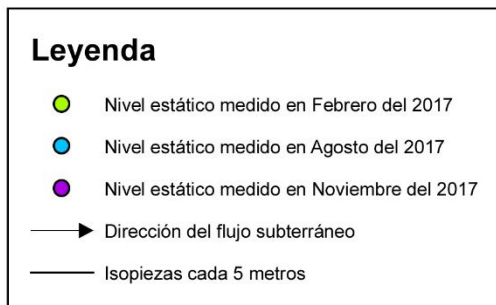
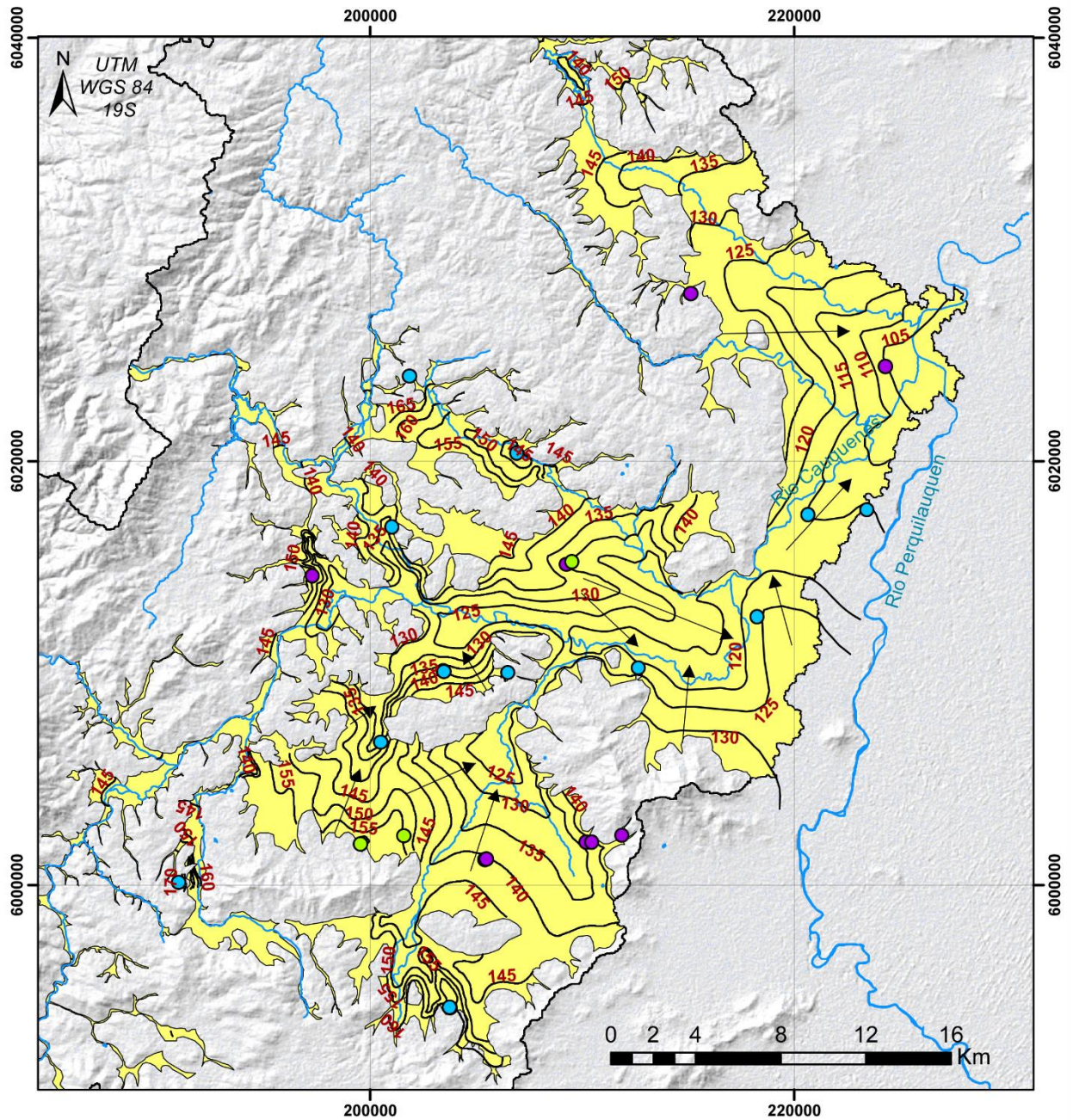


Figura 4.6: Mapa de isopiezas cada 5 metros. Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 Definición de unidades hidroestratigráficas

La cuenca del río Cauquenes está conformada por un acuífero multicapa, constituido por sedimentos principalmente fluviales de distinta granulometría, cubiertos al norte por depósitos piroclásticos. Este acuífero fue dividido en 4 unidades hidroestratigráficas según su litología y parámetros hidrológicos.

Existen varias definiciones del concepto de unidad hidroestratigráfica, pero aún no existe un consenso con respecto a cuál definición es la más aceptada. Para este trabajo se utiliza la definición de Poehls y Smith (2009), quienes la definen como una o más unidades geológicas de amplia extensión lateral, distinguibles de los cuerpos de roca y sedimentos que las rodean, y que se relacionan por medio de parámetros hidrológicos similares. Su límite no estaría necesariamente relacionado con el límite de la formación geológica, por lo que varias formaciones pueden conformar una unidad o una formación puede ser dividida en varias unidades.

Por otra parte, se les designaron niveles de productividad a cada unidad según las siguientes tablas:

Tabla 4.3: Productividad según tipo de acuífero, tomada de Lekgowe & Magowe 2009

Tipo de acuífero	Productividad			
	Alta	Moderada	Baja, localmente moderada	Baja
Acuíferos intergranulares no consolidado	a1	a2		
Acuíferos fisurados	b1	b2		
Formaciones de permeabilidad baja			c1	c2

Tabla 4.4: Caracterización hidráulica según el tipo de acuífero, según Struckmeier y Margat (1995).

Tipo de acuífero	Transmisividad [m ² /día]	Permeabilidad [m/día]	Caudal [L/s]	Productividad
a1, b1	> 75	> 3	> 10	Alta: Caudales de interés regional (abastecimiento a ciudades, riego, etc.).
a2, b2	5 - 75	0,2 – 3	1 – 10	Moderada: Caudales para abastecimiento local (comunidades pequeñas, irrigación a baja escala, etc.)
c1	0,05 - 5	0,002 – 3	0,01 – 1	En general baja, pero localmente moderada: Caudales para pequeños suministros locales

Tipo de acuífero	Transmisividad [m ² /día]	Permeabilidad [m/día]	Caudal [L/s]	Productividad
c2	< 0,05	< 0,002	< 0,01	Baja: bajos caudales que difícilmente aseguran suministros locales.

A partir de los perfiles estratigráficos y del cálculo de los parámetros hidráulicos se definen 4 unidades hidroestratigráficas, con una de ellas no acuífera:

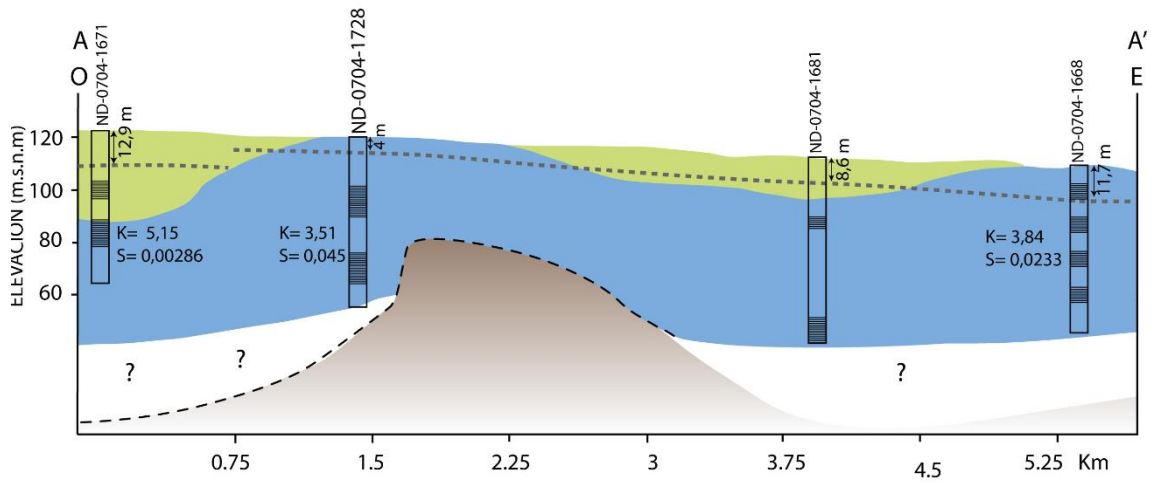
Unidad no acuífera: Corresponde al basamento constituido por rocas graníticas y metamórficas Paleozoicas, y rocas sedimentarias e intrusivos graníticos Mesozoicos. La porosidad de esta unidad es baja, pero presenta permeabilidad secundaria debido a fallas y a la alta meteorización que tiene en la superficie. Por esta razón no se descarta que pueda contener acuíferos.

Unidad hidroestratigráfica A (UHA): Se observa al norte de la zona de estudio, en las subcuencas del estero Belco y del río Tutuvén. Esta unidad tiene un espesor aproximado de 80 metros. Corresponde a gravas y arenas gruesas con arcillas en su matriz e intercalaciones de arcillas limo-arenosas a partir de los 40 metros de profundidad. Su productividad es alta a moderada. Su conductividad hidráulica toma valores del orden de magnitud 10^0 y 10^1 [m/día] y los pozos tienen un rendimiento de entre 5 y 85 [L/s]. El coeficiente de almacenamiento toma valores entre 10^{-3} y 10^{-7} hacia la subcuenca del río Tutuvén, y entre 10^{-3} y 10^{-1} desde la confluencia del río Cauquenes con el estero Las Garzas, hacia el norte.

Unidad hidroestratigráfica B (UHB): Se observa al sur de la zona de estudio, principalmente en las subcuencas del río San Juan y de Pocillas. Está constituido por una intercalación de arenas gruesas y arcillas limosas-arenosas. Su máximo espesor es de 100 metros en la subcuenca de Pocillas. Su productividad es moderada-baja. Su conductividad hidráulica toma valores del orden 10^{-2} a 10^{-1} [m/día] y su coeficiente de almacenamiento S, toma valores del orden de 10^{-1} y 10^{-3} . Los pozos tienen un rendimiento entre 1 y 9 [L/s].

Unidad hidroestratigráfica C (UHC): Es la unidad más nueva de la zona de estudio. Corresponde a depósitos piroclásticos consolidados. Está compuesta principalmente de cenizas y alcanza espesores de hasta 40 metros al este de la cuenca, entre el estero Arenal y el estero las Garzas. Se observan intercalaciones de depósitos granulares provenientes de paleocanales, que podrían tener un mejor rendimiento. Tiene variaciones granulométricas significativas y su permeabilidad es media a baja, con marcada anisotropía (Moreno, 2015). Su productividad es desconocida, ya que los pozos en esta unidad son pocos, pero es presumiblemente baja.

Perfil AA'



Perfil BB'

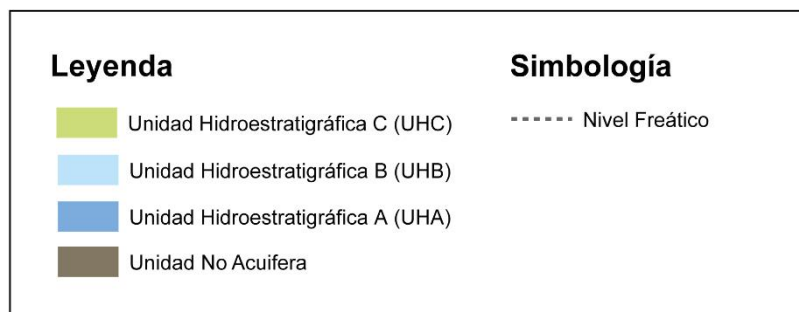
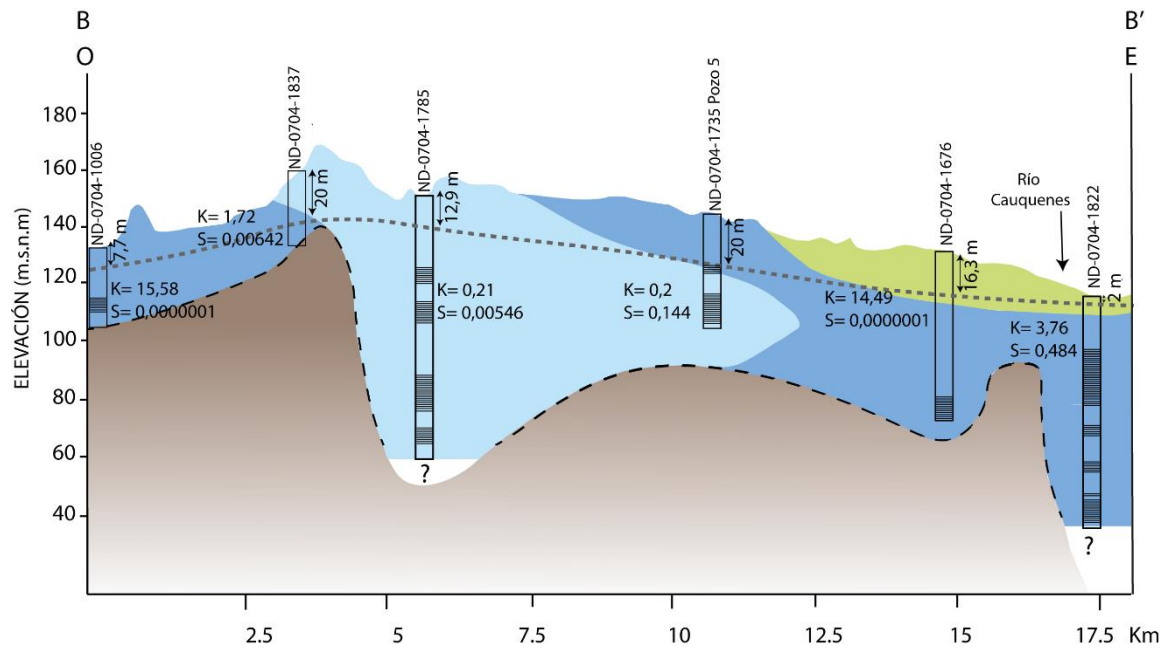
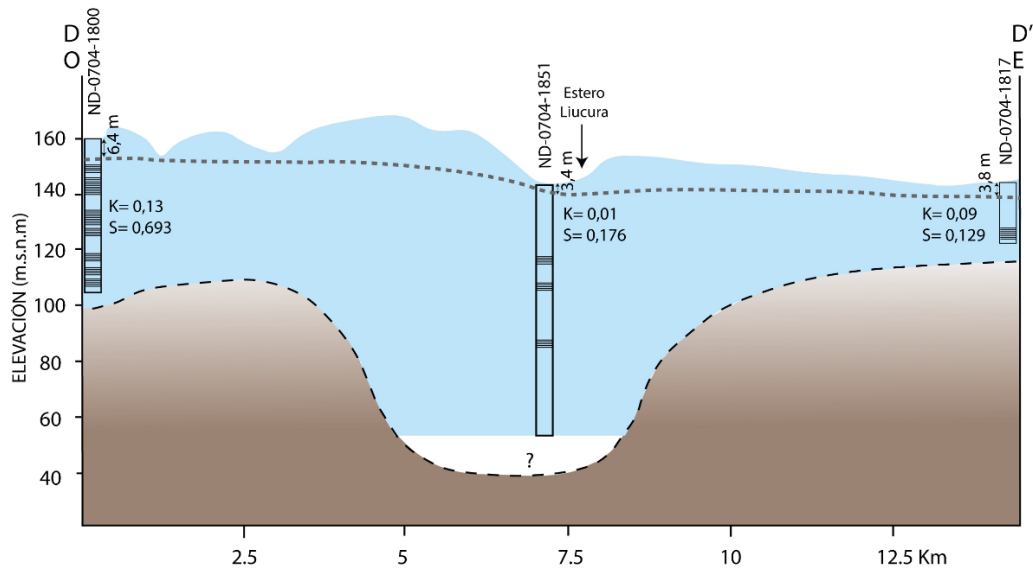


Figura 4.7: Perfiles hidrogeológicos AA' y BB'. La conductividad hidráulica K se encuentra en [m/día]. Fuente: Elaboración propia.

Perfil DD'



Perfil FF'

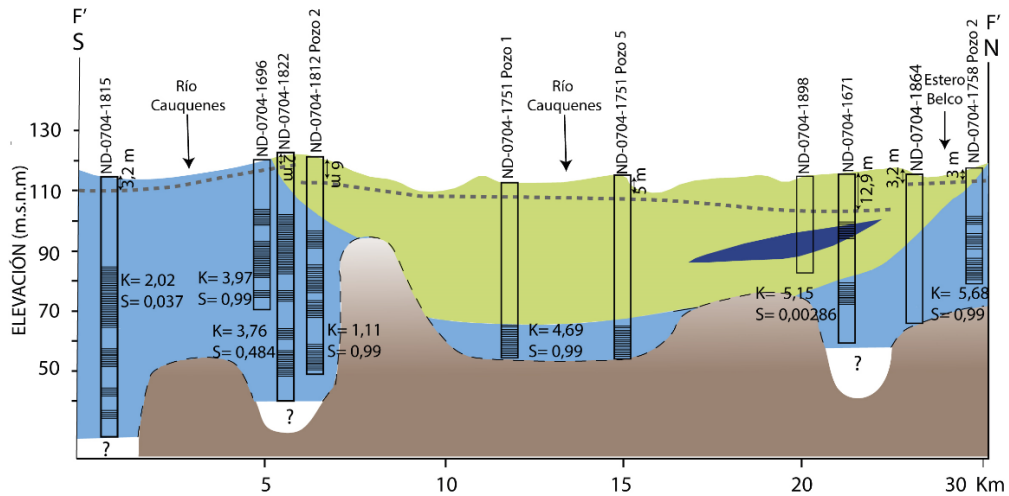


Figura 4.8: Perfiles hidrogeológicos DD' y FF'. La conductividad hidráulica K se encuentra en [m/día]. Fuente: Elaboración propia.

4.4 HIDROGEOQUÍMICA

4.4.1 Captaciones superficiales y subterráneas

La primera campaña de terreno se realizó en verano, entre los días 24-Feb-2017 y 27-Feb-2017. En esta campaña se tomaron desde la muestra PCA-001 a la PCA-019, de las cuales las muestras entre PCA-007 a PCA-014 no fueron consideradas debido a que se encuentran fuera de la cuenca Cauquenes. En esta misma campaña se tomaron dos muestras de agua superficiales, una fue tomada antes de la desembocadura del Río Cauquenes (*PCA-016*) y la otra en el río Perquilauquén (*PCA-005*). El día 15 de marzo se tomó la muestra *PCA-023*, que se considera dentro de las muestras obtenidas en la campaña de verano.

Entre los días 30-Ago-2017 y 04-Sept-2017 se realizó una segunda campaña de terreno, correspondiente a la campaña de invierno. En esta campaña se tomaron 33 muestras de aguas, entre la PCA-024 hasta la PCA-056. Acá se tomaron dos muestras superficiales: una ubicada en el río Cauquenes antes de llegar a la ciudad de Cauquenes (*PCA-033*) y la otra en el mismo punto que la muestra PCA-016 (*PCA-025*).

Las muestras que fueron tomadas en la cuenca vecina Perquilauquén fueron las PCA-005, PCA-006, PCA-049 y PCA-051.

Existen además muestras de aguas subterráneas que fueron tomadas en el mismo lugar tanto en la campaña de invierno como en la de verano, estas son: La muestra PCA-019 con la PCA-024, la PCA-015 con la PCA-026 y la PCA-023 con la PCA-029.

Los resultados de los análisis químicos de elementos mayores y traza se encuentran en detalle en el Anexo F.

En la Figura 4.9 se puede ver la distribución de las muestras tomadas en las 2 campañas.

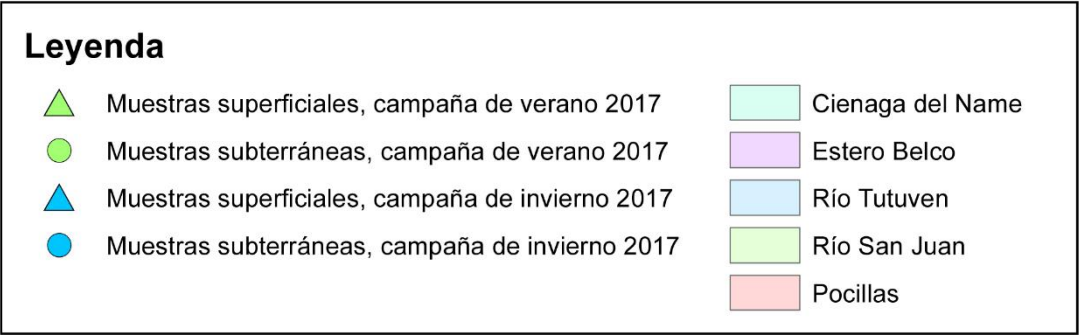
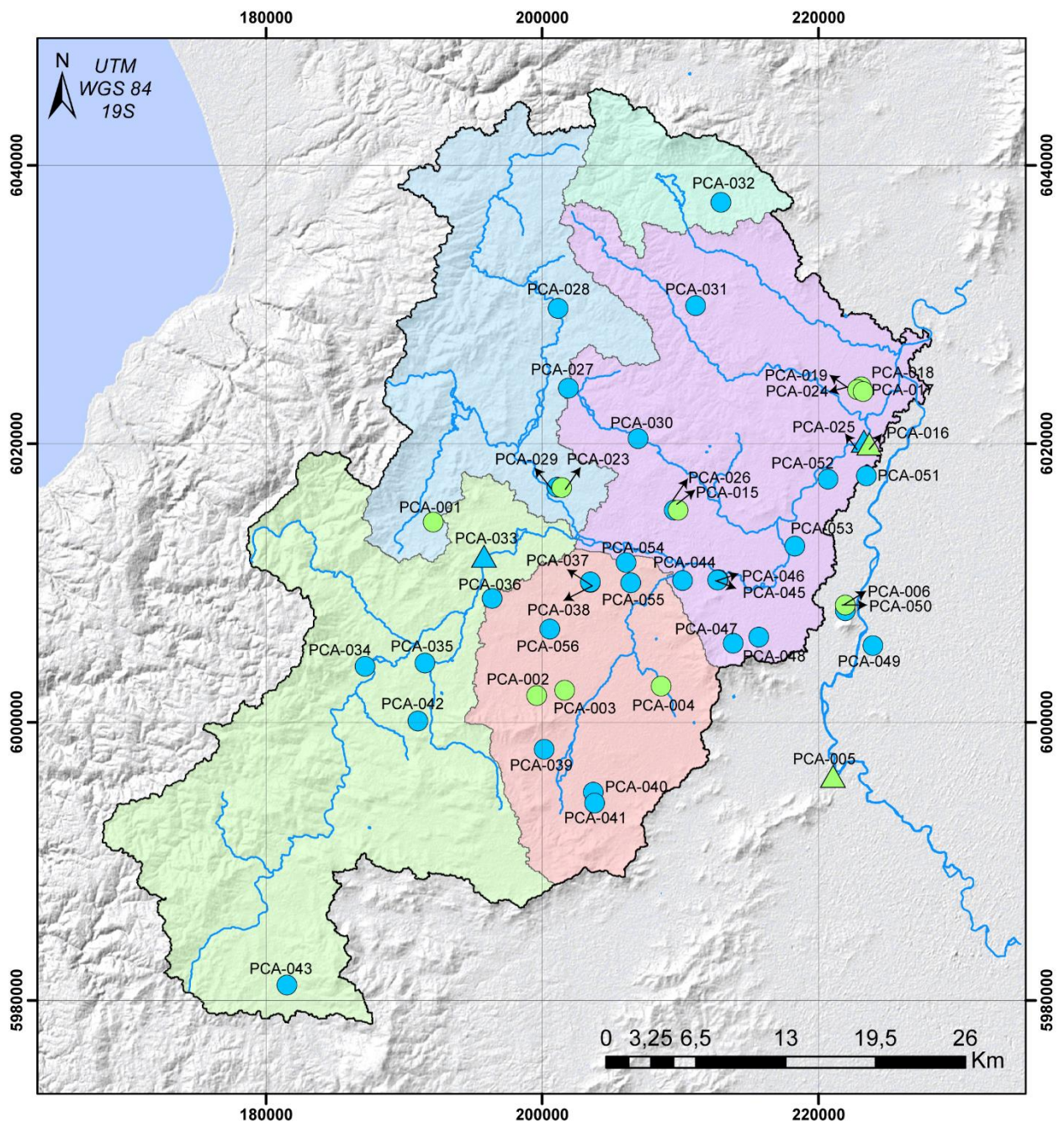


Figura 4.9: Ubicación de muestras tomadas en las campañas de invierno y de verano del 2017.

4.4.2 Parámetros fisicoquímicos

4.4.2.1 Conductividad eléctrica

Las aguas de la cuenca poseen conductividades eléctricas entre 76 y 890 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] para aguas subterráneas. Para aguas superficiales toma el valor de 72 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] en el caso de la muestra PCA-025, obtenida en invierno en la desembocadura del río Cauquenes, y de 320 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] en la muestra PCA-016, correspondiente a la misma muestra tomada en verano.

En la Figura 4.10 se muestra las conductividades eléctricas y la profundidad del pozo que fue muestreado.

4.4.2.2 pH

El pH de la cuenca Cauquenes toma valores levemente ácidos y levemente alcalinos, pero en su mayoría es neutro. En las aguas subterráneas varía entre 6 y 8,4, ocurriendo un aumento en el pH en verano con respecto al pH medido en invierno para las muestras que fueron repetidas en ambas campañas. Para aguas superficiales el pH aumenta de 6,67 a 8,08 en el período de verano en la desembocadura del río Cauquenes.

Como se observa en la Figura 4.11, los valores de pH más básicos se encuentran en la subcuenca del estero Belco, al noreste de la cuenca.

4.4.2.3 Temperatura

La temperatura de las aguas subterráneas aumenta en verano. En este período alcanzó 24,9°C en la muestra PCA-006. En invierno las temperaturas varían entre 10,6°C y 20°C. De las muestras de invierno, se puede observar que las temperaturas más frías se distribuyen bordeando por el sur al río Cauquenes (Figura 4.12).

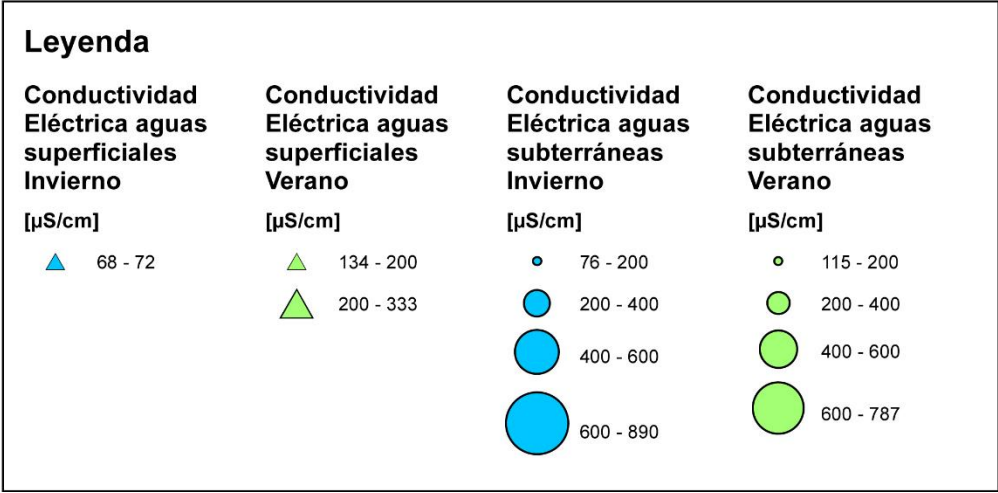
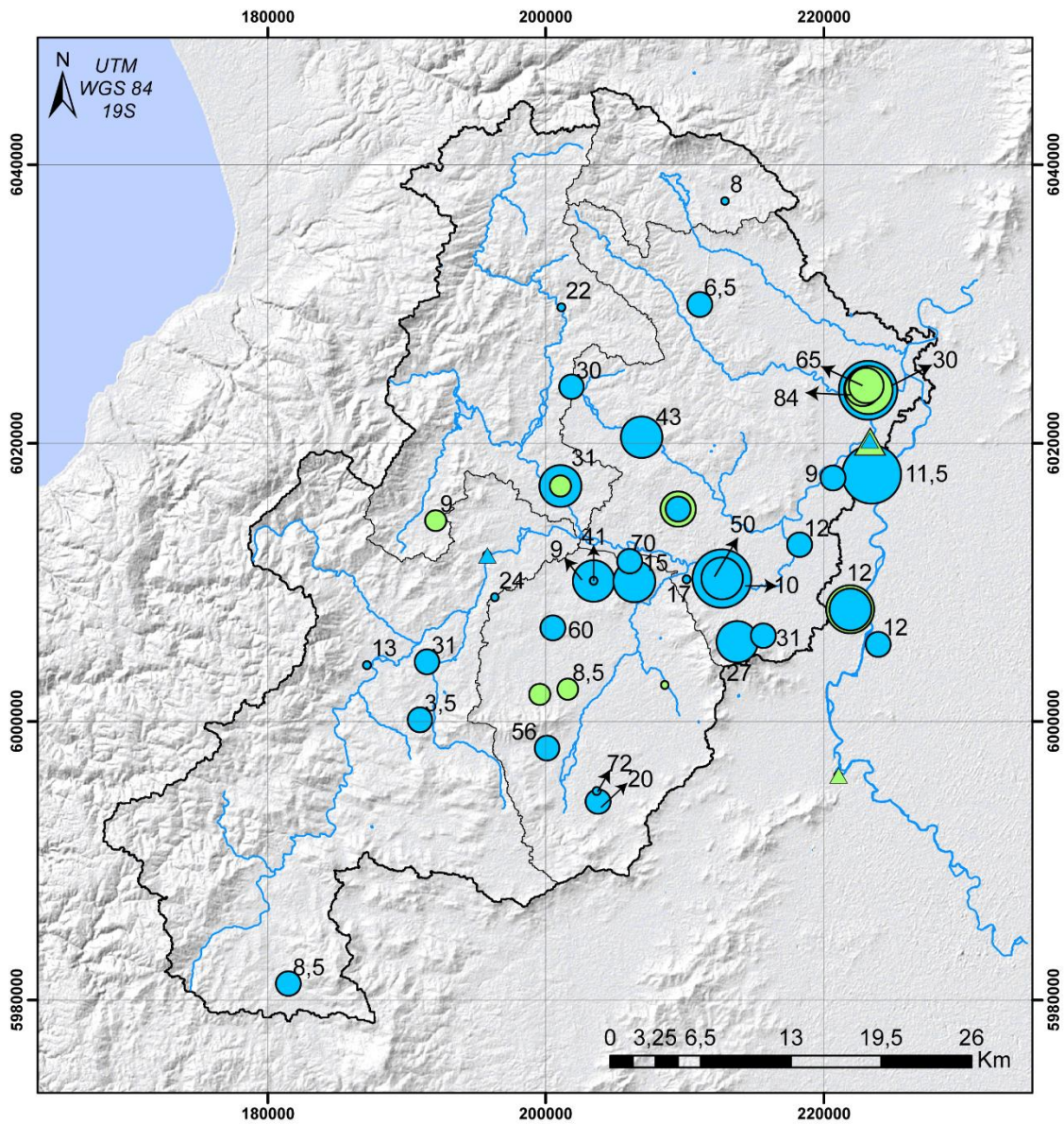


Figura 4.10: Mapa de conductividades eléctricas de aguas subterráneas y superficiales. La etiqueta muestra las profundidades de los pozos. Fuente: Elaboración propia.

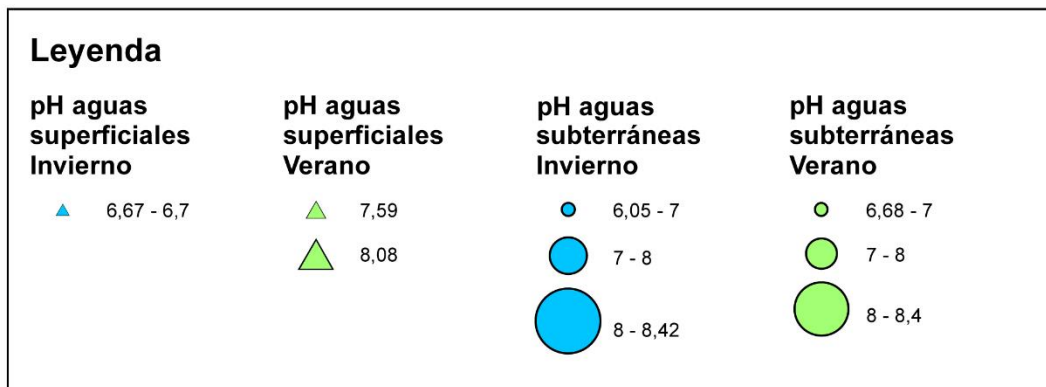
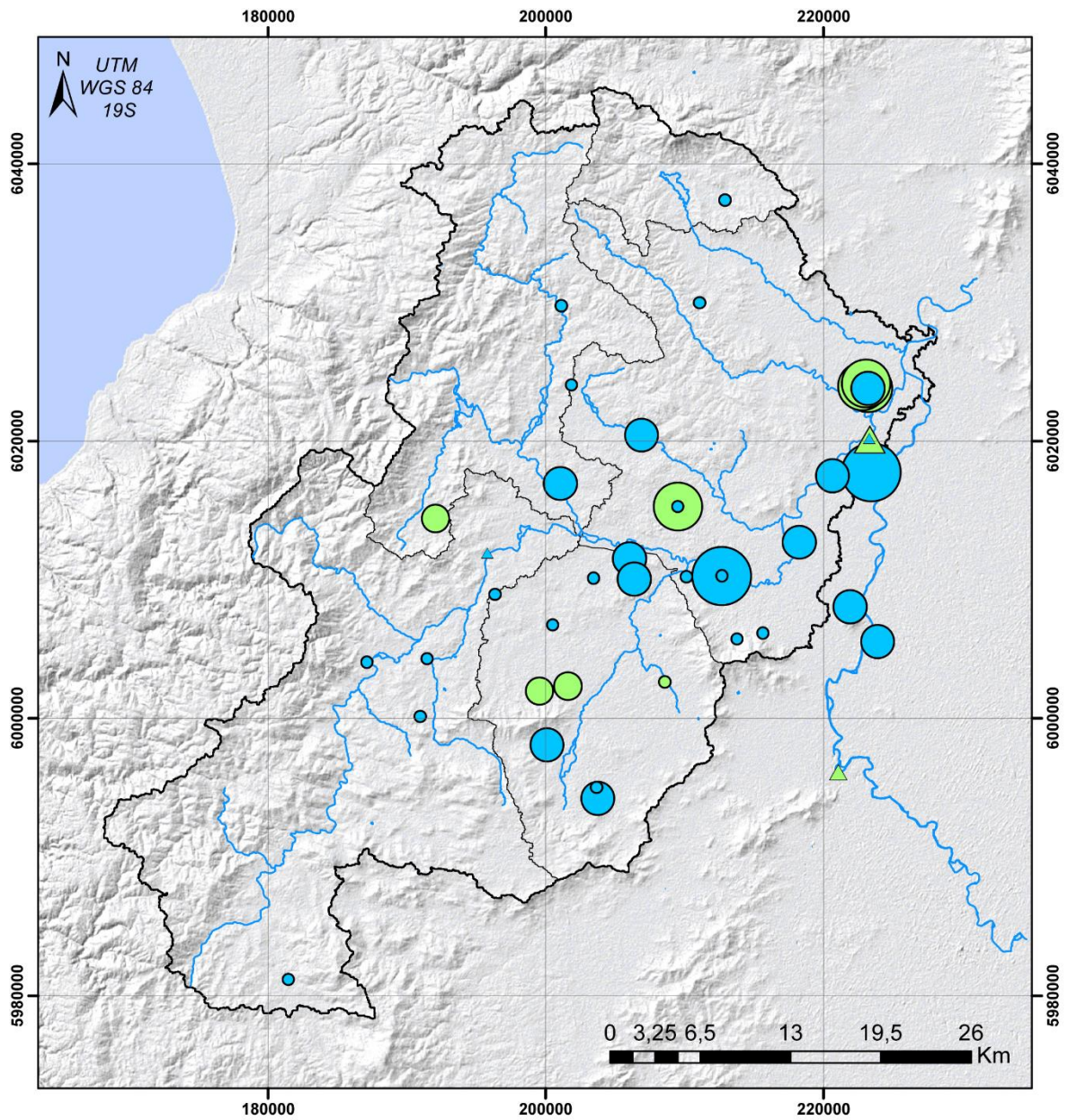


Figura 4.11: Mapa de pH elaborado a partir de muestras de aguas subterráneas y superficiales. Fuente: Elaboración propia

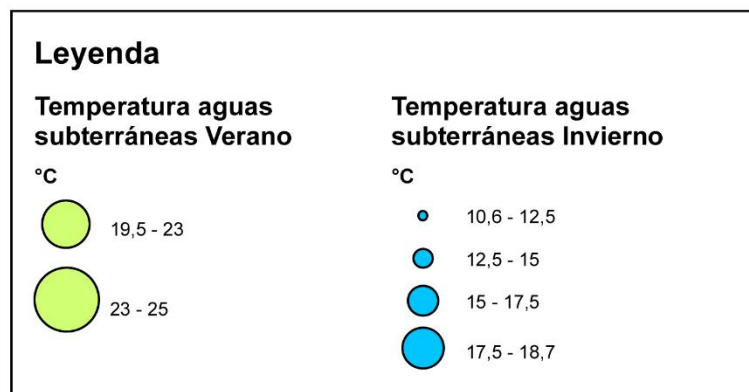
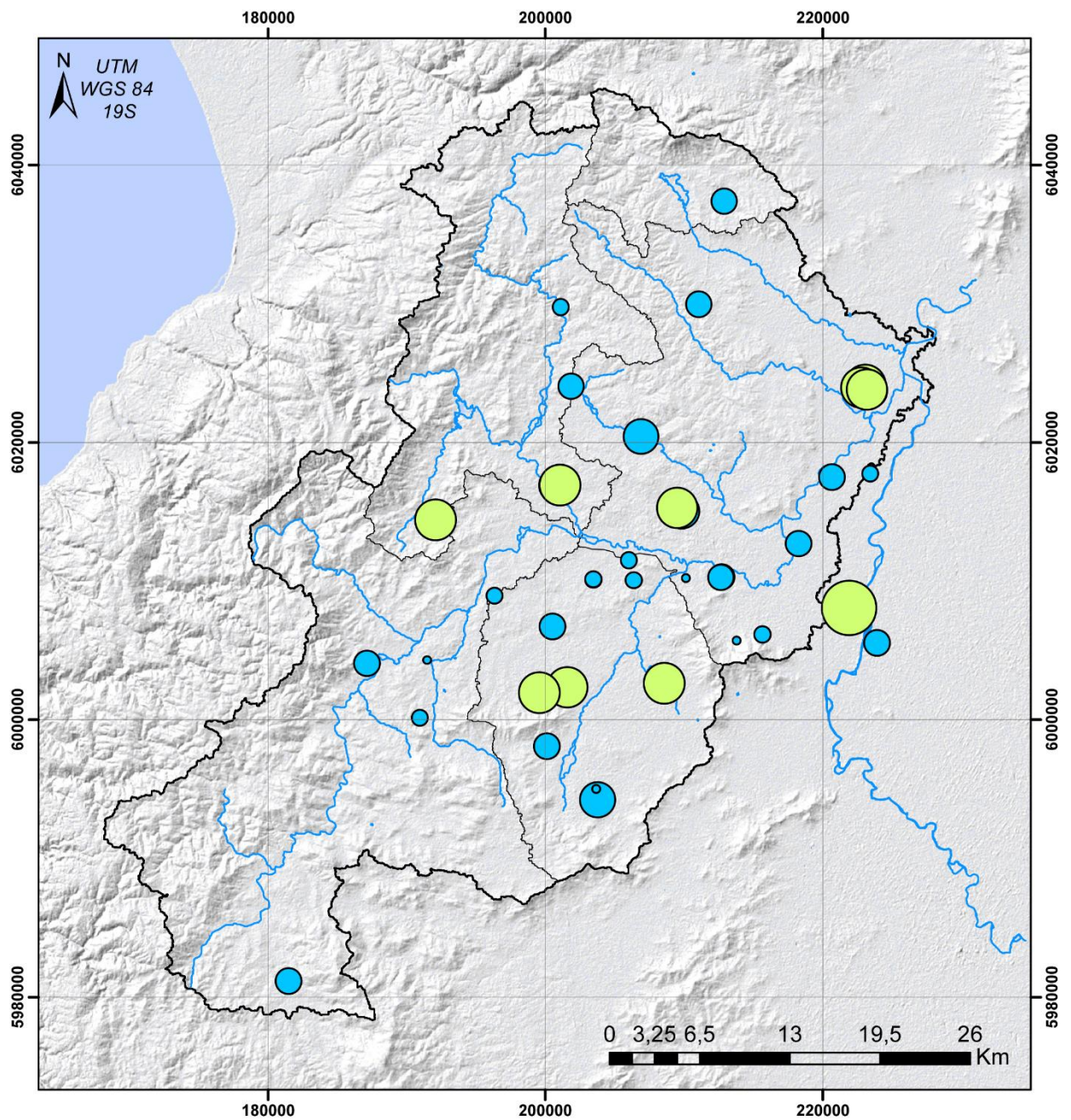


Figura 4.12: Temperatura de aguas subterráneas. Fuente: Elaboración propia

4.4.3 Salinidad

En el presente apartado se clasifican las aguas a partir de su contenido de sales. Esta clasificación, elaborada por la *IDA* (International Desalination Association), se observa a continuación:

Tabla 4.5: Clasificación de salinidad según IDA.

Salinidad	Contenido total de sólidos disueltos (TDS)
Agua pura	TDS < 500 mg/l
Agua dulce	500 mg/l < TDS < 3.000 mg/l
Agua salobre	3.000 mg/l < TDS < 20.000 mg/l
Agua marina	20.000 mg/l < TDS < 50.000 mg/l
Salmuera	TDS > 50.000 mg/l
Agua residual	Agua procedente de núcleos urbanos/industrias

Las aguas de la cuenca del río Cauquenes poseen valores de TDS entre 15[mg/l] y 445 [mg/l], lo que las categoriza como agua pura.

4.4.4 Balance iónico

Se calculó el error del análisis químico realizando un balance iónico de las muestras (Tabla 4.6). El error que fue aceptado es de un 5%, por lo que hay 10 muestras que fueron descartadas: PCA-004, PCA-019, PCA-023, PCA-027, PCA-030, PCA-033, PCA-034, PCA-044, PCA-051 y PCA-054. El error calculado para estas muestras fue de entre un 5% y un 10%, a excepción de la muestra PCA-033 la cual superó el 10%.

Tabla 4.6: Error de los análisis químicos.

Código	Cuenca	Campaña	Tipo de agua	Error %	Admisibilidad
PCA-001	Cauquenes	Verano	Subterránea	0.15	Admisible
PCA-002	Cauquenes	Verano	Subterránea	-1.53	Admisible
PCA-003	Cauquenes	Verano	Subterránea	-0.51	Admisible
PCA-004	Cauquenes	Verano	Subterránea	-6.34	Descartable
PCA-005	Perquillauquén	Verano	Superficial	4.56	Admisible
PCA-006	Perquillauquén	Verano	Subterránea	3.52	Admisible
PCA-015	Cauquenes	Verano	Subterránea	0.41	Admisible
PCA-016	Cauquenes	Verano	Superficial	2.46	Admisible
PCA-017	Cauquenes	Verano	Subterránea	2.89	Admisible

Código	Cuenca	Campaña	Tipo de agua	Error %	Admisibilidad
PCA-018	Cauquenes	Verano	Subterránea	2.43	Admisible
PCA-019	Cauquenes	Verano	Subterránea	5.25	Descartable
PCA-023	Cauquenes	Verano	Subterránea	-7.02	Descartable
PCA-024	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-1.31	Admisible
PCA-025	Cauquenes	Invierno	Superficial	-0.48	Admisible
PCA-026	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-4.70	Admisible
PCA-027	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-5.31	Descartable
PCA-028	Cauquenes	Invierno	Subterránea	1.45	Admisible
PCA-029	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-3.46	Admisible
PCA-030	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-5.65	Descartable
PCA-031	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-2.42	Admisible
PCA-032	Cauquenes	Invierno	Subterránea	0.13	Admisible
PCA-033	Cauquenes	Invierno	Superficial	-10.25	Descartable
PCA-034	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-5.84	Descartable
PCA-035	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-4.00	Admisible
PCA-036	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-4.66	Admisible
PCA-037	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-3.61	Admisible
PCA-038	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-1.19	Admisible
PCA-039	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-4.30	Admisible
PCA-040	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-4.45	Admisible
PCA-041	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-3.97	Admisible
PCA-042	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-1.98	Admisible
PCA-043	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-3.07	Admisible
PCA-044	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-7.33	Descartable
PCA-045	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-4.99	Admisible
PCA-046	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-0.73	Admisible
PCA-047	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-2.35	Admisible
PCA-048	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-3.18	Admisible
PCA-049	Perquillauquén	Invierno	Subterránea	-3.25	Admisible
PCA-050	Perquillauquén	Invierno	Subterránea	1.40	Admisible
PCA-051	Perquillauquén	Invierno	Subterránea	-5.68	Descartable
PCA-052	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-2.19	Admisible
PCA-053	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-0.89	Admisible
PCA-054	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-9.06	Descartable
PCA-055	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-3.81	Admisible
PCA-056	Cauquenes	Invierno	Subterránea	-3.75	Admisible

4.4.5 Elementos Mayores

4.4.5.1 Sodio

El sodio es un ion que a condiciones ambientales posee alta solubilidad y al entrar en solución tiende a permanecer en ese estado. Puede ser retenido por adsorción en la superficie de minerales, especialmente cuando estos minerales tienen capacidad de intercambio catiónico, como por ejemplo las arcillas (Hem,1985). El Na⁺ proviene de distintas fuentes, siendo una de las más comunes en ambientes ígneos la meteorización de feldspatos (Custodio y Llamas, 2001).

El valor normal de sodio en las aguas subterráneas es entre 10-1000 [mg/L] (Younger, 2007). En la cuenca el río Cauquenes, la concentración de sodio se encuentra entre 8,5 [mg/L] y 70 [mg/L], para las muestras PCA-003 y PCA-046 respectivamente.

4.4.5.2 Potasio

El potasio es un elemento que proviene generalmente de la disolución de silicatos o de sales potásicas, como por ejemplo la silvinita y la carnalita. También puede provenir de contaminaciones industriales, mineras y agrícolas. Es un elemento que tiende a ser fijado irreversiblemente en el terreno durante la formación de arcillas. (Custodio y Llamas, 2001).

En la cuenca, la concentración de este elemento fluctúa entre 0,13 [mg/L] y 15 [mg/L], siendo los valores normales en aguas subterráneas entre 1-50 [mg/L] (Young, 2007). Las muestras con los valores más altos corresponden a la PCA-029 y PCA-037.

4.4.5.3 Calcio

El calcio es el elemento alcalino-térreo más abundante y es constituyente principal de la mayoría de los minerales (Hem,1985).

Este elemento se suele encontrar en concentraciones de entre 10 y 500 [mg/L] (Young, 2007). En la cuenca Cauquenes alcanza valores entre 2,7 y 45 [mg/L]. El menor valor lo toma la muestra PCA-040 y el mayor la muestra PCA-046.

4.4.5.4 *Magnesio*

El magnesio puede proceder de la disolución de silicatos ferromagnesianos, carbonatos o evaporitas y también puede estar asociado a intrusiones marinas. Al igual que el Ca^{2+} , es un elemento alcalino térreo y puede participar de procesos de intercambio iónico (Custodio y Llamas, 2001).

En las aguas subterráneas los valores normales de magnesio van entre 5 y 400 [mg/L] (Young, 2007). En la cuenca, toma valores entre 1 [mg/L] y 22 [mg/L] en donde el valor menor lo toma la muestra PCA-036 y el mayor la PCA-024.

4.4.5.5 *Bicarbonato*

El bicarbonato puede provenir de la disolución de CO_2 , de la disolución de carbonatos y del hidrólisis de silicatos. Todos los procesos anteriores ocurren en ayuda del CO_2 , por lo que si no existiera aporte de este último se esperaría que el carbono disuelto (HCO_3^- , CO_2 y CO_3^{2-}) sería constante (Custodio y Llamas, 2001).

Los valores normales para el bicarbonato en aguas subterránea fluctúan entre 0 y 400 [mg/L] (Young, 2007). En Cauquenes varía entre 28 y 255 [Mg/L], tomando los valores más pequeños la muestra PCA-040 y el mayor valor, la muestra PCA-048.

4.4.5.6 *Sulfatos*

El sulfato puede provenir de las lluvias, de la oxidación de sulfuros, de la disolución de minerales sulfatados como el yeso o a anhidrita, de actividades industriales y agrícolas, y del lavado de terrenos formados en condiciones de aridez o en ambientes marinos (Custodio y Llamas, 2001).

Los valores normales para los sulfatos en aguas subterráneas van entre 10[mg/L] y 500 [mg/L] (Young, 2007) y en la cuenca Cauquenes van entre 0,55 y 65 [mg/L]. Los mayores valores los alcanza las muestras PCA-037 y PCA-029.

4.4.5.7 *Nitratos*

El ion nitrato proviene de procesos de nitrificación naturales a través de bacterias, de la descomposición de materia orgánica, de contaminación urbana, industrial y ganadera y de abonos agrícolas (Custodio y Llamas, 2001). Sus concentraciones en aguas subterráneas van entre 10 y 60 [mg/L] (Young, 2007). En la cuenca Cauquenes, la concentración de nitratos va desde 1,5 [mg/L] y 130 [mg/L].

4.4.5.8 Diagrama de Piper

A partir de las muestras tomadas en las campañas de terreno se construye el diagrama de la Figura 4.13. Este diagrama es conocido como *Diagrama de Piper* y fue planteado por Arthur M. Piper en 1944. Se construye a partir del porcentaje de las concentraciones en [meq/l] de elementos mayoritarios. Estos porcentajes se dibujan en los triángulos inferiores, para luego ser extrapolado hacia el rombo superior. Esta extrapolación correspondería a la representación de los aniones y cationes en conjunto. Este diagrama es utilizado para agrupar las aguas en distintos tipos.

Se observa que la mayoría de las aguas corresponden al tipo bicarbonatado mixto. Un grupo menor conformado por las muestras PCA-001, PCA-003 y PCA-043 se agrupa en la clasificación de bicarbonatada cálcica. Las muestras PCA-016, PCA-017, PCA-018, PCA-036 y PCA-040 se agrupan como aguas bicarbonatadas sódicas. La muestra PCA-035 corresponde al tipo clorurado mixto y, por último, las muestras PCA-029, PCA-037 y PCA-042 son del tipo Mixto.

Se observa que la química de las aguas no se ve afectada notoriamente con la estación del año y que las aguas subterráneas y superficiales son de composición similar.

Las aguas de la cuenca del Perquilauquén son del tipo bicarbonatado mixto.

4.4.5.9 Diagrama de Stiff

Para el estudio de la distribución espacial de los elementos mayoritarios se construye un diagrama de Stiff (Figura 4.14). Este diagrama está constituido por ejes horizontales que representan a los aniones en el lado derecho y cationes en el lado izquierdo en [meq/l]. El eje inferior representa al Mg^{2+} y el SO_4^{2-} , el eje intermedio al Ca^{2+} y HCO_3^- y, por último, el eje superior representa al Na^+ y Cl^- .

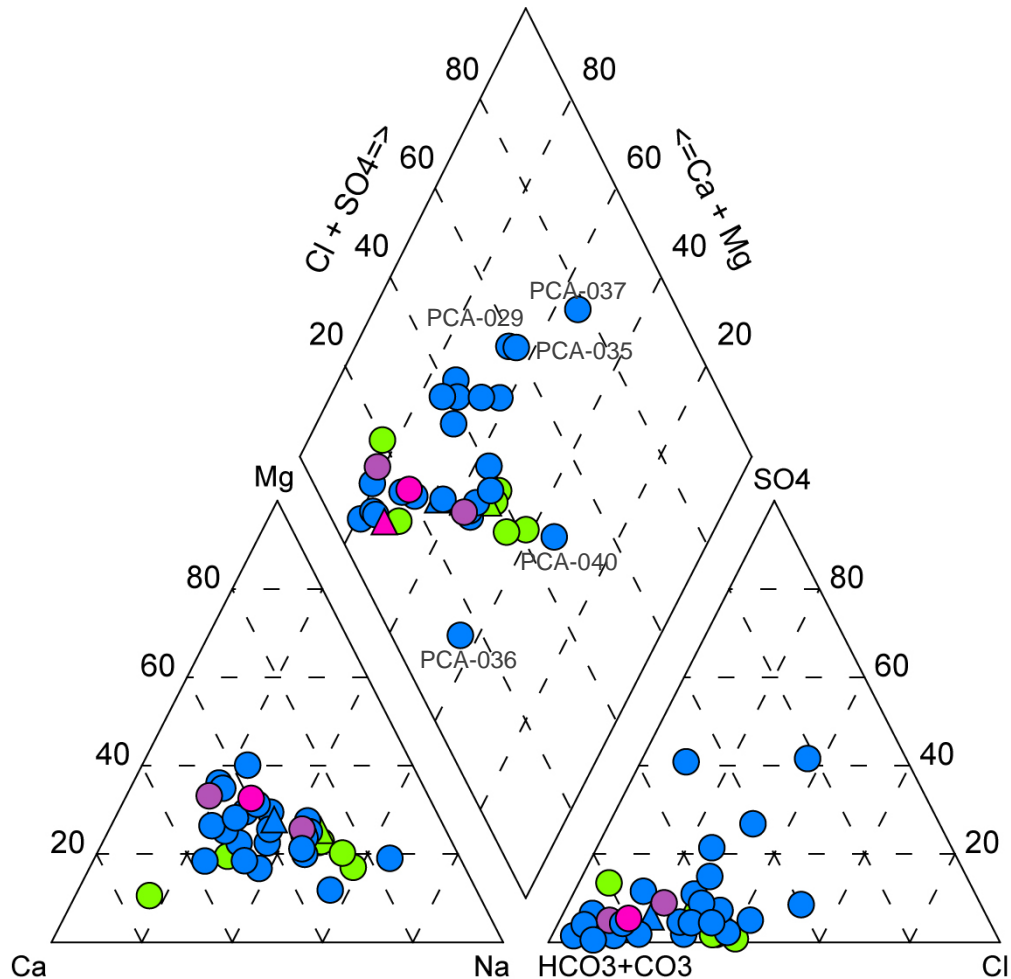
Se observa que hay un aumento en la cantidad de iones de sur a norte y de oeste a este, lo que coincide con el sentido del flujo de las aguas. En esta misma dirección hay un aumento relevante en los bicarbonatos, además, hay un aumento en la cantidad de sodio hacia la subcuenca del estero Belco.

En la subcuenca del Estero Belco se observa una alta cantidad de bicarbonatos con respecto a las otras subcuencas. Este aumento también está condicionado por el sentido del flujo de las aguas.

Las proporciones de sulfatos, calcio y magnesio poseen una variabilidad muy pequeña en la zona de estudio. Las concentraciones más altas de calcio se encuentran en la cuenca del Perquilauquén. La concentración de sulfatos, aunque siempre es pequeña, muestra sus mayores valores en la subcuenca del río Tutuvén, la subcuenca del río San Juan y al norte de la subcuenca de Pocillas.

Las aguas son más cálcicas hacia el sur de la zona de estudio y más sódicas hacia el norte.

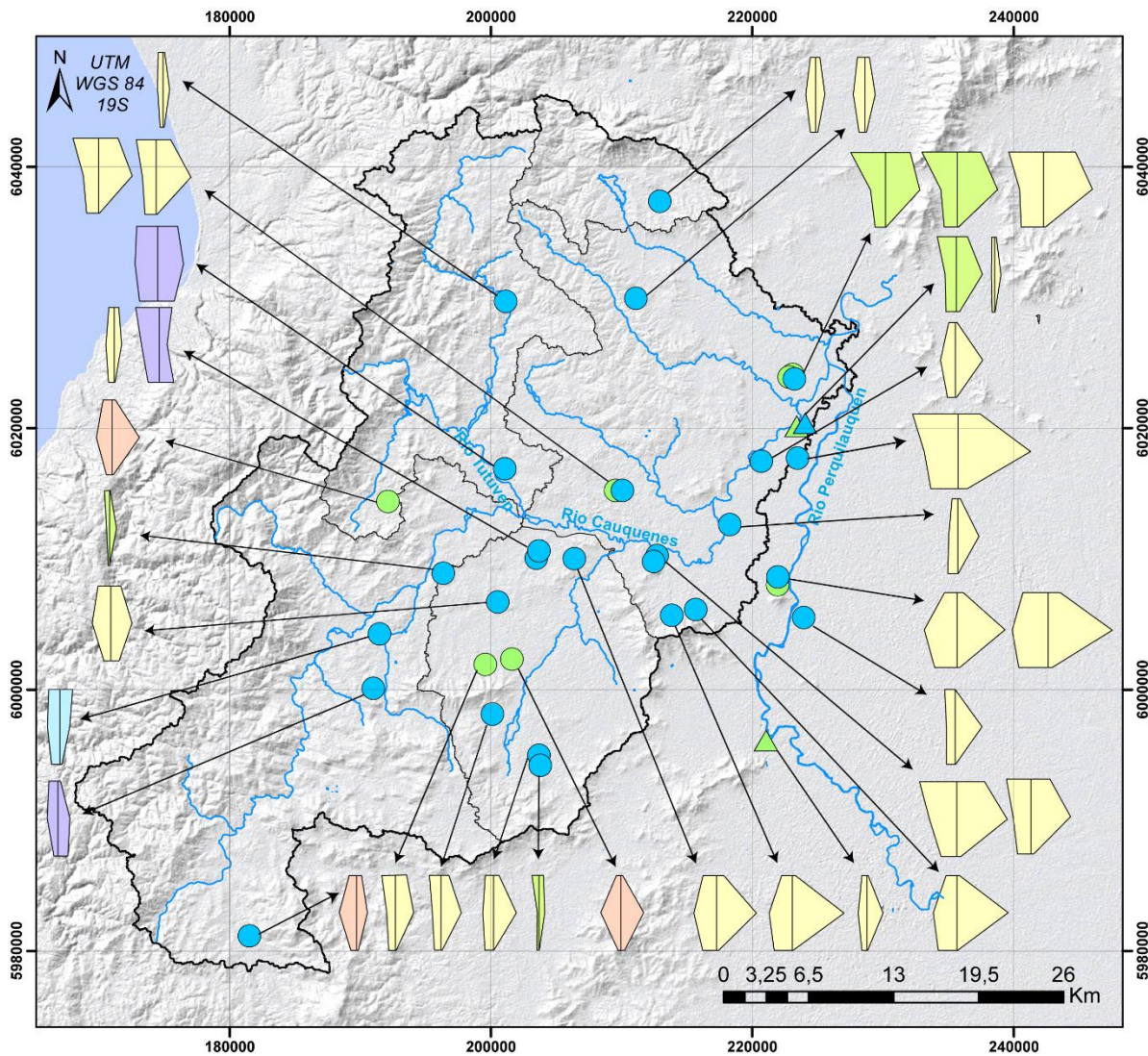
En general no hay variaciones estacionales relevantes. Las muestras tomadas en verano presentan una cantidad de iones levemente mayor a las muestras tomadas en invierno.



Leyenda

- ▲ Muestra superficial de la cuenca Cauquenes, tomada en verano
- Muestra subterránea de la cuenca Cauquenes, tomada en verano
- ▲ Muestra superficial de la cuenca Cauquenes, tomada en invierno
- Muestra subterránea de la cuenca Cauquenes, tomada en invierno
- ▲ Muestra superficial de la cuenca Perquilauquén, tomada en verano
- Muestra subterránea de la cuenca Perquilauquén, tomada en verano
- Muestra subterránea de la cuenca Perquilauquén, tomada en invierno

Figura 4.13: Diagrama de Piper construido a partir de las muestras tomadas el año 2017. Fuente: Elaboración propia.



Leyenda

- ▲ Muestra superficial tomada en verano
- Muestra subterránea tomada en verano
- ▲ Muestra superficial tomada en invierno
- Muestra subterránea tomada en invierno

Na Cl
 Ca HCO₃
 Mg SO₄

6 3 0 3 6 (meq/L)

Tipo de agua

- Bicarbonatada Cálctica
- Bicarbonatada Mixta
- Bicarbonatada Sódica
- Clorurada Mixta
- Mixta Mixta

Figura 4.14: Diagramas de Stiff clasificado según Piper. Fuente: Elaboración propia.

4.4.6 Elementos Traza

A continuación, se muestra la distribución espacial de los elementos trazas que presentaron mayor variabilidad en su concentración. Además, se realiza una comparación de estos elementos con las normas de agua potable NCh 409/05 y con la norma de agua para riego NCh 1333/78 y para el caso del antimonio, con los valores de referencia de la OMS.

4.4.6.1 Antimonio

Es relativamente móvil, especialmente en condiciones óxicas, pero se puede presentar en solución tanto en ambientes oxidantes como reductores (Krupka y Serne, 2002). El antimonio es un elemento calcófilo, que puede ocurrir por causas naturales y antrópicas en las aguas subterráneas. Naturalmente este elemento se encuentra como traza de minerales como la ilmenita, olivino, galena, esfalerita y pirita (Salminen, 2005).

El antimonio se encuentra ampliamente distribuido en la cuenca. Su límite de detección instrumental fue de 0,01 [mg/l] para las muestras tomadas en verano y de 0,02 [mg/l] para las muestras tomadas en invierno. Su máxima concentración ocurre en la cuenca del río Perquilauquén y fue de 2 [mg/l] (Figura 4.15).

El antimonio no se encuentra en la norma de agua potable chilena NCh. 409, por lo que se hizo una comparación con los valores de referencia de la OMS. La concentración máxima admitida de antimonio por esta organización es de 0,02 [mg/L]. Este valor es sobrepasado por la mayoría de las muestras.

4.4.6.2 Arsénico

El arsénico es un elemento calcófilo. Se presenta como mineral accesorio en galena, pirita y esfalerita. Puede encontrarse en altas concentraciones en fosfatos. En rocas sedimentarias el arsénico se concentra en arcillas, sulfuros, fosfatos y en óxidos hidratados de Fe y Mn (Salminen, 2005). Thomas (2003) notó que el arsénico se relaciona inversamente con el nitrato y con el oxígeno disuelto, y tiene una relación directa con el manganeso, hierro y amoniaco, por lo que relacionó las concentraciones de arsénico con condiciones de reducción.

Al igual que el caso del antimonio, el límite de detección de las muestras tomadas en invierno y en verano fue distinto. Para el caso del verano el límite de detección fue de 0,005 [mg/l], mientras que para las tomadas en invierno fue de 0,02 [mg/l]. Las cantidades más altas fueron de 0,6 [mg/l] y se encontraron en la cuenca del río Perquilauquén (Figura 4.15).

La norma de agua potable establece un límite máximo en la concentración de arsénico de 0,01 [mg/L]. Este límite es excedido por las muestras PCA-006, PCA-015, PCA-049, PCA-050 y PCA-051.

4.4.6.3 *Cobre*

Es un elemento calcófilo que se encuentra formando minerales como por ejemplo la malaquita y covelina, y como traza en biotitas, piroxenos y anfíboles. Es móvil en condiciones ácidas y oxidantes (Salminen, 2005). El límite de detección para el cobre fue de 0,01 [mg/l]. Su valor más alto es de 0,023 [mg/l], el cual se encontró en el límite norte de las cuencas Cauquenes y Perquilauquén (Figura 4.16).

4.4.6.4 *Cromo*

Es un elemento litófilo y se encuentra como elemento accesorio en la espinela, anfíboles, micas, piroxenos y granates (Salminen, 2005). El cromo se encuentra en bajas cantidades en toda la cuenca. Su límite de detección fue de 0,001[mg/l] y su valor máximo es de 0,008 [mg/l] al norte de la subcuenca de Pocillas, en la confluencia del estero Liucura y el río Cauquenes (Figura 4.16).

4.4.6.5 *Fósforo*

Es un elemento que puede comportarse de manera litófila, siderófila o biófila. Ocurre como elemento traza de olivinos, piroxenos, anfíboles y micas (Salminen, 2005). El fósforo se encuentra distribuido en toda la cuenca. Su límite de detección fue de 0,05 [mg/l] y alcanzó valores de hasta 2[mg/l] en la cuenca del río Perquilauquén (Figura 4.17).

4.4.6.6 *Hierro*

El hierro es el cuarto elemento más abundante en el planeta y puede actuar como calcófilo y como litófilo. Su solubilidad aumenta en condiciones reductoras y ácidas, mientras que condiciones oxidantes y alcalinas promueven su precipitación (Salminen, 2005). El límite de detección para el hierro fue de 0,01 [mg/l]. El hierro se encuentra ampliamente distribuido, encontrándose en cantidades mínimas en toda la zona de estudio. Sus mayores concentraciones se observan en la confluencia del río Tutuvén con el río Cauquenes y en la confluencia del río Cauquenes con el estero

Liucura, tomando valores de hasta 0,59 [mg/l] (Figura 4.17). La norma de agua potable establece un límite máximo en la concentración de hierro de 0,3 [mg/L]. Este límite es excedido por las muestras PCA-045 y PCA-051.

4.4.6.7 *Manganeso*

Es un elemento litófilo que forma minerales como la pirolusita y rodocrosita, y se encuentra como accesorio en granates, olivinos, piroxenos, anfíboles y calcita. Las condiciones redox controlan la solubilidad del manganeso. Actúa de manera similar al hierro, siendo fácilmente movilizado en condiciones anóxicas (Salminen, 2005). El límite de detección del manganeso fue de 0,003 [mg/l] y llega a tomar valores de hasta 3,94 [mg/l]. Al igual que el hierro y el cromo, sus mayores concentraciones se observan en la confluencia del río Cauquenes con el estero Liucura (Figura 4.18).

La norma de agua potable establece un límite máximo en la concentración de hierro de 0,1 [mg/L] y un límite máximo para las aguas de riego de 0,02 [mg/L]. El límite para agua potable es excedido por las muestras PCA-003, PCA-045 y PCA-038. Además, ambas normas son excedidas por las muestras PCA-003, PCA-045, PCA-038, PCA-015, PCA-017, PCA-018 y PCA-026.

4.4.6.8 *Vanadio*

El vanadio es un elemento litófilo, que se puede comportar como siderófilo a altas presiones. Puede formar minerales como la magnetita y se puede encontrar como traza en micas, apatito, piroxenos y anfíboles. El vanadio es un elemento muy móvil y su solubilidad es mayor en ambientes óxicos (Salminen, 2005). El Vanadio se encuentra en mayores proporciones hacia el noreste de la cuenca. Su concentración máxima fue de 0,23 [mg/l] en la cuenca del Perquilauquén. Su límite de detección fue de 0,003 [mg/l] (Figura 4.18). La norma para agua de riego establece un límite máximo de 0,1 [mg/L]. Este límite es excedido por la norma PCA-050.

4.4.6.9 *Zinc*

El Zinc es un elemento calcófilo y se encuentra como accesorio en micas, anfíboles, piroxenos y magnetita. Su movilidad es mayor en ambientes oxidantes y ácidos (Salminen, 2005). Su límite de detección fue de 0,01 [mg/l], alcanzando el valor máximo de 0,57[mg/l] al sur de la subcuenca del estero Belco, donde confluyen el estero Liucura y el río Cauquenes (Figura 4.19).

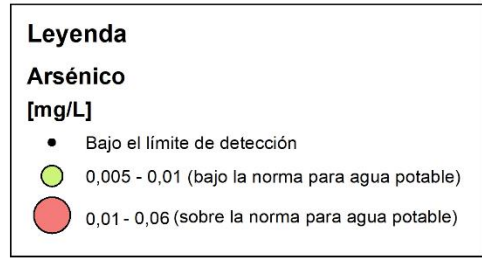
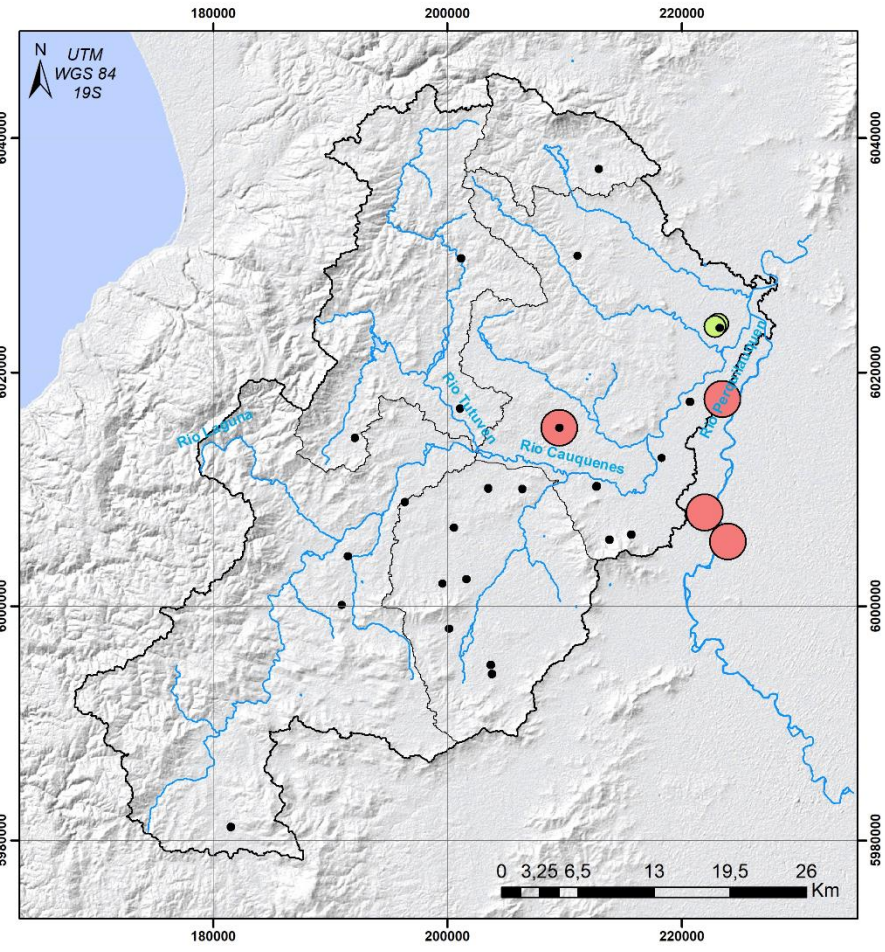
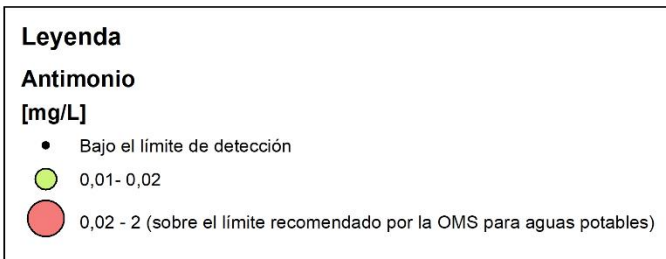
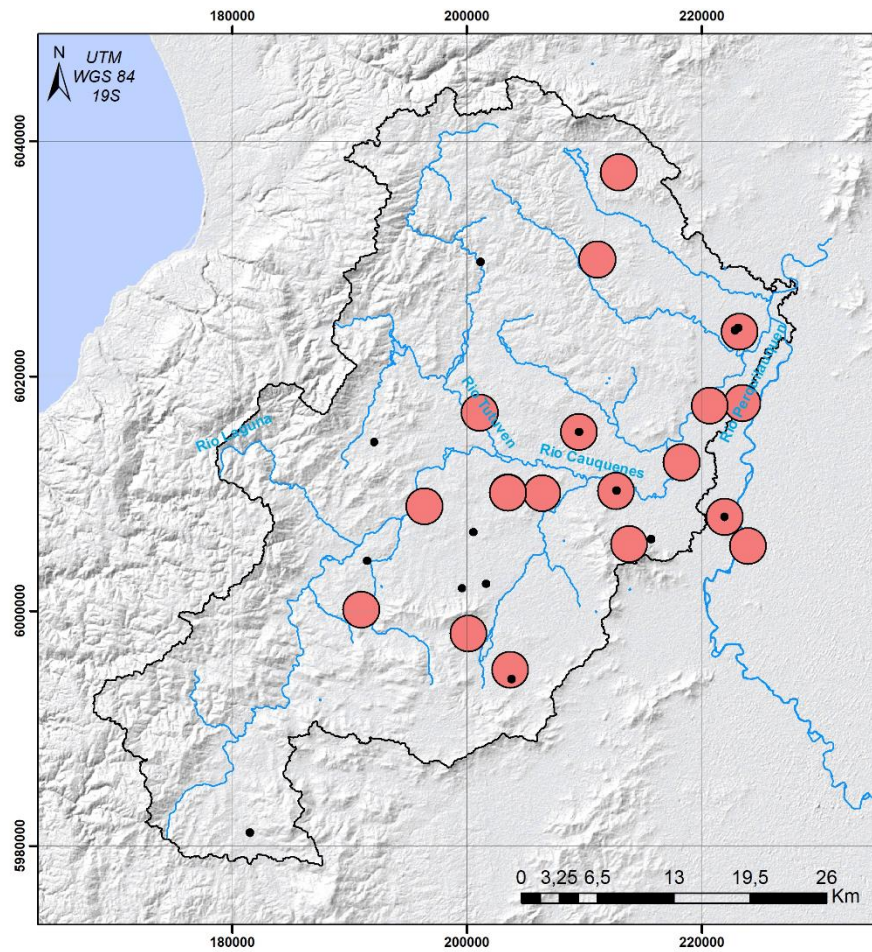


Figura 4.15: Distribución y concentración del Antimonio a la izquierda y el Arsénico a la derecha.

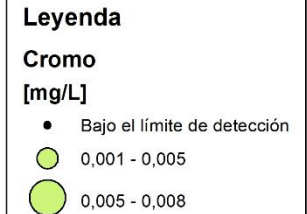
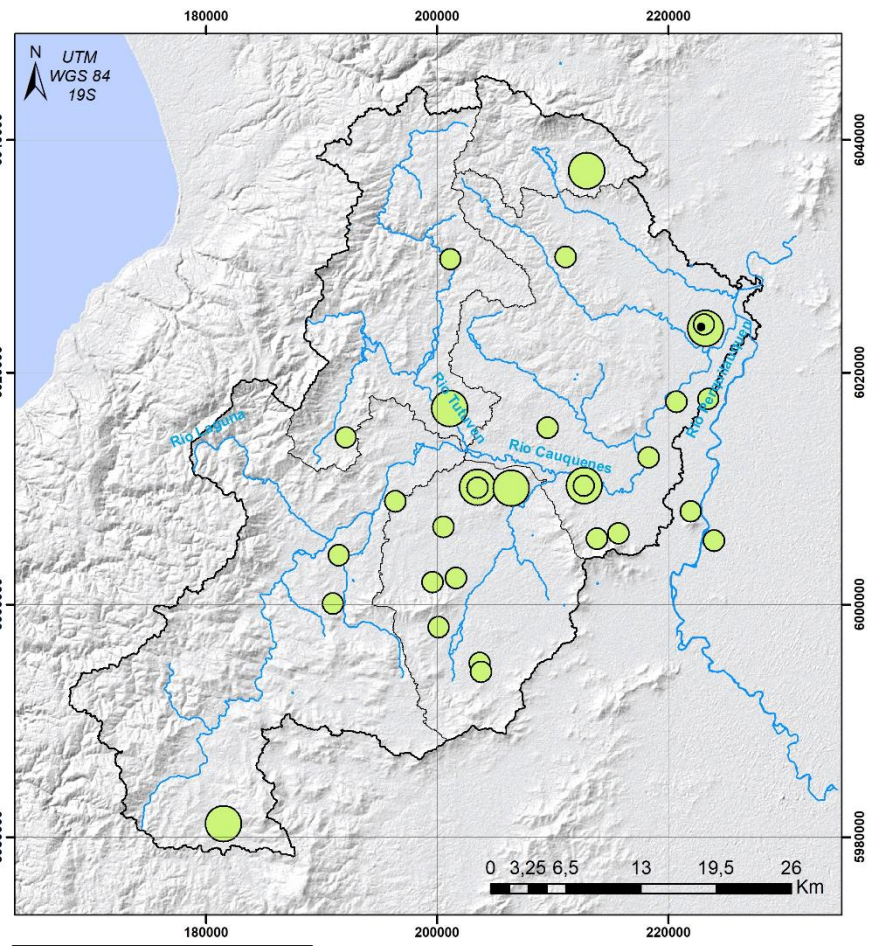
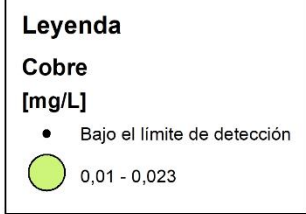
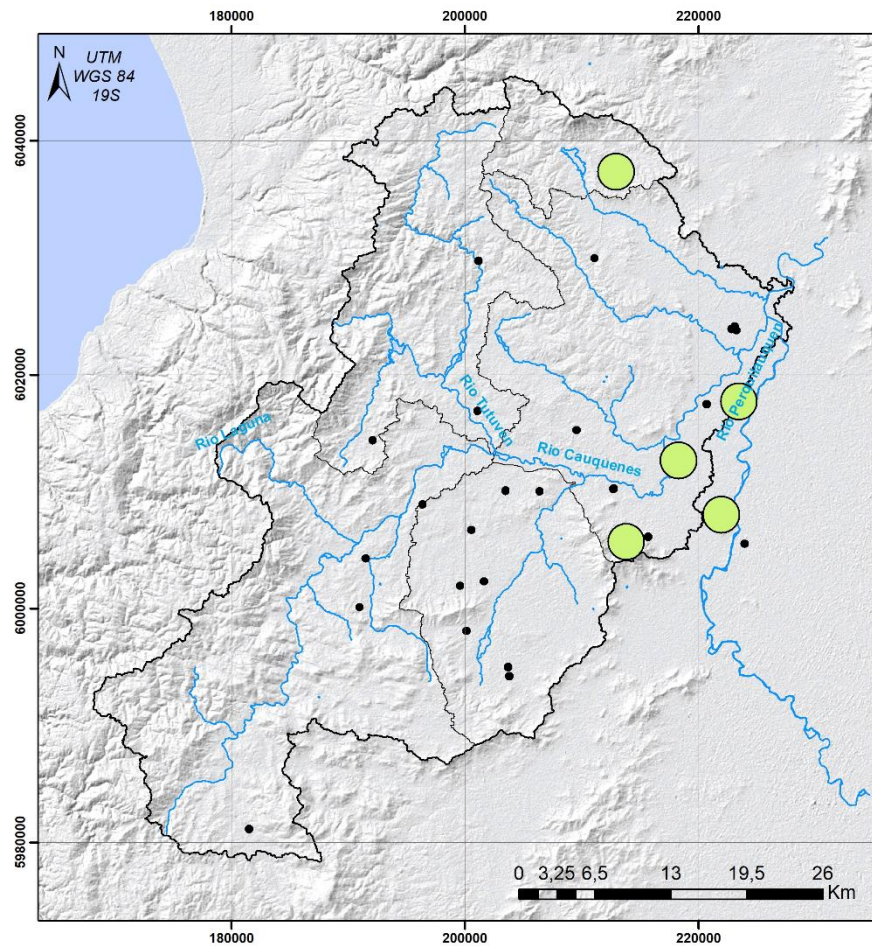


Figura 4.16: Distribución y concentración del Cobre a la izquierda y el Cromo a la derecha.

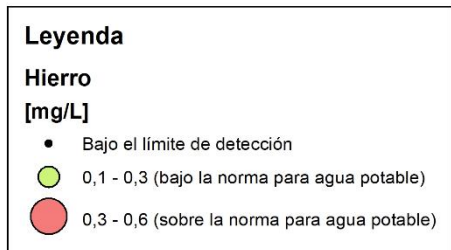
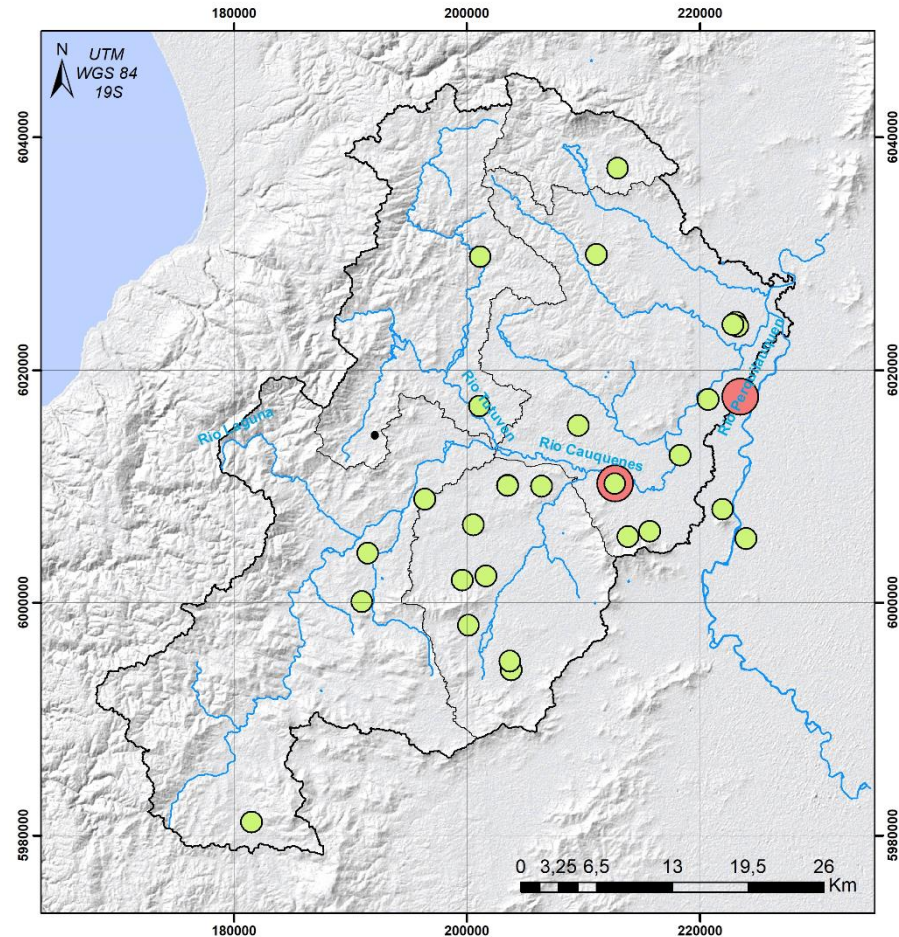
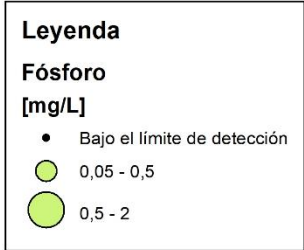
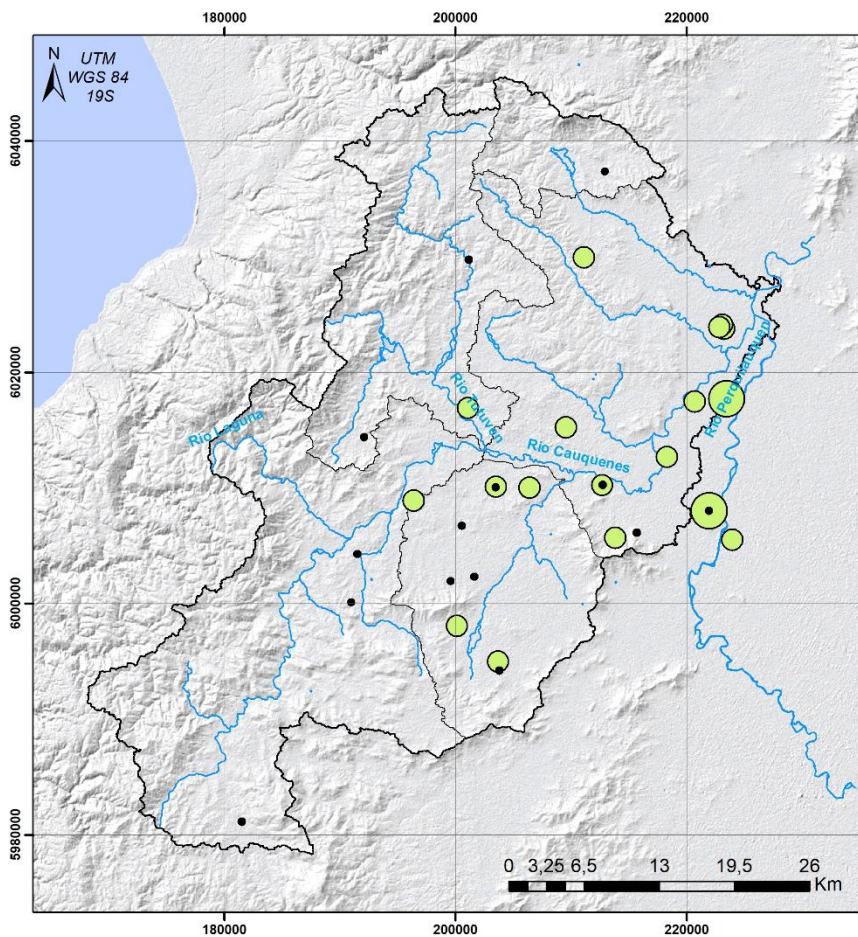
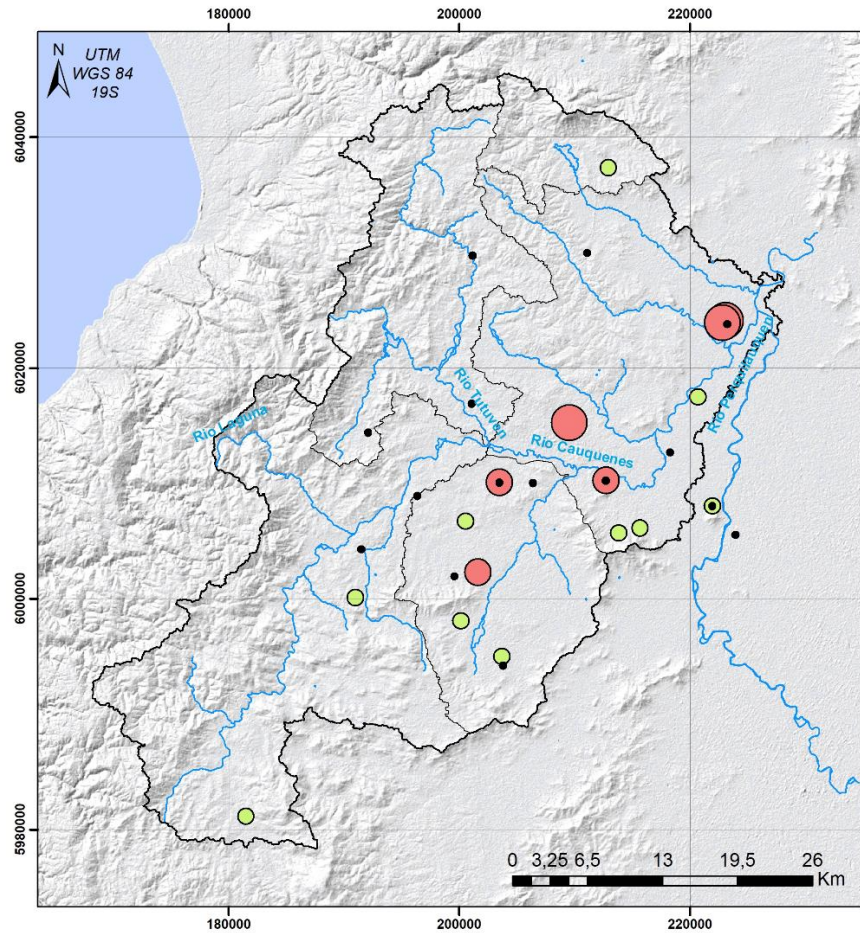


Figura 4.17: Distribución y concentración del Fósforo a la izquierda y el Hierro a la derecha.

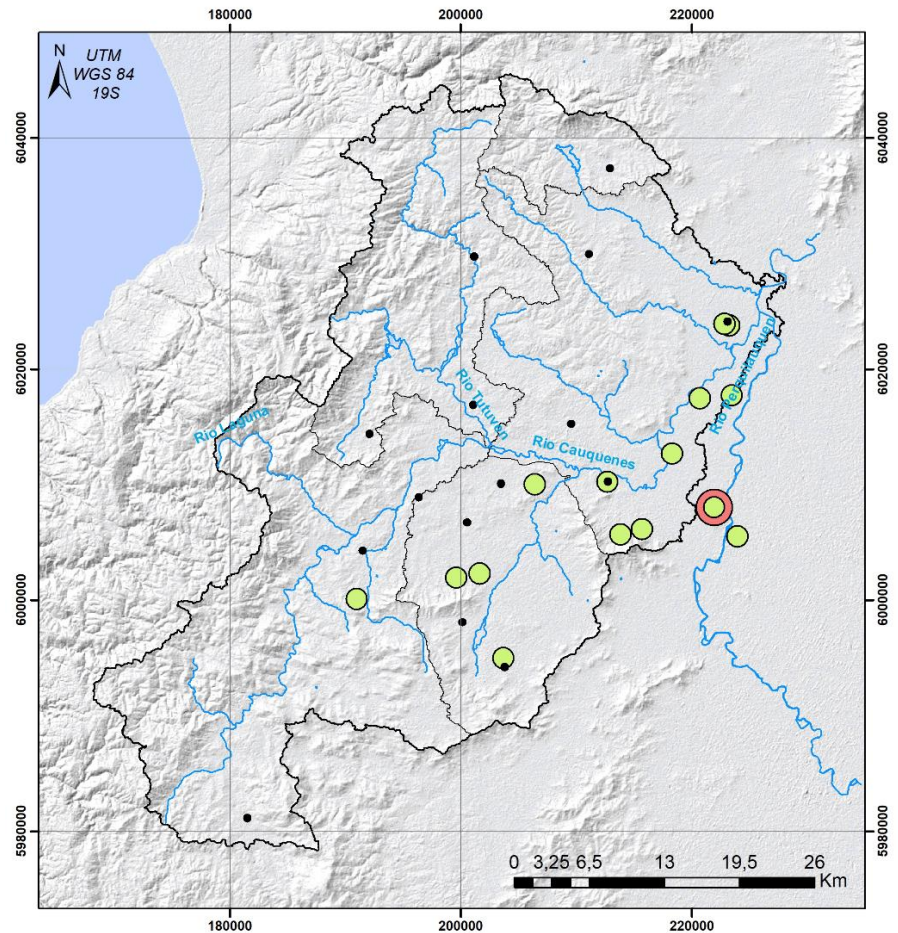


Leyenda

Manganeso

[mg/L]

- Bajo el límite de detección
- 0,003 - 0,1 (bajo la norma para agua potable)
- 0,1 - 0,2 (sobre la norma para agua potable)
- 0,2 - 0,33 (sobre la norma para agua potable y riego)



Leyenda

Vanadio

[mg/L]

- Bajo el límite de detección
- 0,003 - 0,1
- 0,1 - 0,23 (sobre la norma para riego)

Figura 4.18: Distribución y concentración del Manganeso a la izquierda y el Vanadio a la derecha.

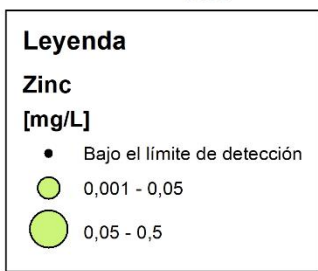
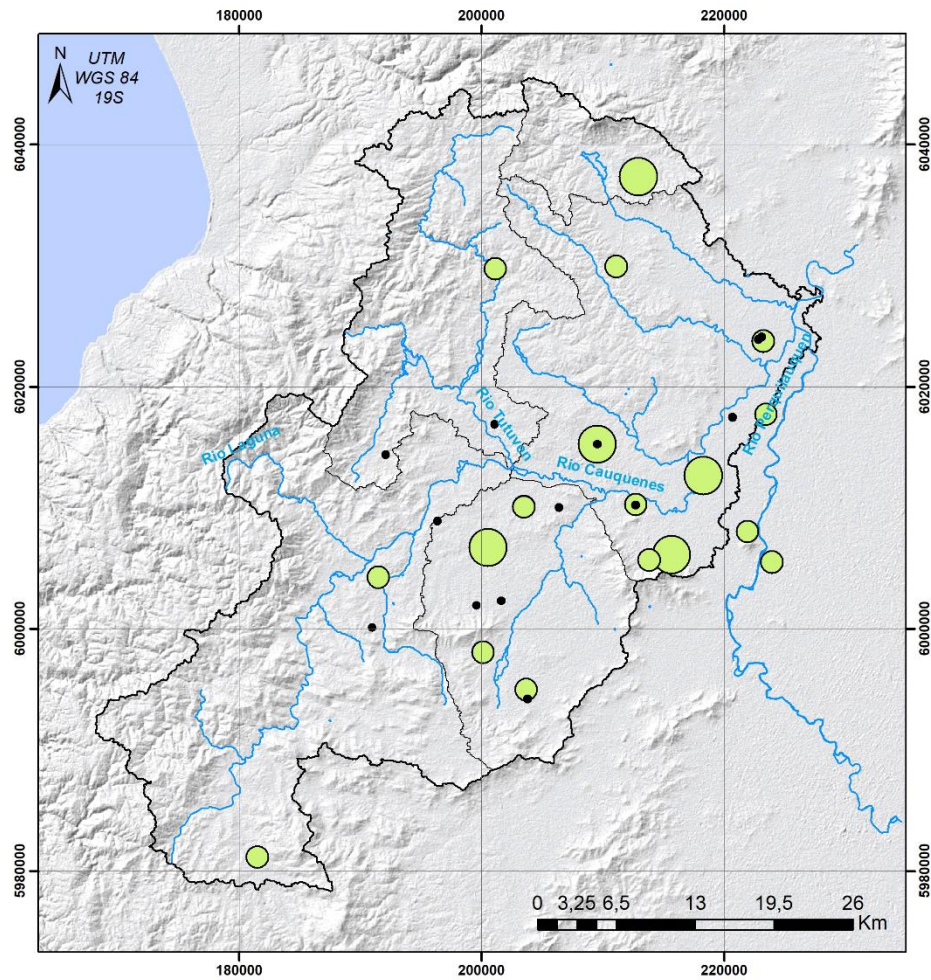


Figura 4.19: Distribución y concentración del Zinc.

5 DISCUSIONES

5.1 HIDROGEOLOGÍA

Las aguas que entran al sistema hídrico de la cuenca del río Cauquenes son de origen pluvial, lo que queda demostrado con el aumento del nivel freático en los períodos lluviosos. Estas aguas se infiltran para formar parte del sistema subterráneo o escurren formando ríos en la superficie. Los ríos fluyen hacia el norte y hacia el este hasta juntarse con el río Cauquenes, el cual desemboca en el río Perquillauquén.

Las aguas subterráneas se encuentran contenidas en un ambiente de origen sedimentario y volcánico, correspondiente a los depósitos en su mayoría fluviales y depósitos piroclásticos recientes. Los depósitos fluviales se presentan como una intercalación de elementos de granulometría gruesa y fina, lo que indicaría variaciones de energía dentro de la cuenca. Algunos de los depósitos de arcillas pueden confundirse con estratos de origen cinerítico-lacustre, como indicó Moreno y Varela (1985). Estos se habrían formado por el represamiento de los ríos al depositarse los depósitos piroclásticos al norte de la zona de estudio, lo que formaría intercalaciones de ambientes lagunares y cenizas.

En la unidad hidroestratigráfica A se observan los sedimentos más gruesos, los cuales se encuentran en los alrededores del curso del río Cauquenes, principalmente en el sector de confluencia del río Cauquenes con el estero las Garzas. Es probable que esto se deba a la pérdida de energía que sufre el estero al unirse con el río.

La unidad hidroestratigráfica B, presenta los sedimentos de granulometría más fina y esta diferencia en la granulometría sería responsable de que la permeabilidad del sector sur (subcuenca del río San Juan y de Pocillas) sea menor que la del sector norte de la cuenca. De todas maneras, es clave notar que en los sectores de San Juan y Pocillas hay muy pocos pozos que presenten estratigrafía y pruebas de bombeo, lo que dificultaría conocer en detalle la productividad hídrica de esta zona.

Los depósitos piroclásticos, que conforman la unidad hidroestratigráfica C, sobreyacen a los depósitos de la unidad A al noreste de la zona de estudio. Estos estarían semiconfinando las capas fluviales y aluviales más antiguas. Además, se observó un descenso en el nivel freático en los pozos relacionados a estos depósitos.

Los depósitos piroclásticos también constituyen un elemento morfológico importante. El río Cauquenes tienen un cambio de rumbo de EW a NS (Figura 2.6) que podría deberse a la aparición de estos depósitos redireccionando al río, lo que podría haber ocurrido luego de la deposición de estos.

5.2 HIDROGEOQUÍMICA

5.2.1 Físicoquímica

Se puede observar que la conductividad eléctrica es mayor en el período de verano debido a la evaporación de las aguas y a la concentración de los iones en ellas. Además, en algunos casos de pozos cercanos se observó que la conductividad eléctrica es menor a mayor profundidad y aumenta en pozos más someros (Figura 4.10).

Se observó de la Figura 4.11 que los valores de pH más básicos se encuentran en la subcuenca del estero Belco. Este aumento en el pH se podría relacionar a distintos procesos químicos a los que son sometidos las aguas.

La temperatura es más baja en las proximidades del río Cauquenes, en el sector sur de la cuenca (Figura 4.12).

5.2.2 Elementos Mayores

El contexto geológico de la zona de estudio muestra una correlación con la evolución de sus aguas. La zona está constituida principalmente por rocas ígneas de carácter ácido a intermedio. Con respecto a los iones aportados por este tipo de rocas, Custodio y Llamas (1983) señalan que algunos iones son retenidos débilmente por la estructura de los silicatos, como por ejemplo el Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ , por lo que entran fácilmente en disolución. Esta disolución es controlada por el pH, la temperatura y la saturación de las aguas.

La primera clasificación en la cual fueron caracterizadas las aguas de la zona de estudio corresponde a la clasificación de Piper. A partir de ella se clasificaron la mayoría de las aguas en el tipo bicarbonatado mixto, pero hay algunas variaciones a bicarbonatado sódico, bicarbonatado cálcico y mixto. Las aguas bicarbonatadas son aguas generalmente jóvenes, es decir, tendrían poco tiempo de residencia en el acuífero. La muestra PCA-035, fue clasificada como clorurada mixta y correspondería a la más evolucionada del sistema (Custodio y Llamas, 1983). Por último, se observan aguas del tipo mixto mixto en el sector de unión de las subcuencas del río San Juan, río Tutuvén, estero Belco y Pocillas, lo que podría estar indicando mezclas de aguas que vienen desde las subcuencas y se juntan en ese sector.

El segundo análisis corresponde a los diagramas de Stiff, los cuales muestran la distribución de los elementos mayores en la zona de estudio y su evolución en ella. En estos diagramas se observa un aumento en la concentración de los iones hacia el noreste de la cuenca, lo que se condice con el sentido del flujo de las aguas. También se observa un aumento de sodio y bicarbonatos en la subcuenca del estero Belco.

A partir de estos diagramas y de la ayuda de diagramas binarios se identifican los procesos hidrogeoquímicos que controlan la zona. A continuación, se revisará el comportamiento de los elementos mayoritarios en las aguas con la salinidad.

5.2.2.1 Sodio

Para tener una primera aproximación hacia la determinación de las posibles fuentes de salinidad se estudió la relación entre el sodio y cloruros (Figura 5.1). Las muestras que se encuentran unidas por una línea corresponden a las muestras PCA-026 y PCA-015, las cuales fueron muestras repetidas en verano y en invierno. Se observa un aumento de salinidad en verano, debido a una mayor concentración de los iones en este período.

En este caso, se observa un aumento lineal del sodio con la salinidad. Además, se puede ver que todas las muestras presentan un exceso de sodio con respecto a los cloruros, a excepción de la muestra PCA-035. Cuando existe un exceso de Na con respecto al Cl generalmente se interpreta que el sodio proviene de la meteorización de silicatos (Meybeck, 1987).

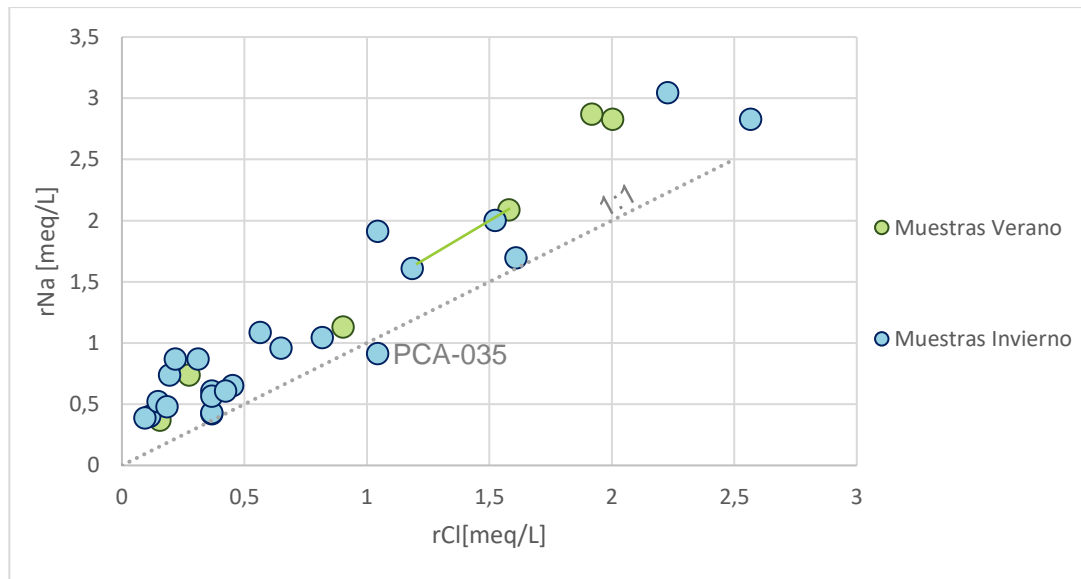


Figura 5.1: Relación entre sodio y cloro para muestras profundas y someras.

5.2.2.2 Calcio

En la Figura 5.2 se observan dos tendencias. Una de ellas muestra una baja concentración de cloruros y cantidades de calcio variables. Estas muestras serán

llamadas "G1" y corresponden a la: PCA-001, PCA-003, PCA-041, PCA-047, PCA-048, PCA-052, PCA-053, PCA-055.

La segunda tendencia muestra un aumento de calcio con la salinidad y serán nombradas como "G2".

Las muestras G1 se pudieron relacionar a pozos con profundidades entre 8,5 y 31 metros, cercanos al estero Liucura y en el sector entre el río Cauquenes y el río Perquilauquén, a excepción de la muestra PCA-001, la cual se encuentra al oeste de la subcuenca del río Tutuvén (Figura 5.5).

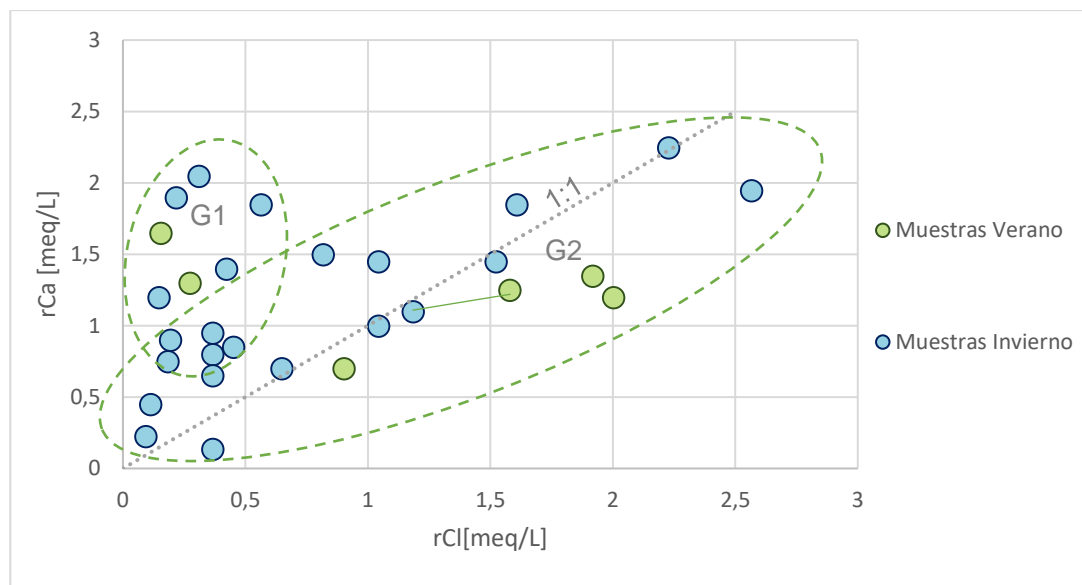


Figura 5.2: Relación entre calcio y cloruros.

5.2.2.3 Magnesio

Al igual que el caso del calcio, se observa el mismo comportamiento de los grupos. Uno que corresponde a un aumento lineal entre el magnesio y el cloruro y que está conformado por las muestras de G2 y otro conformado por las muestras G1, que muestra para baja salinidad, altos valores de magnesio (Figura 5.3).

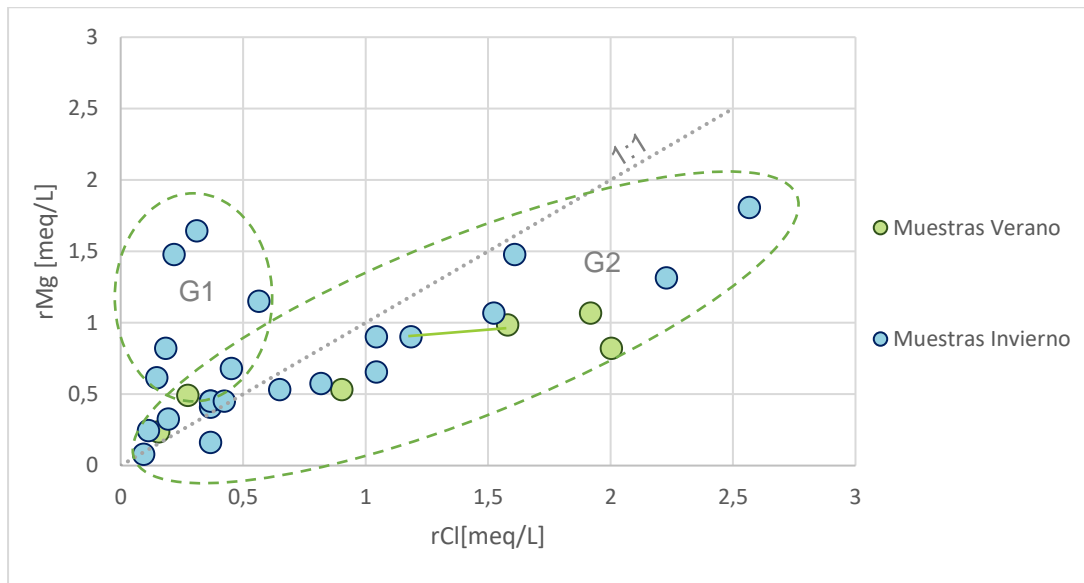


Figura 5.3: Relación entre magnesio y cloruros.

5.2.2.4 Bicarbonato

Se puede observar en la Figura 5.4, al igual que en los casos del Ca^{2+} y el Mg^{2+} , una tendencia en la cual existe un aumento lineal del bicarbonato con respecto a los cloruros (G2), y otra en la cual existen altas concentraciones de bicarbonatos para valores bajos de cloruros (G1).

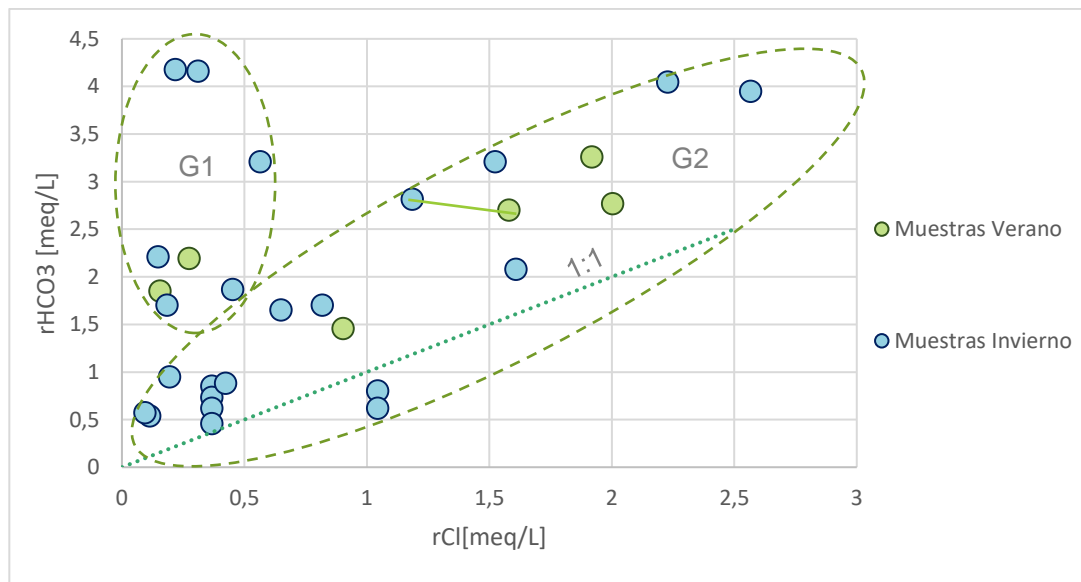


Figura 5.4: Relación entre bicarbonatos y cloruros.

Las muestras del grupo G1, corresponden a muestras de baja salinidad y altas concentraciones de calcio, magnesio y bicarbonatos. En la Figura 5.5 se puede ver la distribución de estas muestras. Se observa que se encuentran mayoritariamente en el sector de Pocillas, cercano al estero Los Coipos-Liucura y en el sector entre el río Cauquenes y el río Perquilauquén. La muestra que se observa en la subcuenca del río Tutuvén corresponde a la muestra PCA-001.

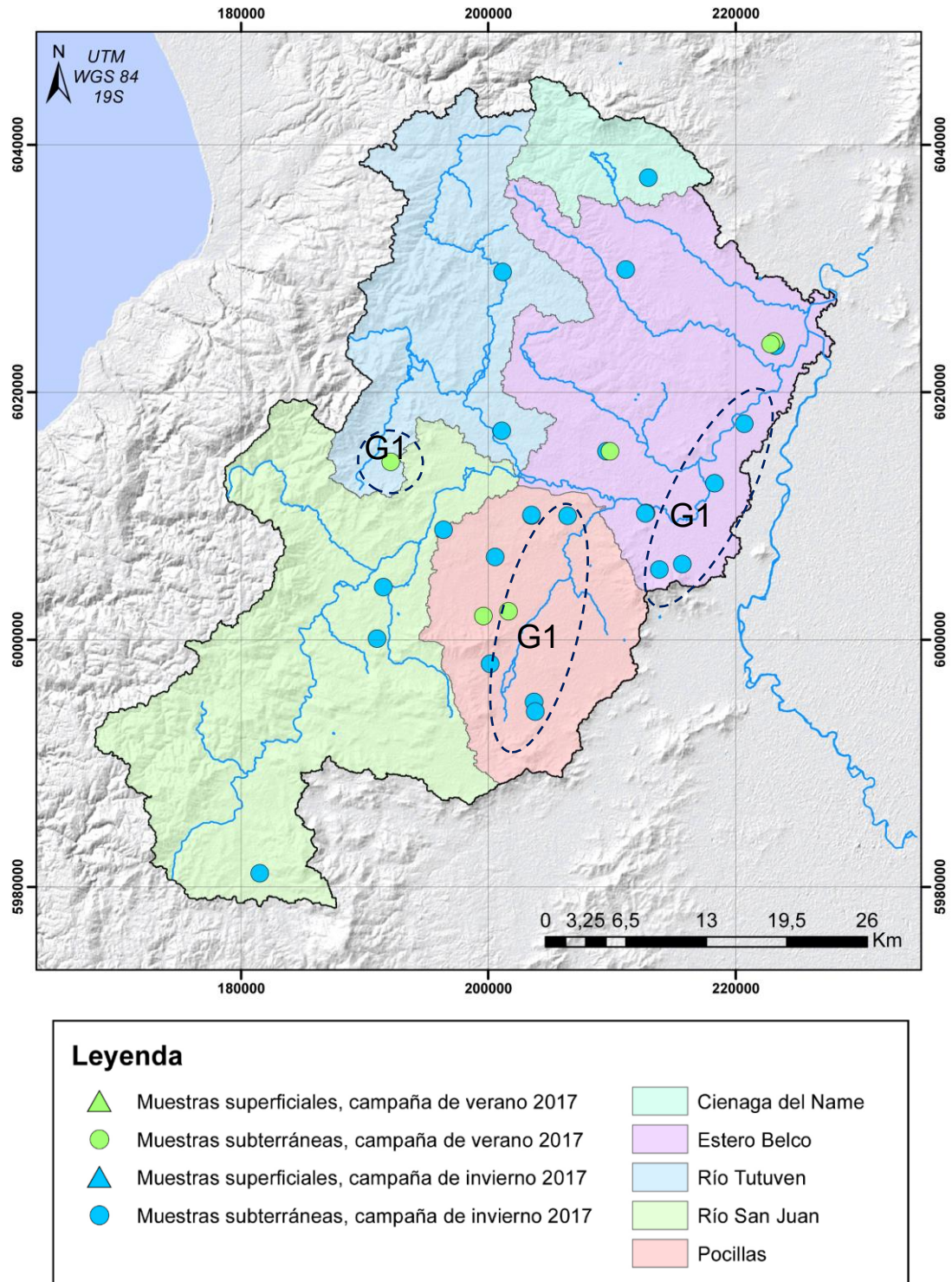


Figura 5.5: Distribución de muestras del grupo G1.

5.2.2.5 Potasio

Se puede observar en la Figura 5.6 que existe una tendencia principal en donde hay un leve aumento lineal del K^+ con la salinidad, pero hay algunas muestras que se escapan de la tendencia principal. Estas son: PCA-040, PCA-035, PCA-037 y PCA-029, las que se encuentran en las subcuencas del río San Juan, Pocillas y del río Tutuvén.

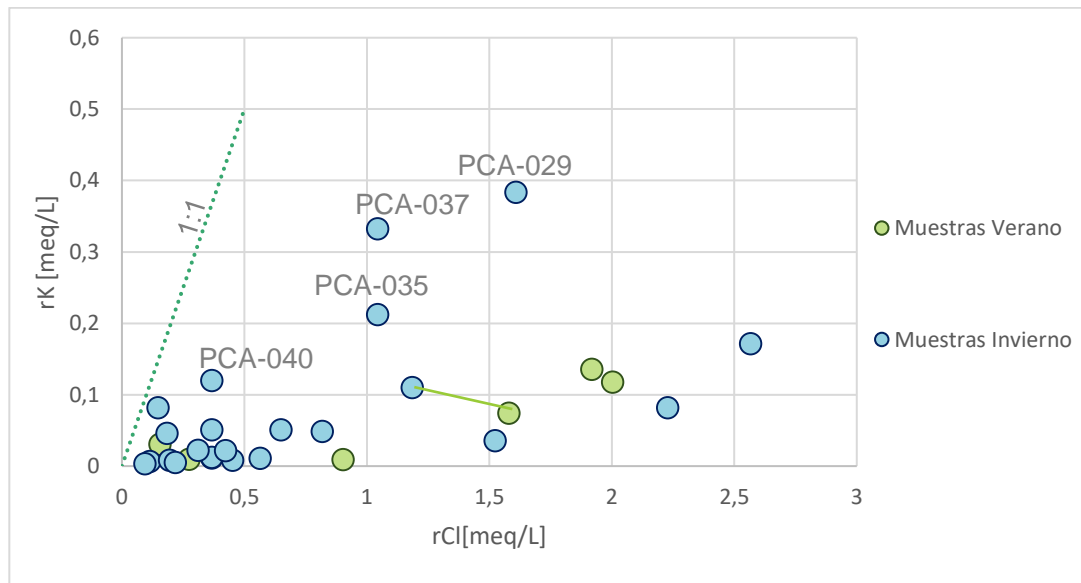


Figura 5.6: Relación entre potasio y cloruros.

5.2.2.6 Nitrato

Se puede observar, que las cantidades de nitratos son bajas y poco variables en la zona de estudio, pero hay algunas muestras que presentan cantidades mayores de nitratos. Estas son: PCA-037, PCA-043, PCA-035, PCA-029, PCA-031 y PCA-040.

En Chile la Norma de agua potable NCH409 (2005) establece que el límite máximo de nitratos para considerar un agua potable, es de 50 [mg/L], lo que equivale a 0,8065 [meq/L]. Podemos notar que en Cauquenes hay 3 muestras que exceden la norma, estas son: PCA-037, PCA-043 y la PCA-035.

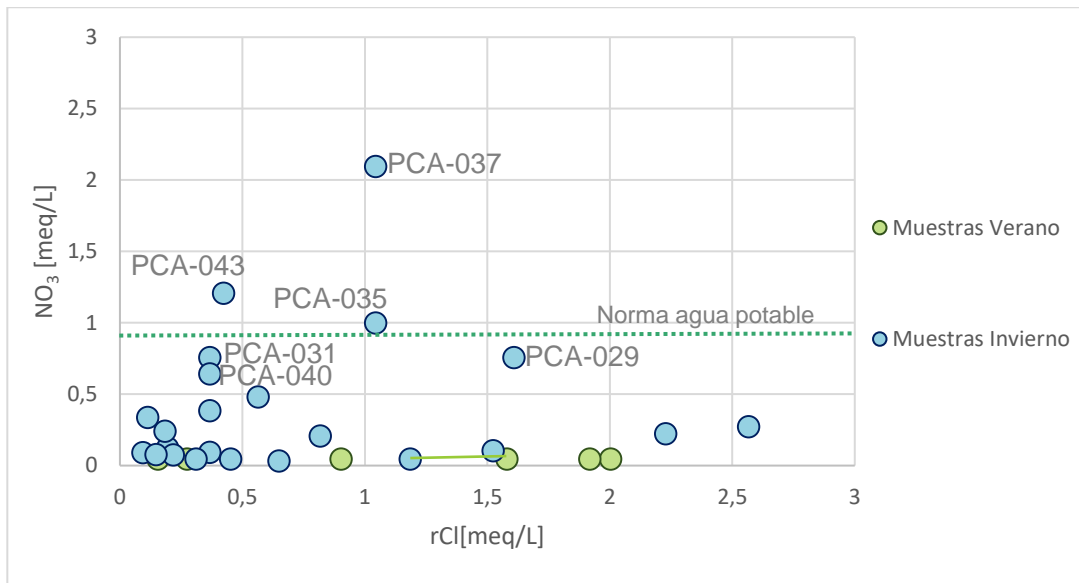


Figura 5.7: Relación entre nitratos y cloruros.

5.2.2.1 Sulfato

Los sulfatos generalmente se encuentran en concentraciones bajas, y tienden a ser relativamente constantes con la salinidad. Aun así, existen muestras que se escapan de esta tendencia, estas son: PCA-037, PCA-042, PCA-029 y PCA-056. Estas se encuentran en las subcuencas del río San Juan, Pocillas y del río Tutuvén.

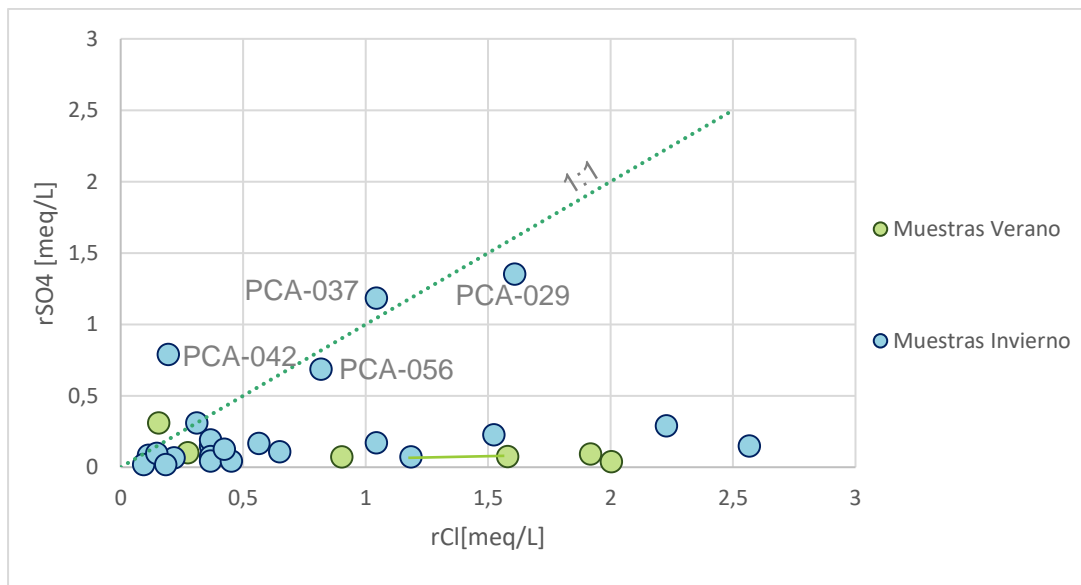


Figura 5.8: Relación entre sulfatos y cloruros.

De los diagramas 5.6, 5.7 y 5.8 podemos inferir una contaminación en el acuífero debido a la actividad agrícola de la zona. Esto lo podemos notar en las muestras PCA-035, PCA-040, PCA-037 y PCA-029, las cuales un alto contenido de K^+ y de NO_3^- en comparación con las otras muestras de la cuenca. Además, las muestras PCA-037 y PCA-029 tienen altas concentraciones de sulfatos, lo que también puede deberse a contaminación agrícola.

Uno de los mayores sustentos económicos de la zona de estudio es el trabajo agrícola, por lo que no es raro encontrar altas concentraciones de nitratos y sulfatos en el agua debido al uso de fertilizantes.

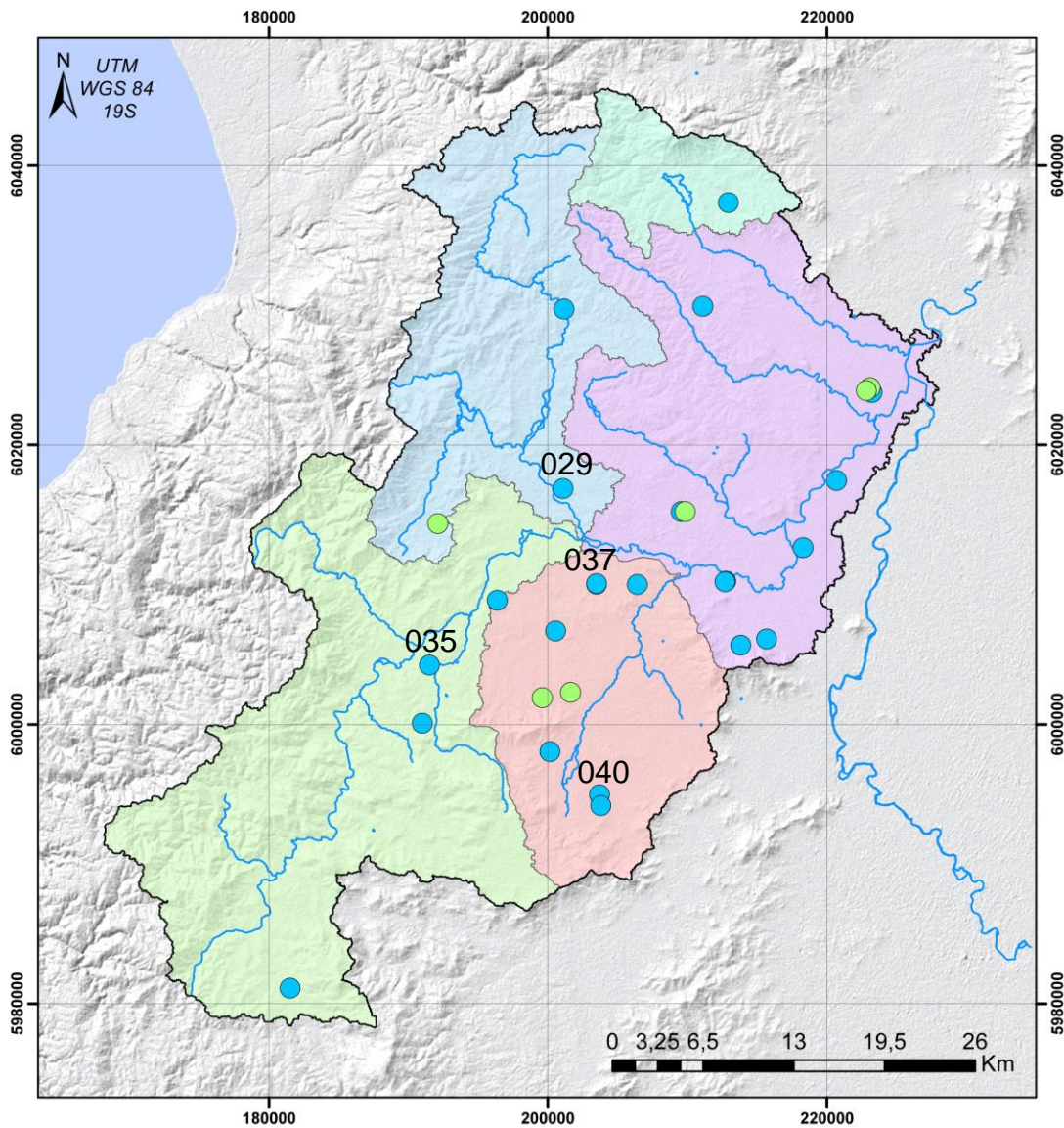




Figura 5.9: Distribución de muestras con probable contaminación agrícola.

A partir de las secciones anteriores, pudimos ver que la química de las aguas del acuífero de Cauquenes no tiene grandes variaciones. En general vimos una tendencia al aumento de los iones mayoritarios con la salinidad y se identificó un grupo de muestras, correspondiente al G1, de poca salinidad y altas concentraciones de calcio, magnesio y bicarbonatos.

Por otra parte, se observó contaminación agrícola en casos puntuales distribuidos principalmente al sur de la zona de estudio.

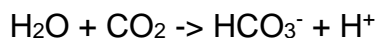
A continuación, se estudiarán los procesos que controlan la química de las aguas.

5.2.2.2 Identificación de procesos hidrogeoquímicos

5.2.2.2.1 Razones iónicas

La relación $rHCO_3/rCl$ (Figura 5.10) es utilizada para seguir el proceso de concentración de sales en el sentido del flujo subterráneo. Una disminución de la relación indica un avance de la concentración. Esta razón se puede ver afectada por procesos de reducción de sulfatos y por la precipitación de calcita (Custodio y Llamas, 2001).

Las muestras G1 presentan los mayores valores de la razón $rHCO_3/rCl$, por lo que estas muestras se encontrarían más cercanas a las zonas de recarga. Esta conducta puede atribuirse a que las aguas al infiltrarse reaccionan con el CO_2 del suelo, produciendo acidez y otorgándole mayor agresividad a las aguas, de la siguiente manera:



Estas aguas más agresivas reaccionan con los silicatos, produciendo su disolución y disminuyendo la acidez de las aguas, lo que también explica las altas cantidades de Ca^{2+} y Mg^+ en las muestras G1.

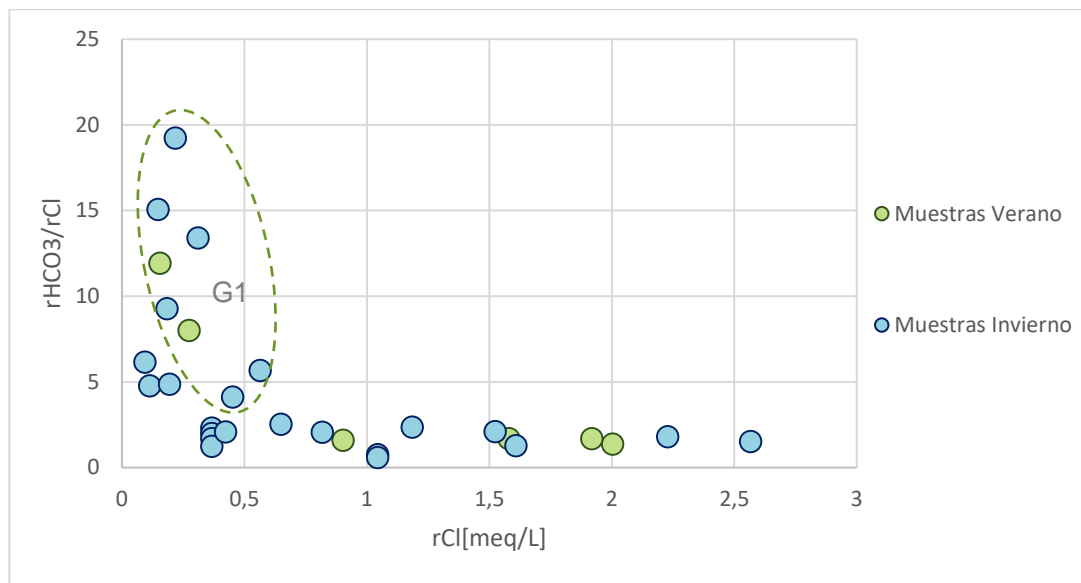


Figura 5.10: Relación $rHCO_3/rCl$ vs rCl .

La relación rNa/rCl (Figura 5.11) generalmente se utiliza para determinar el origen de las aguas subterráneas. El valor estándar para el agua de mar es de 0,8537 (Ovchinnikov, 1955), por lo que si la razón es mayor a este valor su origen se asocia a aguas meteóricas, y si fuera menor, implicaría que las aguas fueron influenciadas por sedimentos marinos o fueron expuestas a evaporación (El-Aassy *et al.*, 2015). En la mayoría de las muestras de Cauquenes la razón rNa/rCl va entre 0,87 y 4,15, lo que indicaría un origen meteórico de las aguas.

La muestra PCA-036 corresponde a una muestra de G2 muy alejada de su tendencia principal, presentando la relación rNa/rCl más alta de toda la cuenca.

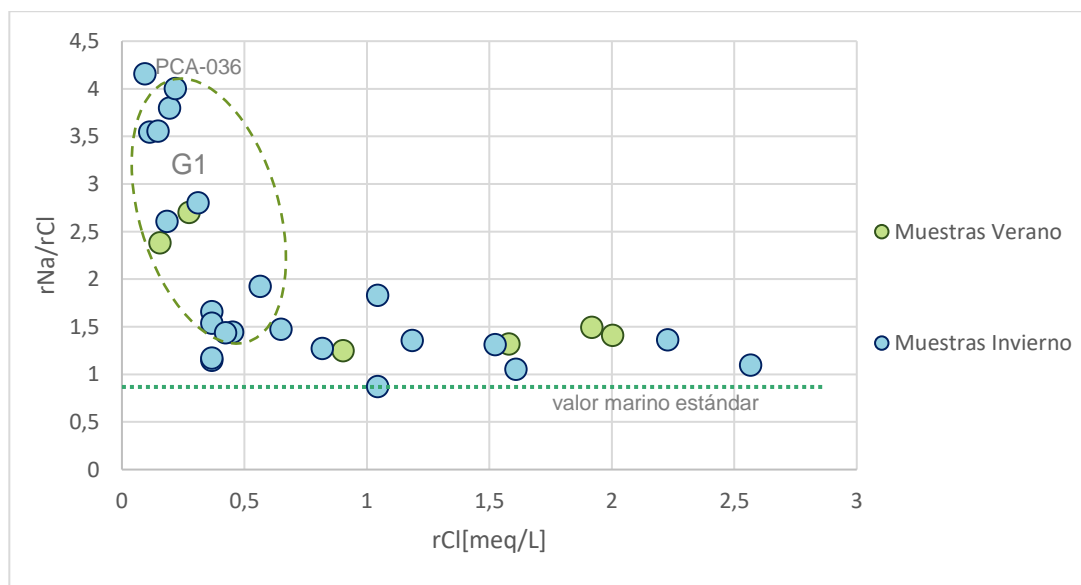


Figura 5.11: Relación rNa/rCl vs rCl .

La relación rCa/rCl presenta los mayores valores para las muestras del grupo G1. Por otra parte, se observa un decaimiento de esta relación con la salinidad llegando a presentar valores menores a 1 para las muestras más evolucionadas del sistema, estas son: PCA-015, PCA-017, PCA-018, PCA-024, PCA-035, PCA-040 y PCA-045.

La muestra PCA-040 presenta una relación rCa/rCl muy baja en comparación con el resto de las muestras del grupo G2.

En la cuenca Cauquenes, la relación rCa/rCl toma valores entre 0,36 y 10,61, los cuales se encuentran sobre el valor marino estándar de 0,0385 (Ovchinnikov, 1955). Esto indicaría nuevamente el origen meteórico de las aguas.

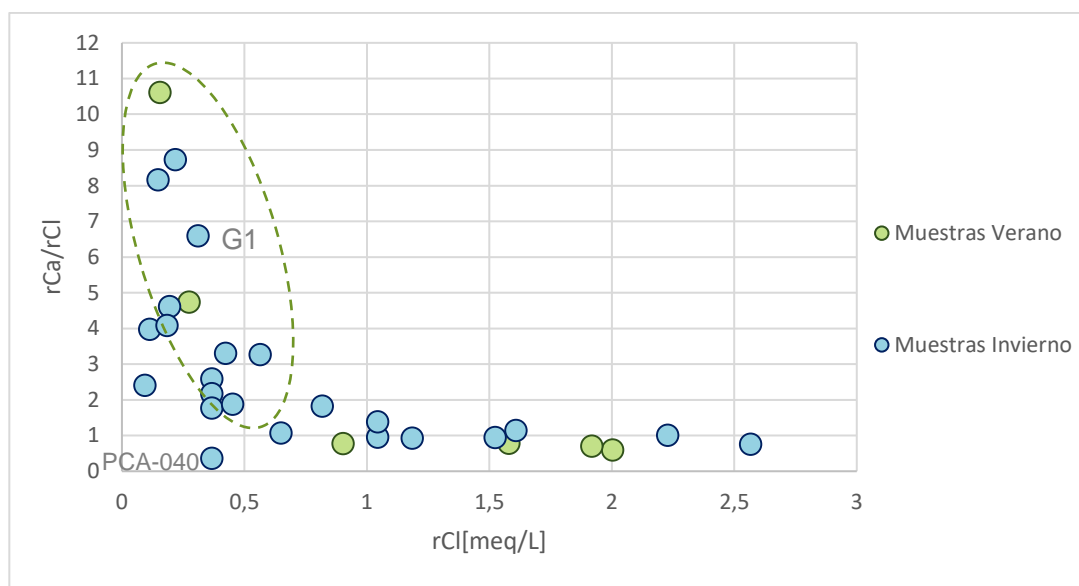


Figura 5.12: Relación rCa/rCl vs rCl .

La relación rNa/rCa generalmente se utiliza para determinar si es que existen procesos de intercambio iónico. En la Figura 5.13 se observan dos muestras que se alejan de la tendencia principal: la PCA-036 y la PCA-040. Estas muestras podrían estar indicando intercambio iónico en donde las aguas subterráneas adquieren sodio y pierden calcio.

Por otra parte, la relación rNa/rCa tiende a aumentar con la salinidad siguiendo la serie de Chevorateb (1955). En esta serie se muestra la evolución aniónica y catiónica típica de las aguas subterráneas. En el caso de los aniones, las aguas subterráneas con menor tiempo de residencia serían del tipo bicarbonatadas, luego sulfatadas y las más evolucionadas, cloruradas. Para el caso de los cationes la evolución sería desde aguas cálcicas, a magnésicas y a sódicas.

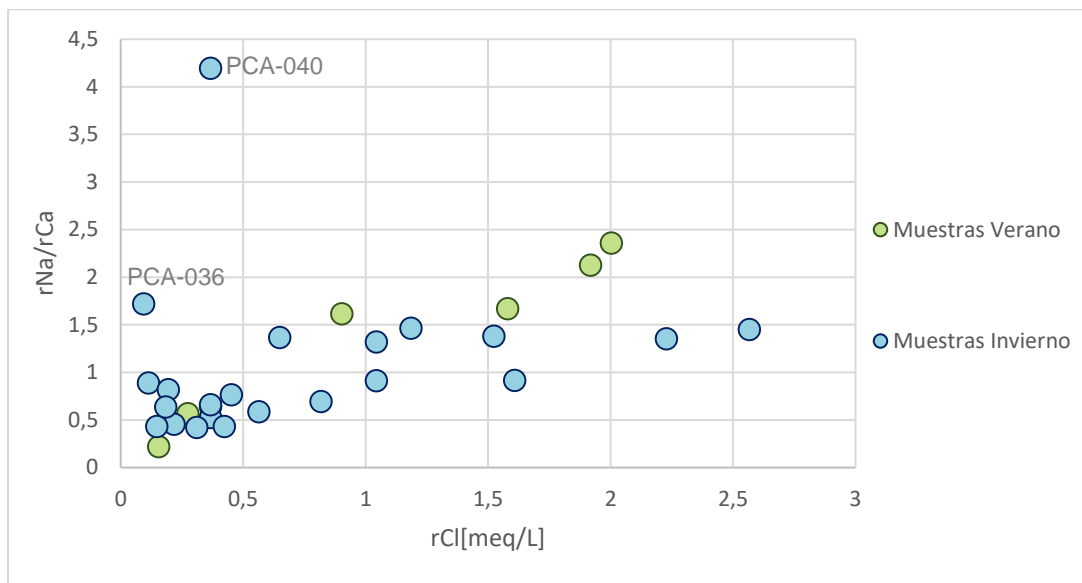


Figura 5.13: Relación rNa/rCa vs rCl .

La relación rMg/rCa generalmente toma valores entre 0,3 y 1,5 en aguas continentales. En el caso de la cuenca del río Cauquenes, la relación rMg/rCa toma valores entre 0,14 y 1,22 en las muestras PCA-003 y PCA-040 respectivamente, lo que corroboraría nuevamente su origen meteórico. Sus valores tienden a ser constantes. La mayoría de las muestras presentan una razón $rMg/rCa < 1$, lo que indica una predominancia del calcio por sobre el magnesio. Esto se puede relacionar con procesos de disolución o con recargas de agua dulce (El-Aassy *et al.*, 2015). Custodio (1983) también asocia los valores $rMg/rCa < 1$ a aguas que interaccionan con sedimentos originados por la meteorización de rocas graníticas, lo que se condice con la geología de la zona de estudio.

Las muestras PCA-040 y PCA-053, ubicadas en las subcuencas de Pocillas y del estero Belco respectivamente, tienen una relación rMg/rCa superior a 1. Esto generalmente se relaciona con la disolución de silicatos magnésicos. En el caso de la muestra PCA-40 esto podría atribuirse al proceso de intercambio iónico antes mencionado, en donde el calcio es más fijado que el magnesio (Custodio, 2001).

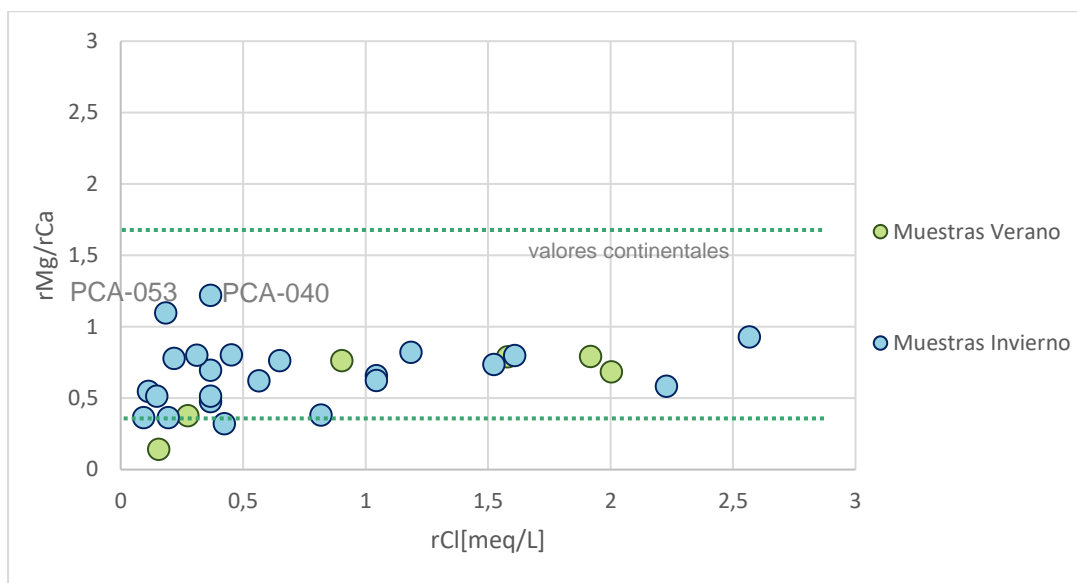


Figura 5.14: Relación rMg/rCa vs rCl

La razón SO_4/Cl se utiliza para determinar si ocurre reducción de sulfatos. Datta y Tyaggi (1996) postulan que una concentración alta de Cl^- y baja de SO_4^{2-} sería indicador de reducción. En la Figura 5.15 se observa que la relación rSO_4/rCl , que toma valores entre 4,06 y 0,019 en la cuenca. El valor típico marino de la relación rSO_4/rCl es 0,103 (Ovchinnikov, 1955), por lo que es probable que exista reducción de sulfatos. Las muestras que se encuentran por debajo del valor marino son: PCA-041, PCA-024, PCA-015, PCA-026, PCA-017, PCA-018 y PCA-002.

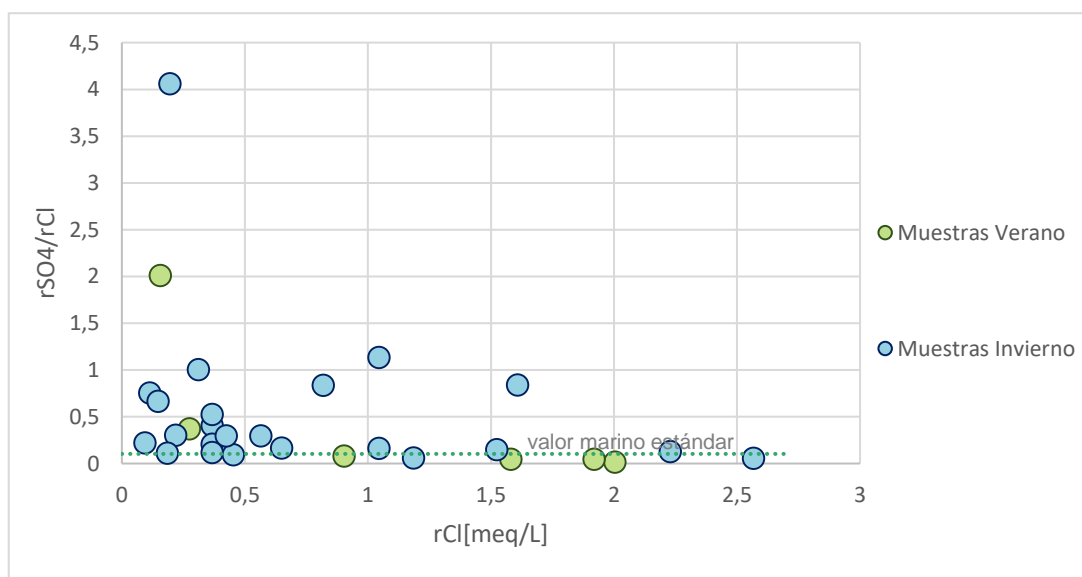


Figura 5.15: Razón entre sulfatos y cloruros. Indica reducción de sulfatos.

Por otra parte, Custodio y Llamas (1983) establece una constante K, la cual es proporcional al contenido de CO₂ disuelto en equilibrio. Esta constante tiende a crecer cuando se produce una reducción de sulfatos. La constante K corresponde a:

$$K = \sqrt[3]{rCa \times rHCO_3^2}$$

Ecuación 1

Donde K fue calculada y representada en un mapa (Figura 5.16) para así poder tener mejor noción de en qué zonas se está produciendo.

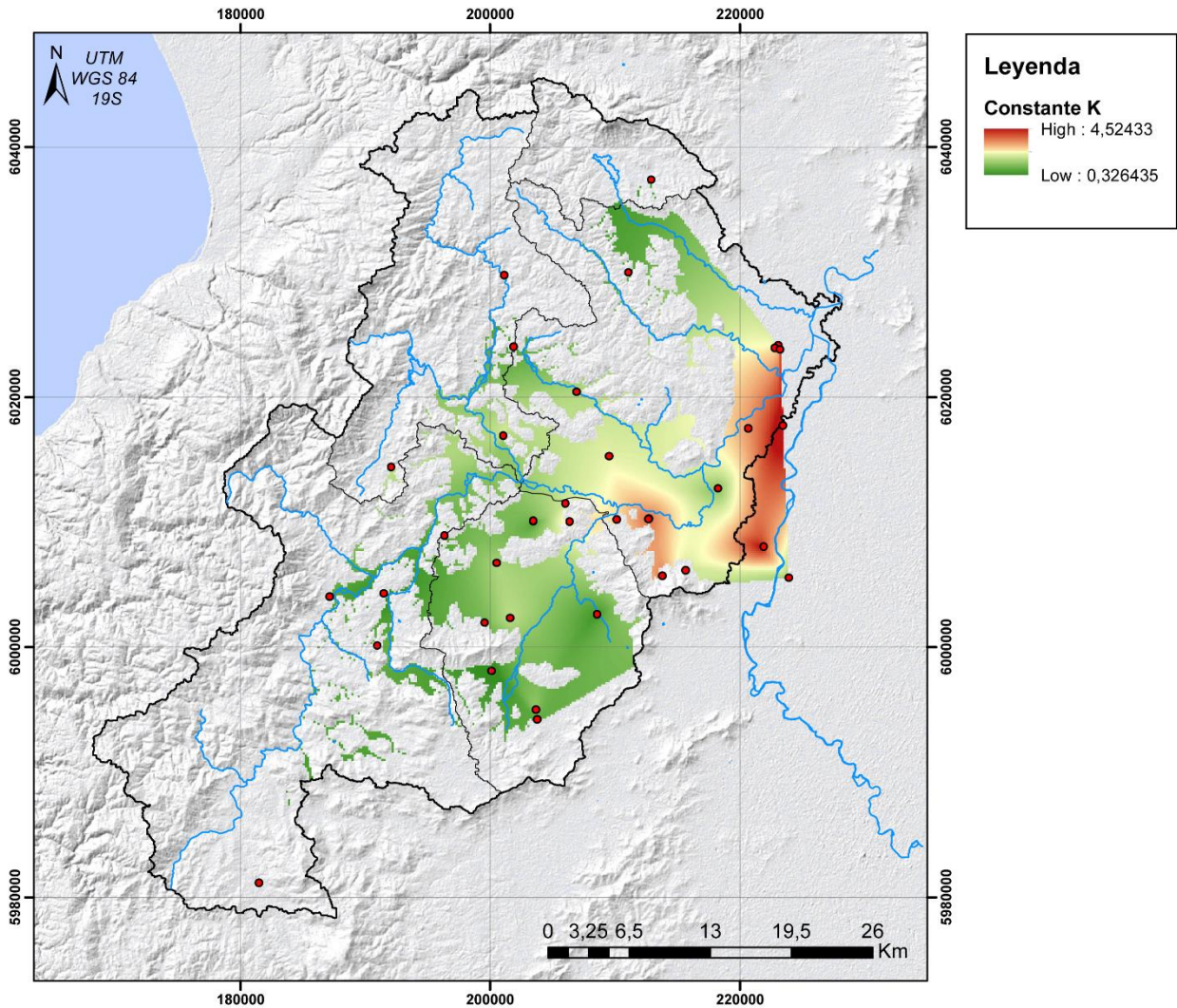


Figura 5.16: Interpolación de la constante K, la cual crecería hacia sectores con reducción de sulfatos. Se consideraron muestras de la cuenca vecina del río Perquilauquén.

Para complementar lo anterior, se observan los valores de oxígeno disuelto (OD) medidos por la DGA el año 2013. La concentración de oxígeno disuelto puede verse disminuida por procesos orgánicos y biológicos. Cuando esta concentración es baja, pueden gatillarse procesos de reducción. Estudios afirman que cuando la concentración de oxígeno disuelto toma valores menores a 2 [mg/L], el azufre se observa

predominantemente en su forma reducida S^{-2} (Oregon Drinking Water Services, consultado en línea).

En las aguas subterráneas de Cauquenes, el oxígeno disuelto varía entre 2 y 10[mg/l] mostrando sus valores más bajos en la subcuenca el estero Belco y en la cuenca del río Perquilauquén (lo que se observa en la Figura 5.17). En este sector los depósitos piroclásticos tienen un mayor espesor y en conjunto a su baja permeabilidad, podrían relacionarse estos depósitos con las bajas concentraciones de oxígeno.

En general los valores de O_2 en la cuenca son propicios para ambientes oxidantes, pero al noreste de la zona de estudio, el OD toma valores cercanos a 2 [mg/L]. Particularmente en ese sector, coincide que los valores de la constante K son mayores, por lo que es probable que existan procesos reductivos involucrados.

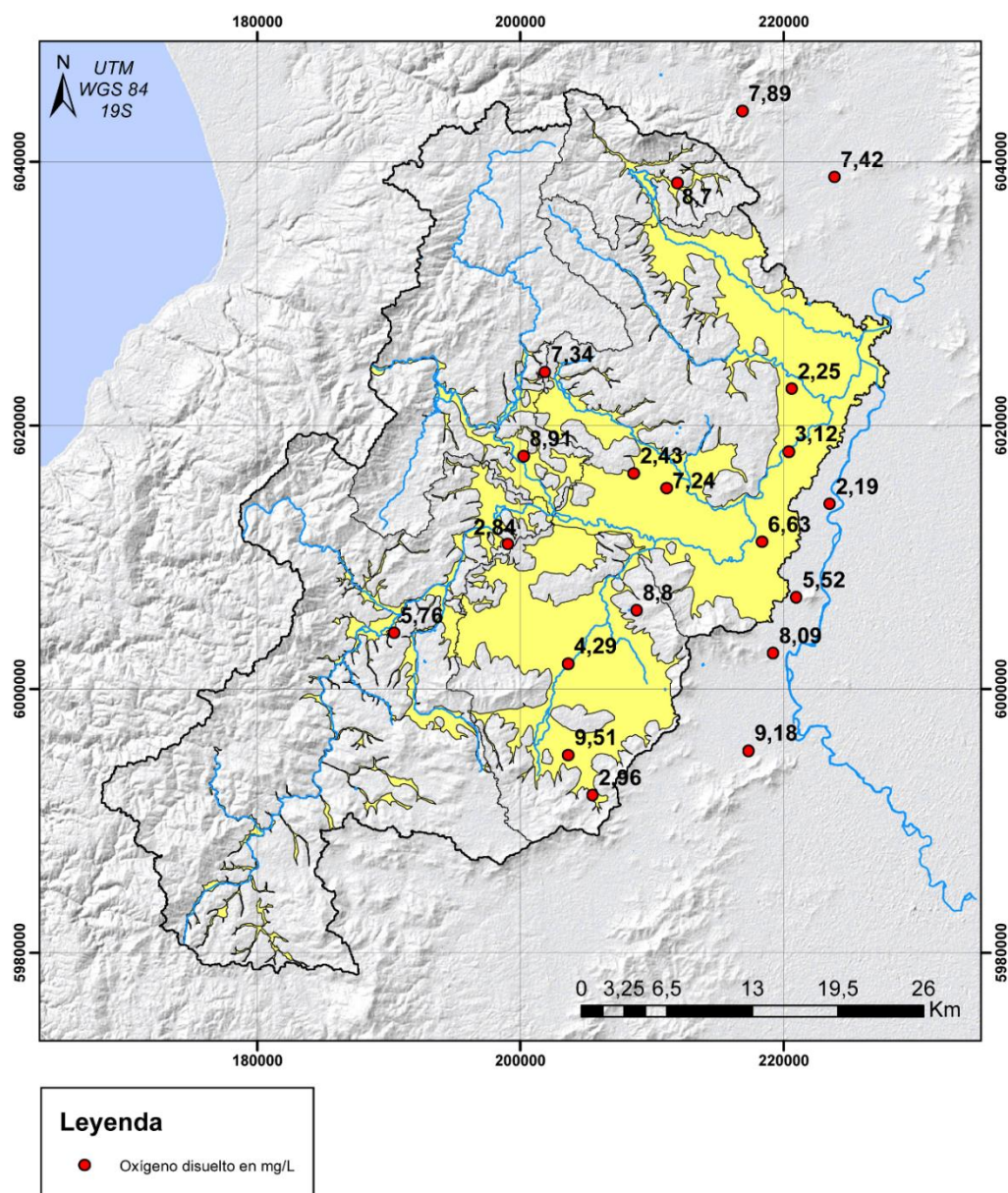


Figura 5.17: Distribución de oxígeno disuelto. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de DGA (2013).

A partir de razones iónicas, se pudo establecer un origen meteórico de las aguas. Además, se relacionaron las altas concentraciones de bicarbonatos, magnesio y calcio en las muestras del G1, a muestras cercanas a las zonas de recarga.

Por otra parte, se pudo establecer el enriquecimiento en sodio de las aguas a medida que aumenta su tiempo de residencia, siguiendo la serie de Chevotareb (1955). Además, según esta misma serie se puede establecer que las aguas de la cuenca son jóvenes debido a que son en su mayoría del tipo bicarbonatada.

La relación rMg/rCa por su parte, muestra la interacción de las aguas con sedimentos originados por la meteorización de rocas graníticas, que provendrían desde el basamento el cual está compuesto en casi toda la zona de estudio por rocas graníticas.

Por último, se establecieron procesos reductivos al noreste de la zona de estudio asociada a reducción de sulfatos.

5.2.2.2.2 Diagrama de Gibbs

La química de las aguas sigue en general una evolución típica para las aguas subterráneas. El mecanismo que controla la química de las agua se estableció mediante el diagrama de Gibbs (Figura 5.18). Estos diagramas muestran la relación entre sólidos disueltos con la razón $(Na^+ + K^+) / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$ en el caso de los cationes y con la razón $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$ para los aniones. Los mecanismos que se consideran en estos diagramas son la evaporación, la precipitación y la interacción agua-roca.

Como se observa en la figura, el mecanismo controlador de la química de las aguas de la cuenca Cauquenes corresponde a la interacción entre el agua y la roca.

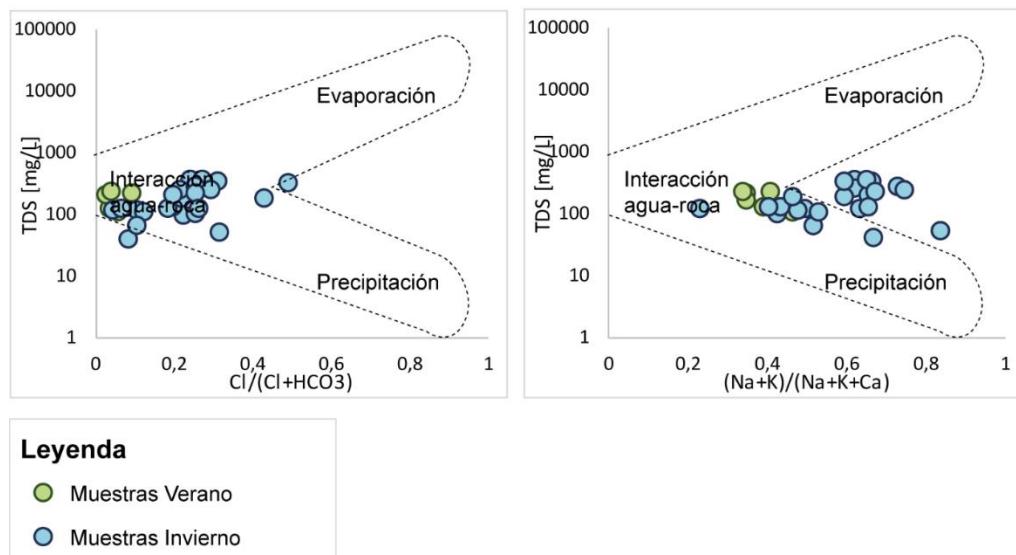


Figura 5.18: Diagrama de Gibbs. Muestra el mecanismo que controlan la química de las aguas subterráneas.

5.2.2.2.3 Diagrama de Durov

El diagrama de Durov (1928) corresponde a una representación que entrega información acerca de las facies hidrogeoquímicas y la evolución de la química de las aguas. Este se construye de manera similar al diagrama de Piper, pero la diferencia es que los puntos se unen en un cuadrado central. Además, se puede extender para agregar más parámetros que puedan aportar información útil, como por ejemplo la conductividad y pH (Lloyd y Heathcote, 1985).

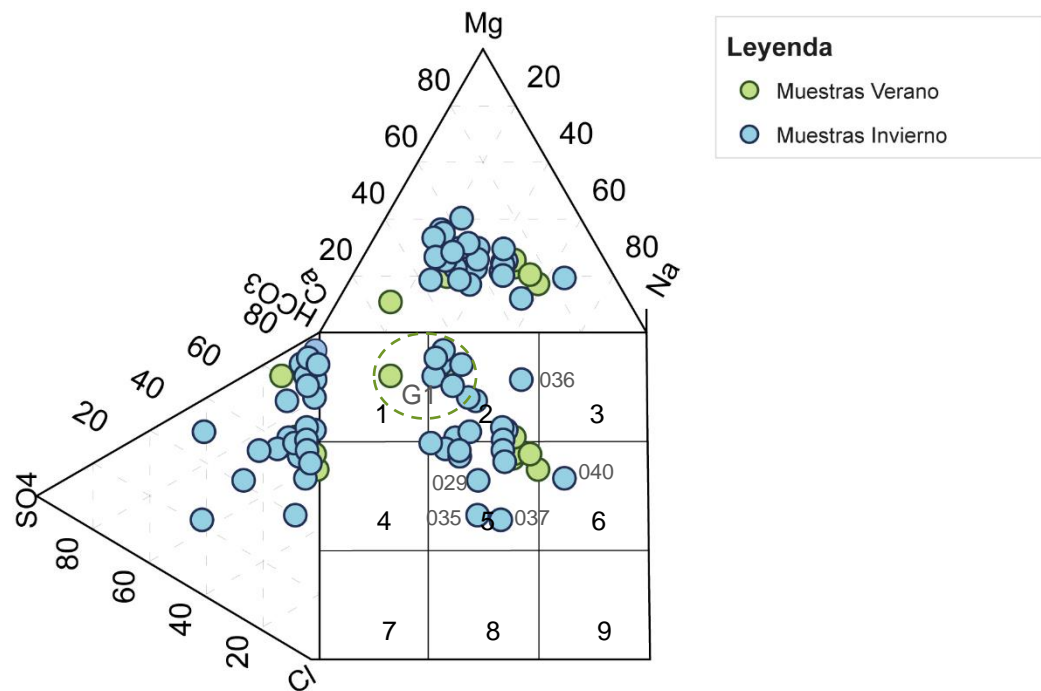


Figura 5.19: Diagrama de Durov.

En la Figura 5.19 se muestra el diagrama de Durov, el cual se divide en 9 campos que aportan información acerca de los procesos a los cuales han sido sometidas las aguas. Las aguas G1 se ubican en los campos 1 y 2, por lo que corresponden a flujos someros en las cuales hay dominancia de Ca^{2+} y HCO_3^- (Lloyd y Heathcote, 1985). Esta dominancia indica que nos encontramos con las aguas más jóvenes del sistema, y podemos inferir una cercanía a zonas de recarga, como ya se había establecido.

Lloyd y Heathcote (1985) también indican que, si en el campo 2 existe una contribución importante de sodio, podríamos estar en presencia de intercambio iónico. Por lo que la muestra PCA-036, como se indicó anteriormente, estaría siendo sometida a este proceso.

Las aguas G2 se ubican principalmente en los campos 2 y 5. En este último no existe un catión o anión dominante, lo que puede estar indicando la mezcla de dos facies o procesos de disolución. Como vimos a través del diagrama de Gibbs, se pudo establecer que las aguas eran sometidas a procesos de interacción agua-roca los cuales, serían responsables de la evolución desde las aguas G1, de composición más cálcicas a las aguas G2, de composición más mixta-sódica.

Por otra parte, se observa que las muestras que fueron asociadas a contaminación agrícola (PCA-029, PCA-035, PCA-037 y PCA-040) por su alto contenido de nitratos, potasio y sulfato, se encuentran en los campos 5 y 6, alejándose de la composición de las otras muestras. Lo anterior podría atribuirse a la contaminación a la cual están siendo sometidas las aguas. En el campo 6 podemos encontrar a la muestra PCA-040, ubicada en Pocillas. Este tipo de aguas es poco común e indica podría provenir de mezclas de aguas o la influencia de disoluciones poco comunes (Lloyd y Heathcote, 1985). En este caso, podría deberse a procesos intercambio iónico, como se propuso en la Figura 5.13, o atribuirse sólo a la contaminación agrícola a la cual está siendo sometida.

5.2.3 Elementos Traza

5.2.3.1 Antimonio

En Cauquenes se pudo notar una concentración importante de elementos dañinos para la salud, entre ellos, el antimonio. El Sb se puede encontrar de manera natural en la atmosfera en partículas del suelo transportadas por el viento, debido a erupciones volcánicas, en el aerosol marino, debido incendios forestales y fuentes biogénicas (Nriagu, 1989). Pero en general el Sb se encuentra en bajas cantidades y es un indicador de actividades antropogénicas. Algunas de estas actividades son la minería, la fundición de metales, la combustión de carbón, los desechos urbanos y los gases emitidos por automóviles (Salminen, 2005).

En el caso de la cuenca del río Cauquenes, este elemento se encontró en abundancia sólo en invierno, tanto en muestras subterráneas como superficiales. Las muestras superficiales tomadas en invierno PCA-025 y PCA-033 tienen concentraciones de antimonio de 0,026 [mg/L] y 0,17 [mg/L] respectivamente.

En la cuenca del río Perquillauquén, los valores fueron aún mayores, alcanzando hasta 2 [mg/L] en la muestra PCA-050.

Como se observa en la Figura 5.20, no se correlaciona con la salinidad. A pesar de lo anterior, para las muestras de invierno, el antimonio se puede correlacionar con el fósforo (Figura 5.21), de manera lineal con un coeficiente de correlación de 0,9857 y con una pendiente muy cercana a 1. Esto nos indica una fuente común de ambos elementos.

En este caso, las grandes concentraciones de antimonio en invierno tanto en aguas subterráneas como superficiales, habla de una remoción de este elemento a través de las lluvias. El origen del fósforo y antimonio no se puede asociar claramente a la geología, debido a que no existe registro de minerales fosfatados en la zona de estudio, por lo que se les podría asignar un origen antrópico. De todas maneras, se desconoce con claridad su procedencia y se necesario un estudio más detallado.

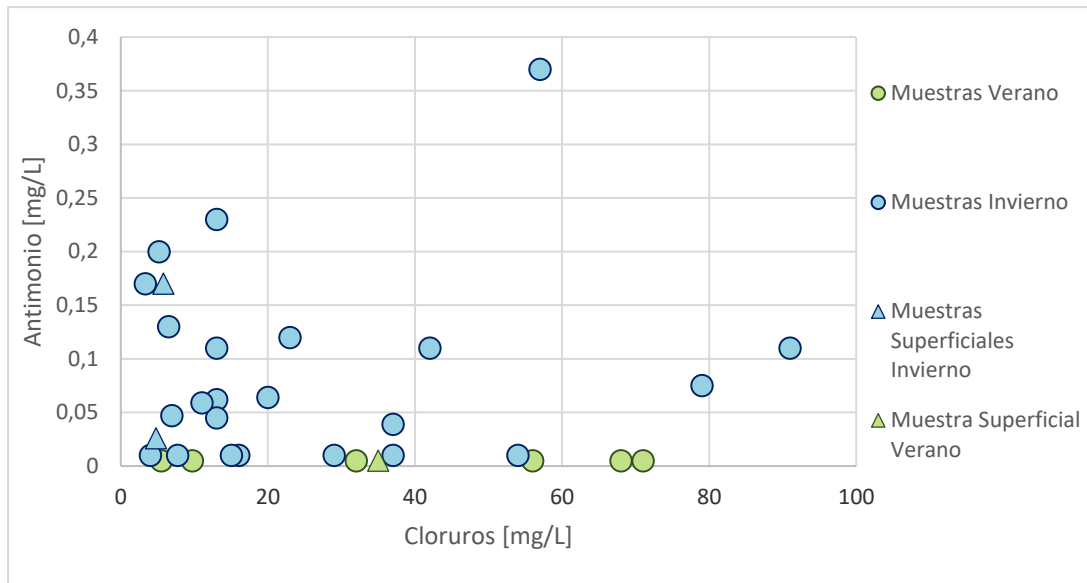


Figura 5.20: Relación entre y antimonio y la salinidad.

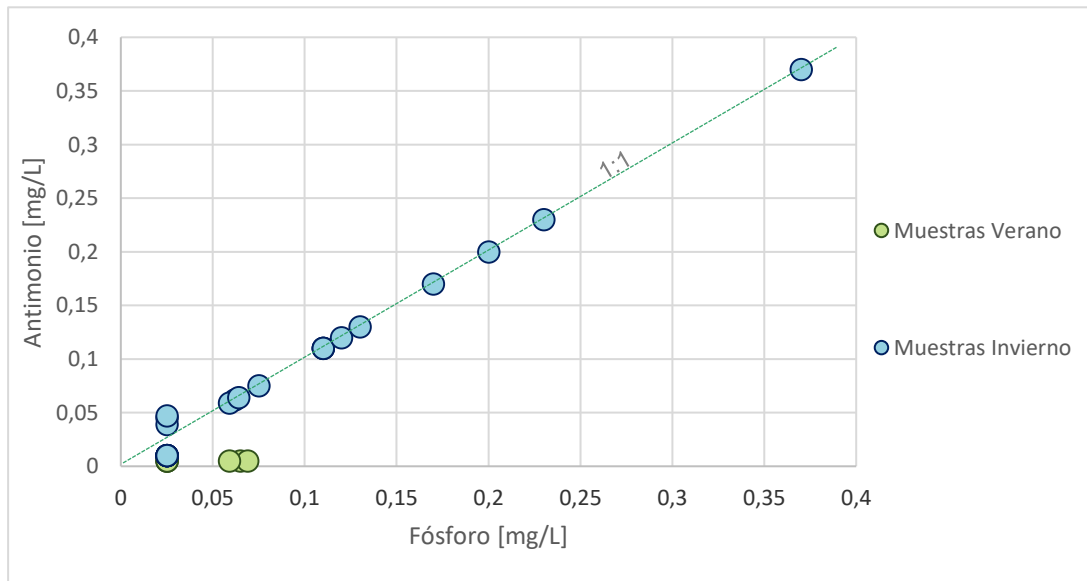


Figura 5.21: Relación entre el fósforo y antimonio.

5.2.3.2 Hierro y Manganeseo

El hierro y el manganeso tienden a comportarse de manera similar. Su solubilidad depende de la intensidad de oxidación del ambiente en el que ocurre y de su pH (Hem,1985).

En el caso del manganeso, las muestras presentan en general una baja concentración y no presentan una correlación con la salinidad (Figura 5.22). Sus mayores concentraciones se encuentran en la subcuenca de Pocillas y en la del estero Belco. La muestra PCA-042 se ubica en la subcuenca del río San Juan.

Por otra parte, se observa que el hierro tampoco se correlaciona con la salinidad y se encuentra en concentraciones bajas en la cuenca (Figura 5.23). También se observa que las muestras que presentan un alto contenido de hierro, se ubican en las subcuencas de Pocillas y del estero Belco.

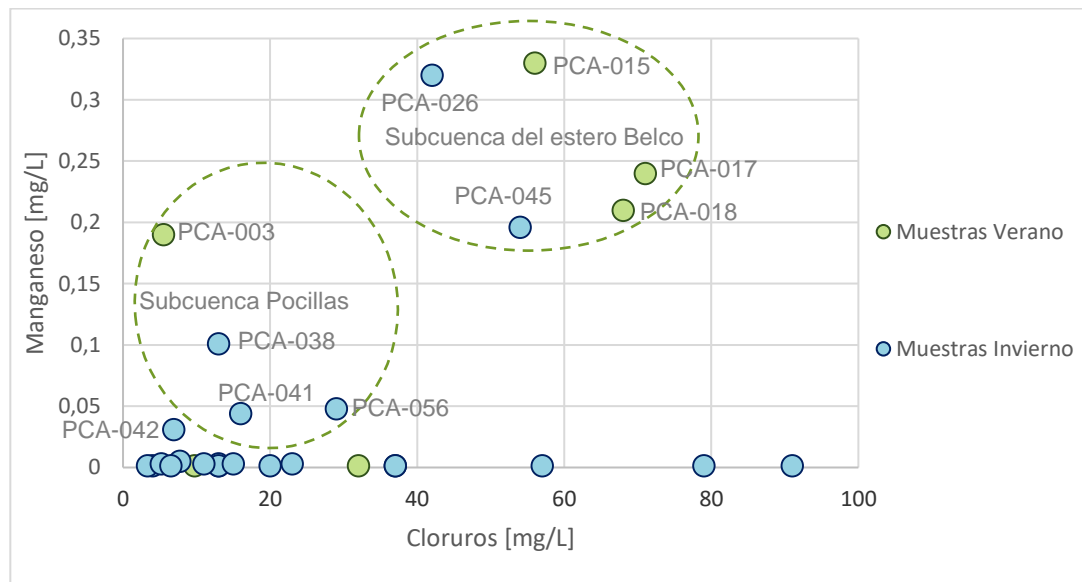


Figura 5.22: Relación entre cloruros y manganeso.

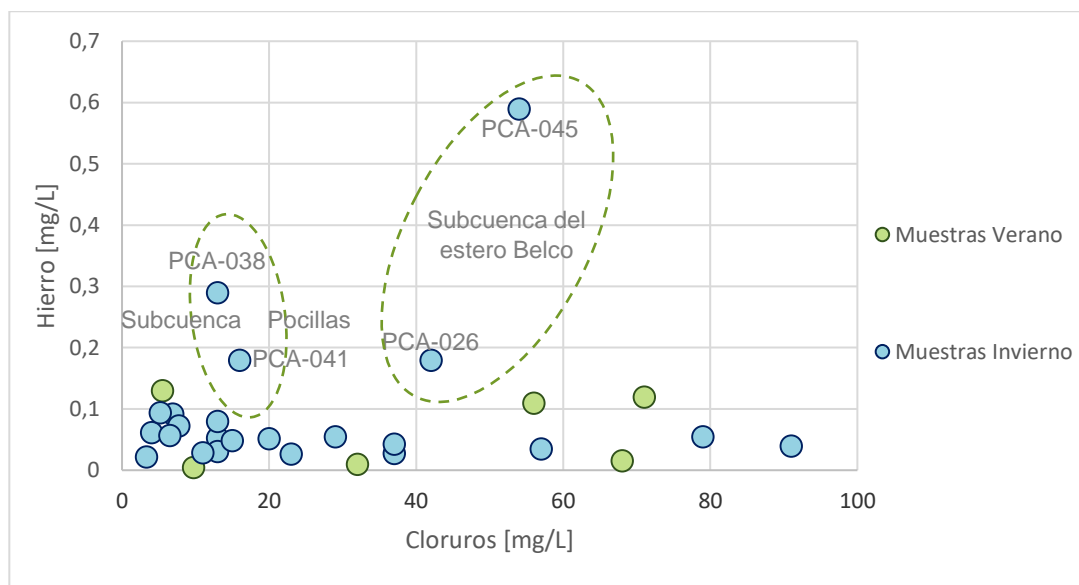


Figura 5.23: Relación entre hierro y cloruros.

A continuación, en la Figura 5.24, se muestra la relación entre el hierro y el manganeso. Se observan dos tendencias: una que muestra un aumento del hierro con el aumento del manganeso y otra, en la que el hierro se encuentra en concentraciones entre 0 - 0,2 [mg/L] y elevadas concentraciones de manganeso. En la primera tendencia, el Hierro y el Manganeso se relacionan linealmente a razón 3:1, lo que podría atribuirse a disolución mineral como, por ejemplo, a la disolución de biotita en el basamento.

Por otra parte, las muestras con alto contenido de manganeso y una cantidad menor de hierro, a excepción de la PCA-003, corresponden a muestras que mostraron estar sometidas a procesos de reducción de sulfatos. Por lo que la disolución de estos elementos podría verse facilitada debido al ambiente reductor al que están siendo sometidas.

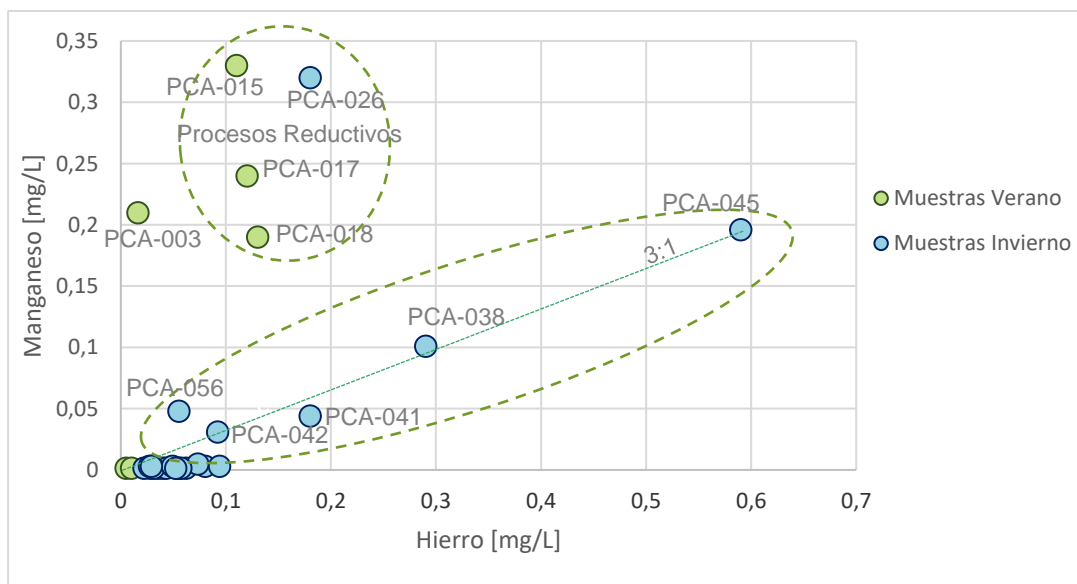


Figura 5.24: Relación entre Hierro y Manganeso.

5.2.3.3 Arsénico

Para el caso del arsénico, las muestras con mayores concentraciones se encontraron al noreste de la zona de estudio en la subcuenca del estero Belco y en la cuenca del río Perquilauquén.

En esta sección se debe considerar que hubo un cambio en el límite de detección instrumental entre invierno y verano para el arsénico, lo que fue perjudicial para este estudio, y sólo se obtuvieron las concentraciones reales en verano. En la cuenca del río Cauquenes sólo se registraron cantidades detectables de arsénico en el período de verano, mientras que en la cuenca del río Perquilauquén, se registraron valores detectables en ambos períodos.

La distribución del arsénico en la cuenca también podría ser interesante de estudiar. Sus altas concentraciones podrían estar asociada a los depósitos piroclásticos al norte de la zona de estudio y en la cuenca del río Perquilauquén, pero al no conocerse la distribución real de este elemento en la cuenca esto no se puede afirmar con certeza.

Primero, se debe notar que no existe una relación entre el arsénico y la salinidad (Figura 5.25). Además, de la Figura 5.26 se observa que las mayores concentraciones de arsénico se relacionan con los valores de pH más básicos, entre 8,16 y 8,28.

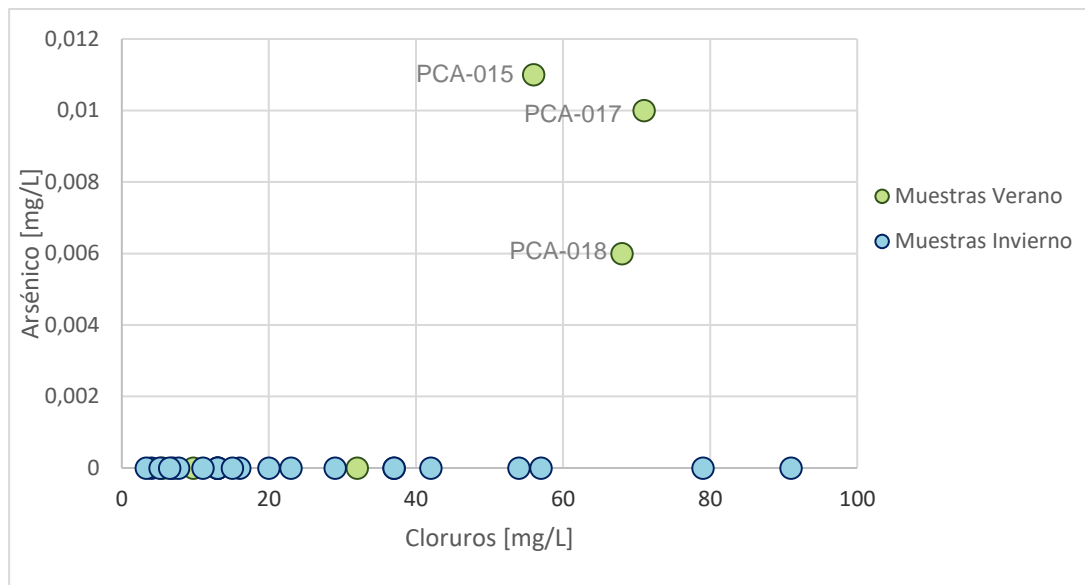


Figura 5.25: Relación entre el arsénico y la salinidad.

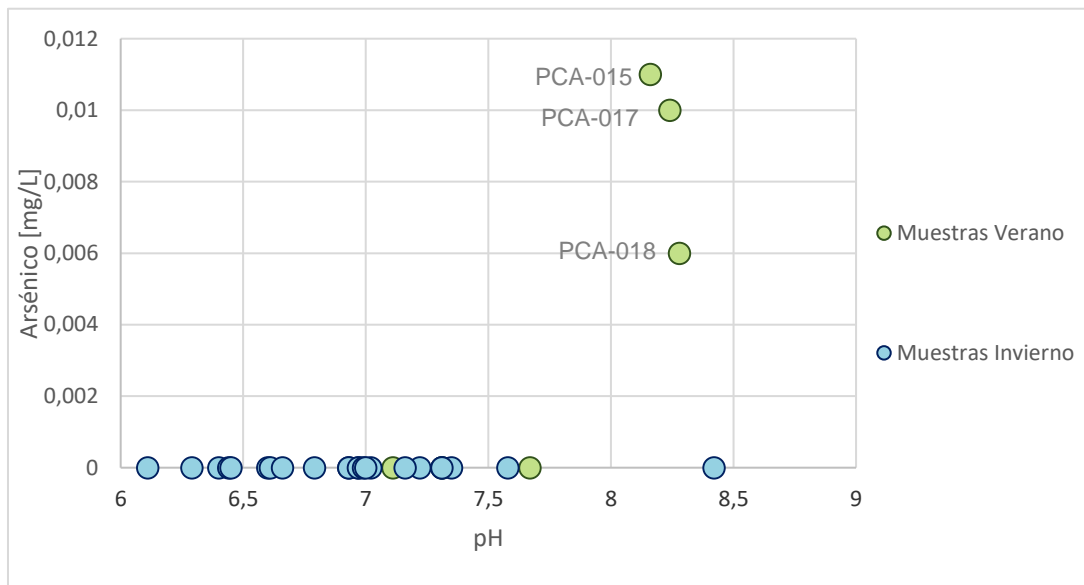


Figura 5.26: Relación entre arsénico y pH.

Por otra parte, es común relacionar el arsénico, hierro y manganeso debido a que el arsénico puede ser absorbido o coprecipitar con hierro y manganeso. Particularmente en la cuenca, se pueden relacionar las mayores concentraciones de arsénico, con las mayores de manganeso (Figura 5.27). La muestra PCA-026 corresponde a una muestra repetida en invierno y verano, pero que en verano si presentó niveles detectables de arsénico, lo que puede ocurrir debido al cambio de límite.

Las muestras PCA-015, PCA-017, PCA-018 y PCA-026 fueron asociadas a procesos reductivos en la sección 5.2.3.2, por lo que el ambiente reductor al que están siendo sometidas estas muestras podría aumentar la solubilidad del arsénico.

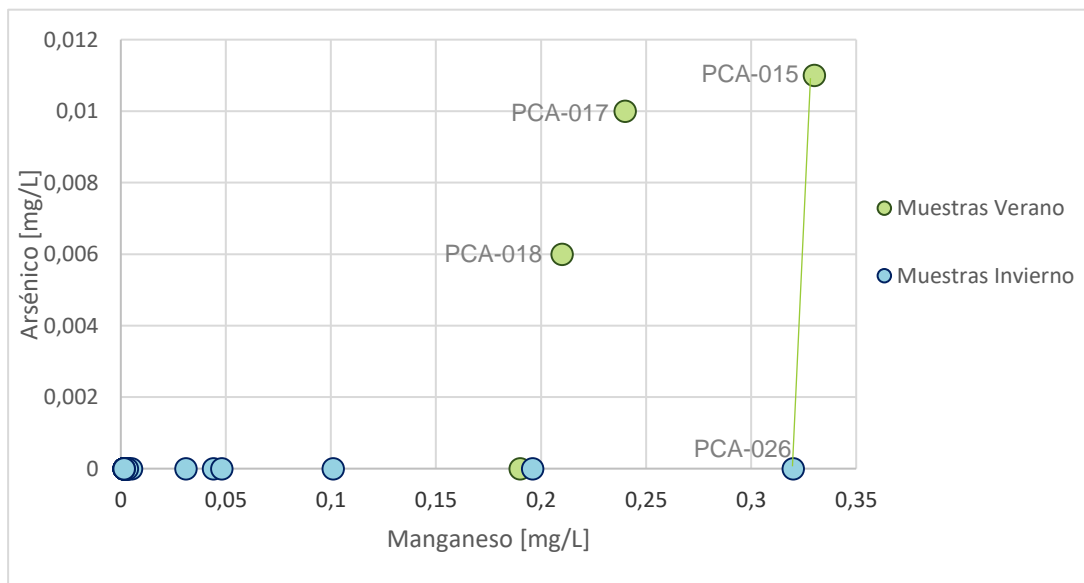


Figura 5.27: Relación entre arsénico y Manganeso.

5.2.4 Relación con aguas de la cuenca Perquilauquén

A partir de los diagramas de Stiff, se observó una posible relación entre las muestras de la cuenca Perquilauquén con las de Cauquenes. Esto se observa entre las muestras PCA-047 y PCA-048 de Cauquenes y las muestras PCA-050 y PCA-006 de Perquilauquén (Figura 5.28). Cabe recordar que las muestras PCA-006 y PCA-050 fueron tomadas en el mismo pozo en verano e invierno respectivamente, por lo que se muestran unidas por una línea. Para determinar si esta interacción realmente existe, se estudia la evolución de los elementos mayoritarios.

Lo primero que se debe notar es que tanto las aguas de la cuenca Perquilauquén como la mayoría de las aguas de la cuenca Cauquenes son del tipo bicarbonatada mixta.

En la Figura 5.29 se pueden gráficos que muestran la relación entre iones mayoritarios y salinidad. En ellos se observa una similitud en la composición de las muestras PCA-047, PCA-048 y la PCA-50. Lo que podría indicar que existe interacción entre la cuenca Cauquenes y su cuenca vecina Perquilauquén. Esta similitud indicaría que las aguas de ambas cuencas podrían estar mezclándose o que una cuenca podría estar alimentando a la otra.

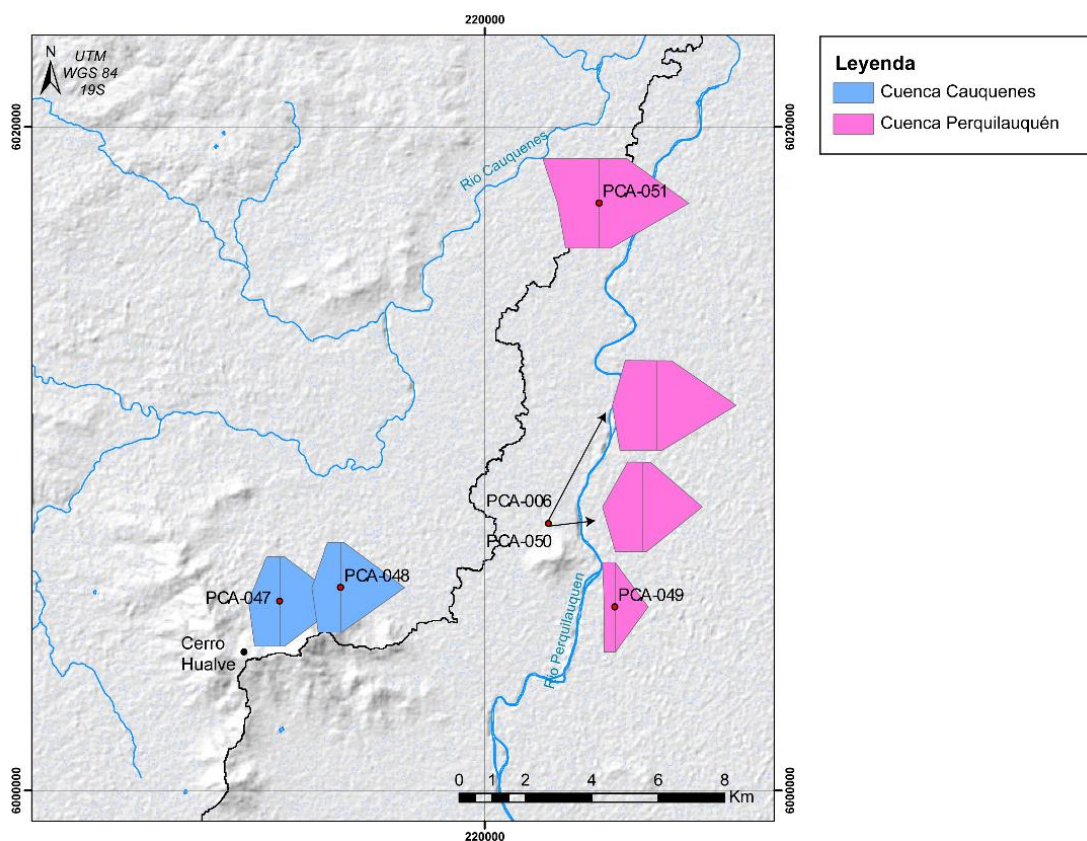


Figura 5.28: Relación de recarga entre las cuencas Cauquenes y Perquilauquén.

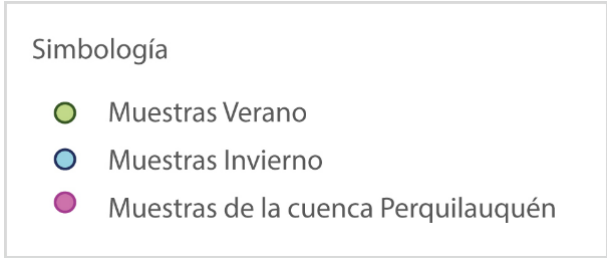
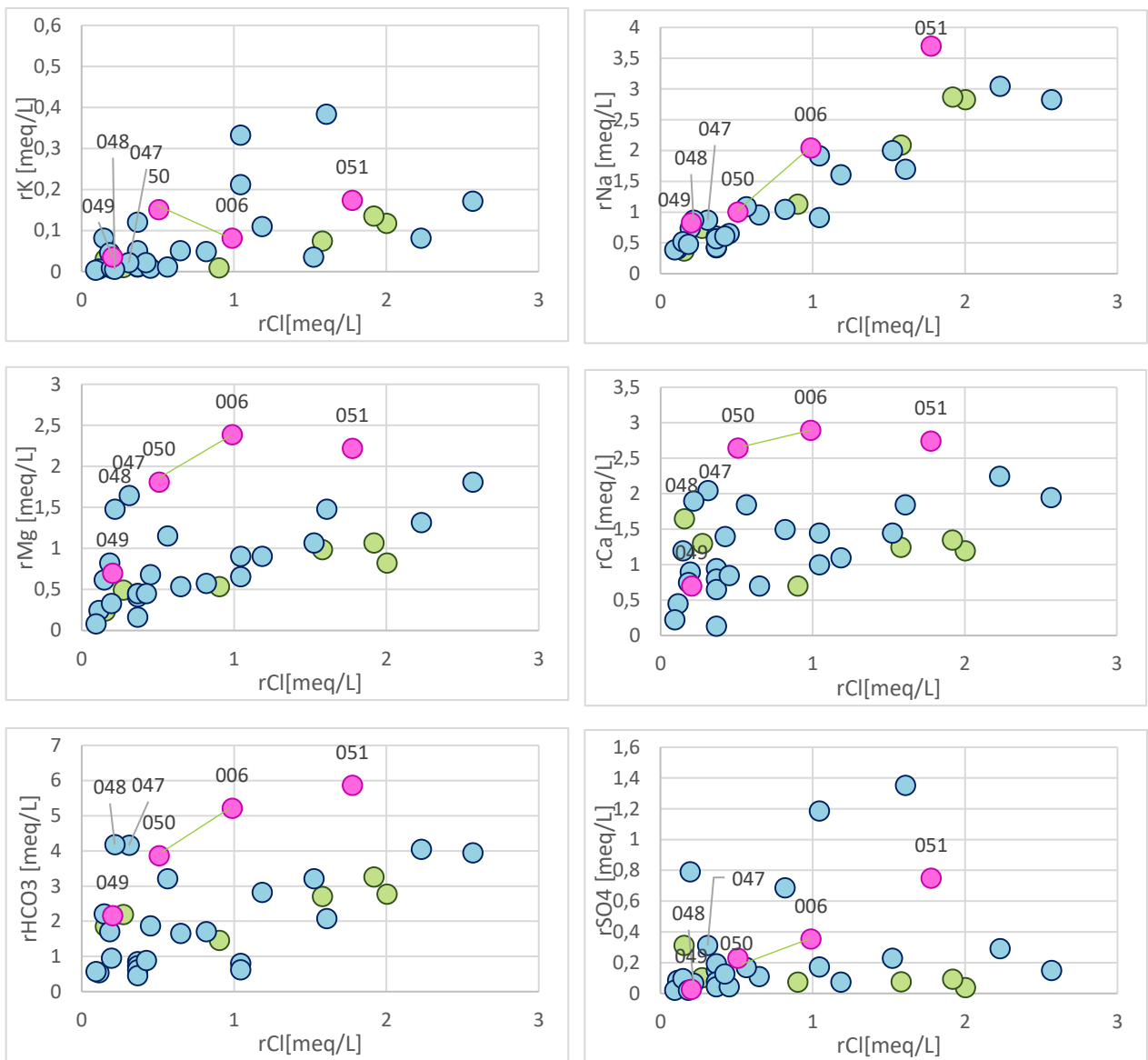


Figura 5.29: Relación entre elementos mayores y cloruros de las cuencas Perquillauquén y Cauquenes.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- El acuífero de Cauquenes es un acuífero multicapa controlado por la geología de la zona de estudio. El basamento, controla el movimiento del flujo subterráneo hacia el noreste. Sus valles están rellenos principalmente por depósitos de origen fluvial y piroclásticos. Los depósitos clásticos de tamaños más finos se encuentran en las subcuencas del río San Juan y Pocillas, y es aquí en donde se encontrarían las conductividades hidráulicas más bajas. En el área cercana al curso del río Cauquenes se encuentran los sedimentos de granulometría más gruesa, en este sector se presenta mayor conductividad hidráulica.
- Se definieron 4 unidades hidroestratigráficas (Unidad no acuífera, UHA, UHB y UHC), de las cuales la mayor productividad la alberga la UHA. Esta unidad se encuentra al norte de la zona de estudio en las subcuencas del estero Belco y del río Tutuvén. Los pozos de esta unidad tienen un rendimiento entre 5 y 85 [L/s] y la conductividad hidráulica asociada es del orden de 10^0 y 10^1 [m/día]. Su coeficiente de almacenamiento es del orden de 10^{-1} y 10^{-3} en la subcuenca del estero Belco y entre 10^{-3} y 10^{-7} en la del río Tutuvén.
- Las isopiezas nos indican una recarga de origen meteórico de la cuenca y un avance del flujo subterráneo hacia la subcuenca del estero Belco.
- Las aguas de la cuenca Cauquenes son en general del tipo bicarbonatado mixto. Son aguas levemente ácidas a levemente alcalinas (su pH varía entre 6 y 8,4 para las aguas subterráneas). Sus conductividades eléctricas toman valores entre 76 y 890 [μ S/cm], lo que indica que nos encontramos frente a aguas dulces. La CE y pH aumentan hacia la subcuenca del estero Belco.
- Las aguas de la cuenca son jóvenes y de origen meteórico. Cerca de las zonas de recarga son de tipo bicarbonatado cálcico-magnésico. A medida que las aguas permanecen más tiempo en el acuífero, tienden a enriquecerse en sodio.
- La química de las aguas es controlada principalmente por procesos de interacción agua-roca.

- Existen procesos reductivos en la subcuenca del estero Belco. Estos son responsables de la reducción de sulfatos y de la disolución de manganeso y arsénico en algunas muestras de la subcuenca del estero Belco. En esta zona los depósitos de origen piroclásticos tienen su mayor espesor, y debido a su baja permeabilidad podrían relacionarse con las bajas cantidades de oxígeno que se observan.
- El arsénico, hierro y manganeso se encontraron en cantidades que exceden la norma de agua potable chilena Of.409 (2005). Las mayores concentraciones de arsénico se observan en la subcuenca del estero Belco, y las de hierro y manganeso en las subcuencas del estero Belco y de Pocillas.
- Se observaron casos puntuales de muestras con altas concentraciones de nitratos, potasio y sulfatos. Estas altas concentraciones indicarían contaminación de origen agrícola debido al uso de fertilizantes en la zona.
- Se encontraron altas concentraciones de antimonio en las muestras tomadas en invierno. Además, se estableció una procedencia común entre el antimonio y el fósforo, lo que no se pudo relacionar a la geología de la zona, por lo que el origen de ambos elementos sería antrópico.
- Existe interacción entre las aguas subterráneas de las cuencas Cauquenes y Perquillauquén al noreste de la zona de estudio.

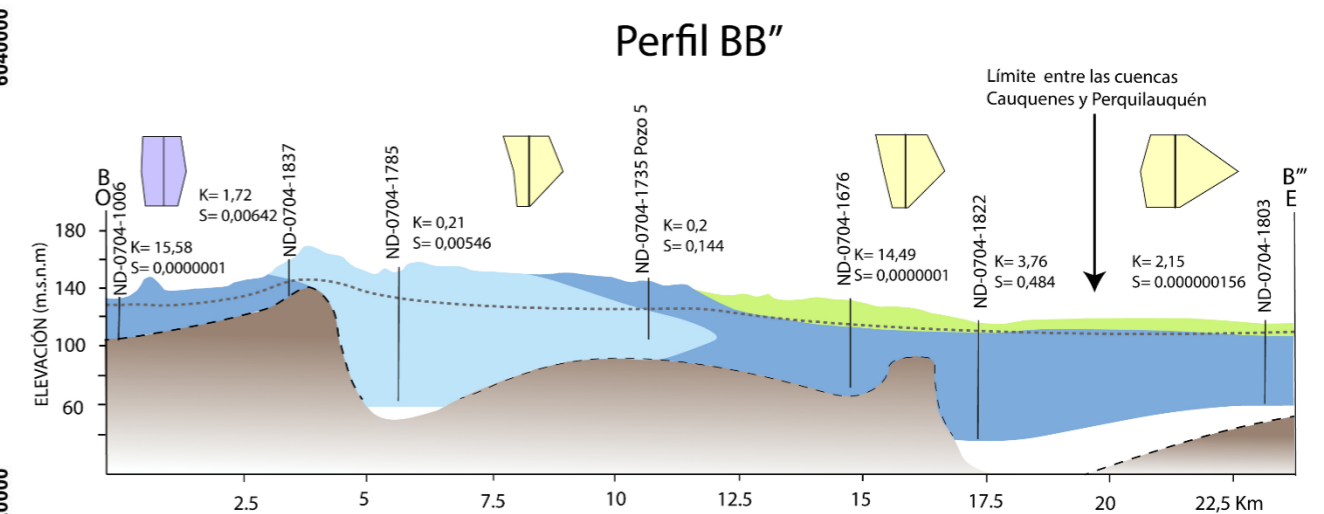
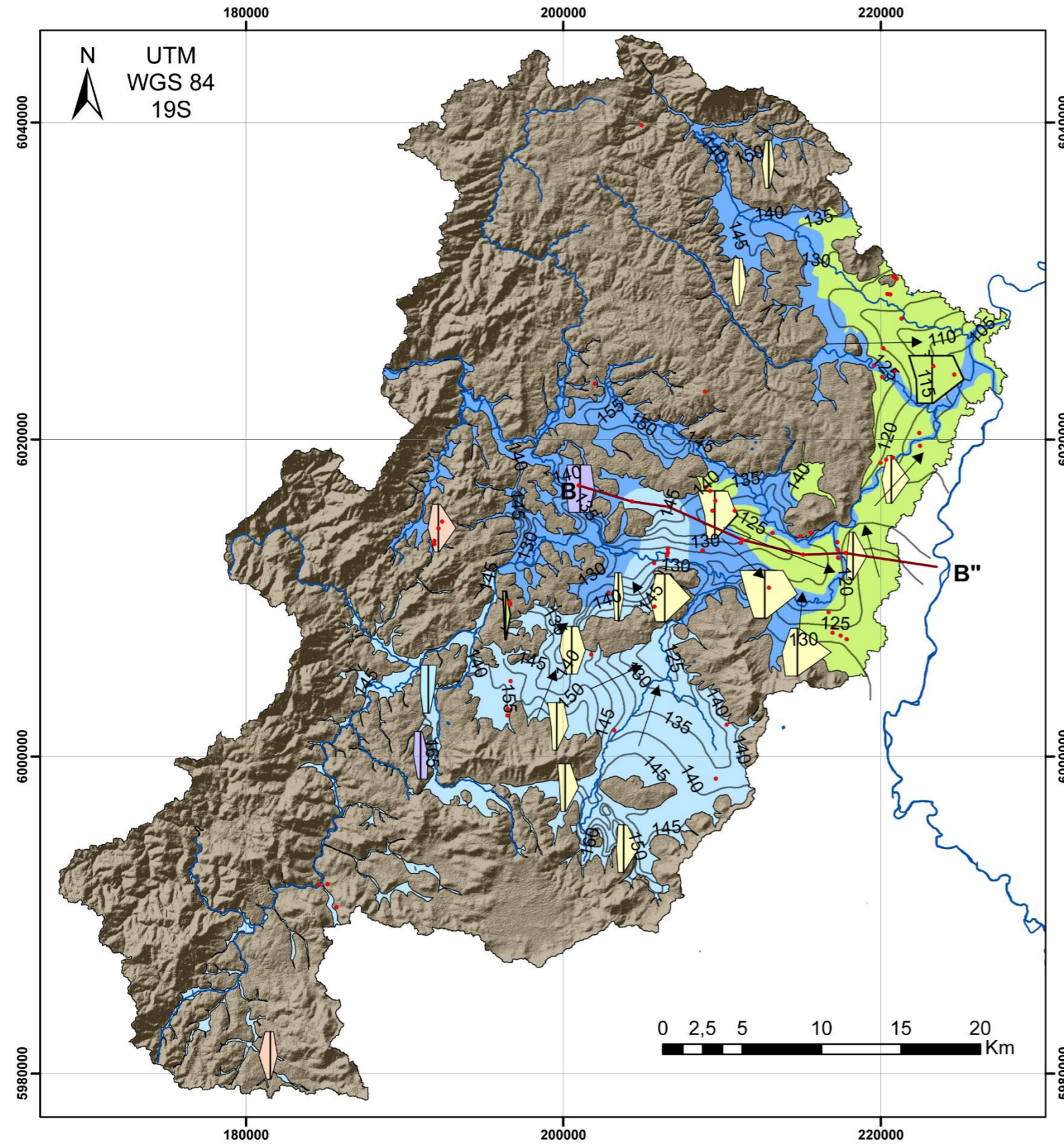
6.2 RECOMENDACIONES

- En este trabajo se asumió que el basamento actúa de manera impermeable, pero en realidad en algunas zonas se encuentra muy meteorizado y podría actuar como una capa permeable, e incluso podría albergar reservorio de aguas subterráneas. Esta información es desconocida y se requieren estudios más acabados que puedan determinarlo. En consideración a esto se recomiendan estudios geofísicos para determinar en qué zonas podrían encontrarse acuíferos.
- Se recomienda mejorar la información estratigráfica entre los esteros El Arenal y Las Garzas y en los sectores de San Juan y Pocillas. En estos sectores existen muy pocos pozos con estratigrafía, por lo que se recomienda realizar estudios más acabados de la geología de sub-superficie de para establecer con mayor precisión si es que existen zonas con mayor potencial hídrico.
- Se asumió un carácter semipermeable de los depósitos piroclásticos debido a las pruebas de bombeo y a trabajos anteriores. Sin embargo, se

recomienda hacer estudios de permeabilidad en esta capa debido a su anisotropía. Además, se recomienda comprobar el límite oeste de estos depósitos debido a que en algunos sectores se definió usando la estratigrafía de los pozos y no se pudo por falta de afloramientos.

- Es necesario un monitoreo estacional de elementos traza en la zona de estudio. Particularmente en el caso del antimonio y del arsénico, para así poder determinar con certeza la fuente de estos dos elementos. Para el caso del arsénico, también se recomienda realizar estudios de la composición química de los depósitos piroclásticos, para establecer si es que estos últimos serían responsables de la presencia del arsénico en el agua.

A partir de la hidrogeología e hidrogeoquímica de la zona de estudio se confecciona un mapa hidrogeológico que representa las características más relevantes de la zona.



Leyenda

- Unidad Hidroestratigráfica C (UHC)**
Depósitos piroclásticos pleistocenos.
Productividad baja.
- Unidad Hidroestratigráfica B (UHB)**
Intercalación de arenas gruesas y arcillas limosas-arenosas.
Productividad baja a moderada.
- Unidad Hidroestratigráfica A (UHA)**
Gravas y arenas finas con poca arcilla en su matriz.
Intercalaciones de arcillas en profundidad.
Productividad moderada a alta.
- Unidad No Acuífera**
Rocas graníticas y metamórficas Paleozoicas y rocas sedimentarias e intrusivos graníticos Mesozoicos.
Posee permeabilidad secundaria.
Productividad baja.

Simbología

Na	}	Cl
Ca		HCO ₃
Mg		SO ₄

6 3 0 3 6 (meq/L)

Tipo de aguas

- Bicarbonatada Cálctica
- Bicarbonatada Mixta
- Bicarbonatada Sódica
- Clorurada Mixta
- Mixta Mixta

- Pozos Considerados
- Perfil Hidrogeológico
- Isopiezas cada 5 metros
- Ríos Principales

Figura 6.1: Mapa hidrogeológico de la cuenca del río Cauquenes. Fuente: Elaboración propia

BIBLIOGRAFÍA

Abad E. y Cucurella J.(1977). Reconocimiento Geológico de la Cordillera de la Costa entre Curicó y Chillán, con una compilación 1:250.000. Comisión Chilena de Energía Nuclear. Santiago de Chile.

Aguirre, L., Hervé, F., Godoy, E.(1972). Distribution of metamorphic facies in Chile. An outline. Nro. 9, p. 7-19. Chile.

CONAF.(2009). [En línea]. Disponible en: <<http://sit.conaf.cl/>> [Consulta: 4/08/2017]

Custodio E. y Llamas M.(1983). Hidrología subterránea. Tomo 1. Segunda edición. Universidad Politécnica de Barcelona.p.1008-1026. Barcelona, España.

Datta, P.S. y Tyagi., S.K.(1996). Major ion chemistry of groundwater in Delhi area: Chemical weathering processes and groundwater flow regime. Journal of Geological Society of India. p. 179–188. New Delih, India.

Del Campo P. y Pozo A.(1999). Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII región. p.15-36. Chillán, Chile.

Dirección general de aeronáutica civil. (2016). Resumen climático de Chile- 2016. p.5. Santiago de Chile.

DGA.(2010). Levantamiento de Información Hidrogeológica para modelación Cuenca del Río Maule. p.1-193. Santiago de Chile.

DGA.(2011). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Cauquenes.p.1-26. Santiago de Chile.

DGA.(2013). Modelación hidrogeológica de la cuenca del río Cauquenes, Región del Maule.p.1-144. Santiago de Chile.

DGA.(2016). Pronóstico de disponibilidad de Agua 2016-2017. p.7. Santiago de Chile.

DGA.(2017). Declaración de escasez de agua. p.1. Santiago de Chile.

Durov, S.A.(1948). Natural waters and graphic representation of their composition. Dokl.Akad.Nauk SSSR. p.87-90.

Escobar T., Fernando ; Guzmán, Ricardo ; Vieira G., Camilo. (1977). Avance geológico de las hojas Rancagua-Curico, Talca-Linares, Chanco, Concepción-Chillán. USGS, CCHEN, IIG. p. 1-20. Santiago de Chile.

Fetter, C. W.(1988). Hidrogeología Aplicada. Universidad de Wisconsin-Oshkosh. Cuarta edición. p.100. Merrill Publishing. Columbus, Ohio.

Godoy, E.(1970). Estudio petrográfico del granito de Constitución y su aureola de metamorfismo de contacto. Memoria de título. Departamento de Geología. Universidad de Chile. p.140. Santiago de Chile.

Gonzalez-Bonorino, F. (1970). Series metamórficas del basamento cristalino de la Cordillera de la Costa, Chile Central. Universidad de Chile, Departamento de Geología., Publ., No. 37. p.68. Santiago de Chile.

Hervé, F., Munizaga, F., Godoy, E. and Aguirre, L.(1974). Late Paleozoic K/Ar ages of blueschists from Pichilemu, central Chile. Earth and Planetary Science Letters, v. 23, no. 2, p. 261-264.

Hem, J.(1985). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 2254. p.76-144. Alexandria, Estados Unidos..

Hounslow A. (1995). Water Quality Data: Analysis and interpretation. p. 71-117.

Instituto Nacional de Normalización. (2005). Norma chilena oficial NCh 409/1. Agua potable- Parte 1: Requisitos. p.4-7. Santiago de Chile.

Instituto Nacional de Normalización. (1978). Norma chilena oficial NCh 1333/1. Norma chilena sobre requisitos de calidad del agua para distintos usos. p.4-5. Santiago de Chile.

El-Aassy, I. K., El-Feky, M. G., Issa, F. A., Ibrahim, N. M., Desouky, O. A. y Khattab, M. R. (2015). Characterization of groundwater and uranium isotopic ratios ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) in some dugged and drilled wells from southwestern Sinai, Egypt. Water Utility Journal 9. p.24-25.

Krupka, K. y Serne, J.(2002); Geochemical Factors Affecting the Behavior of Antimony, Cobalt, Europium, Technetium, and Uranium in Vadose Sediments. Pacific Northwest National Laboratory. U.S. Department of Energy. p.2.1-2.3.

Lloyd, J. A., and Heathcote, J.A.(1985). Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater: An introduction. p. 296. Universidad de Oxford. Nueva York.

Maldonado, I.(2004). El clima en el área agroecológica del secano interior. p.100-102.

Meybeck, M.(1987). Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. American Journal of Science, 287(5). p. 401–428

Ministerio de vivienda y urbanismo. (2012). Plan regulador intercomunal de Cauquenes, Canco y Pelluhue. p.35-40. Región del Maule, Chile.

Moreno, T.(2015). Recarga artificial de acuíferos en la cuenca del Río Maule: Determinación de sectores favorables y evaluación económica. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. p.29. Universidad de Chile. Santiago de Chile.

Moreno, H., Hervé, F., Godoy, E. y Parada, M.A.(1976). Reconocimiento Geológico del área de Pocillas Cauquenes, VIII Región. Departamento. de Geología, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile. p.3-6. Santiago de Chile.

Lekgowe, O. y Magowe, M.(2009) Folleto Explicativo del Mapa y Atlas Hidrogeológico de la Comunidad para el Desarrollo de África Austral. Asistencia Técnica a la Comunidad para el Desarrollo del África Austral. Unión Europea y GTZ. p. 1-51.

Moreno, H., Varela, J.(1985). Geología, volcanismo y sedimentos piroclásticos cuaternarios de la Región central y sur de Chile. In Suelos volcánicos de Chile. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. p. 493-526. Santiago de Chile.

Muñoz, J. y González, E.(1953). Geología de los Yacimientos de pirofilita de Arrayán en la provincia de Maule. Instituto de Geología, Universidad de Chile. Publicación N° 3, p.26. Santiago de Chile.

Nriagu, J.O.(1989). A global assessment of natural sources of atmospheric trace metals. Nature. 338. p. 47-49

Ovchinnikov, A. M. (1955). General Hydrogeology. Moscow, USSR.

Oregon Drinking Water Services. Sulfur in groundwater. Oregon Government. p.2. [En línea]. Disponible en:
<http://www.oregon.gov/oha/PH/HEALTHYENVIRONMENTS/DRINKINGWATER/SOURCEWATER/Documents/gw/SulfurInGroundwater.pdf> [Consulta: 30/05/2018]

Organización Mundial de la Salud.(2011). Guidelines for Drinkingwater Quality. Cuarta edición. p.314.

Piper, A.M.(1944). A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses. Eos, Transactions American Geophysical Union. p.914-928.

Poehls, D.J., Smith, G.J.(2009). Encyclopedic dictionary of hydrogeology: Amsterdam, Academic Press. p.517.

Salminen, R.(2005). Geochemical Atlas of Europe, Part 1. Background information, Methodology and Maps. Geological Survey of Finland. [En línea] Disponible en: < <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/text/> > [Consulta: 01/02/2017]

Secretaría Nacional de Vivienda y Urbanismo.(2012). Plan regulador intercomunal de Cauquenes, Chanco y Pelluhue. p.35. Región del Maule de Chile.

SERNAGEOMIN.(2002). Mapa geológico de Chile [En línea]. Disponible en: <<http://portalgeo.sernageomin.cl>> [Consulta: 10/08/2017]

Stallard RF, Edmond JM .(1983). Geochemistry of Amazon, the influence of geology and weathering environment on the dissolved load. Journal of Geophysical Research. Vol. 88. p.9671–9688

Struckmeier, W. F. & Margat, J.(1995). Hydrogeological Maps. A Guide and a Standard Legend. International Contributions to Hydrogeology, Founded by Castany, G., Groba, E. & Ronijn, E. International Association of Hydrogeologists. Volume 17. p. 1 – 177.

Thomas A.(2003). Arsenic in midwestern glacial deposits- Occurrence and relation to selected hydrogeologic and geochemical factors. U.S. Geological Survey. p.25-26. Columbus, Ohio.

U.S Global Change Research Program.(2009). Global Climate Change Impacts in the United States. p.2. Washington, DC. USA.

Younger P.(2007). Groundwater in the Environment: an introduction. Universidad de Newcastle. p.77-79. Newcastle Upon Tyne United Kingdom.

ANEXO A: RECOPIACIÓN DE DATOS GEOLÓGICOS

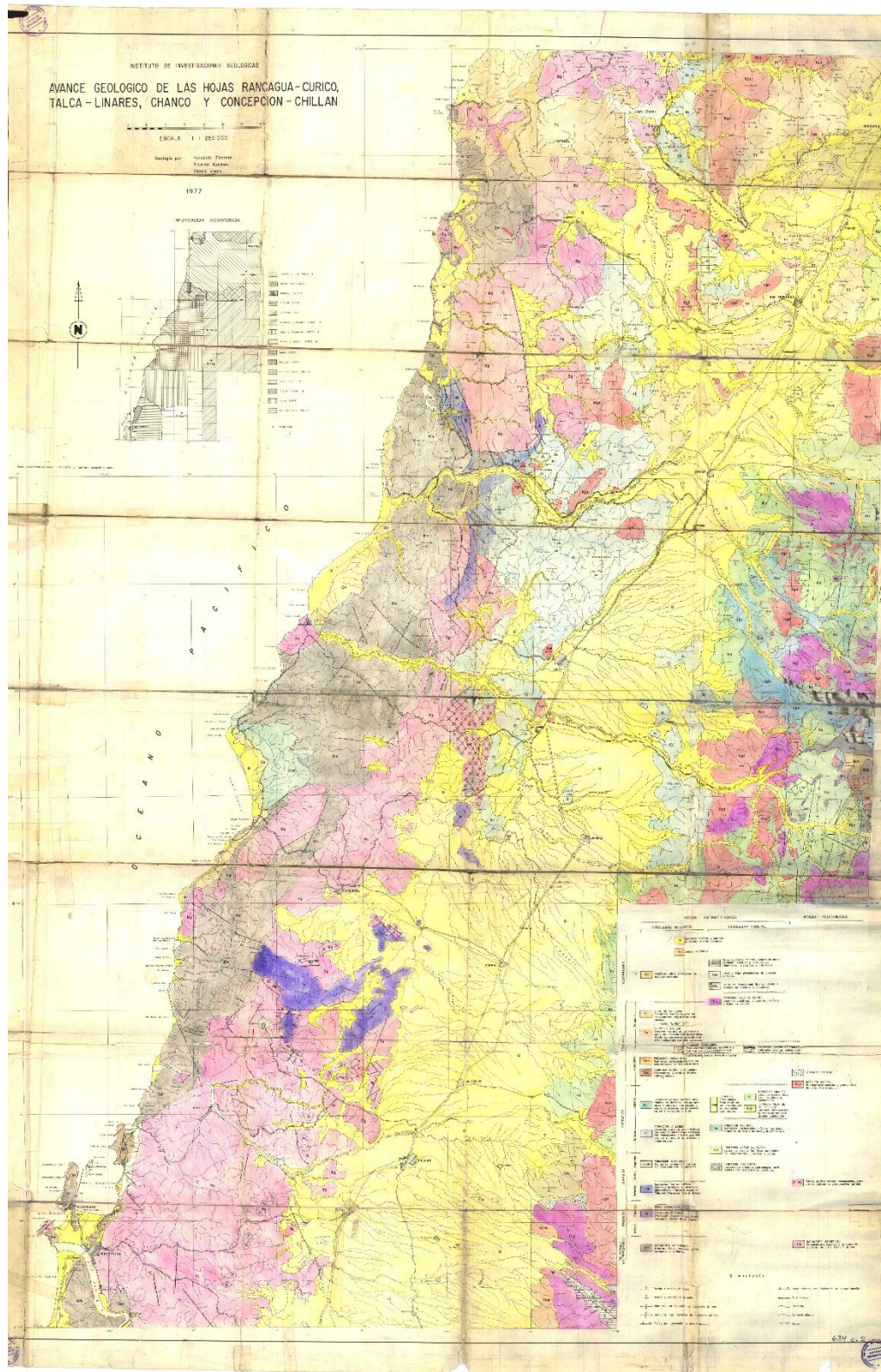


Figura A.1: Avance geológico de las hojas Rancagua-Curico, Talca-Linares, Chanco y Concepción-Chillán..
Elaborado por Escobar et. al, 1977.

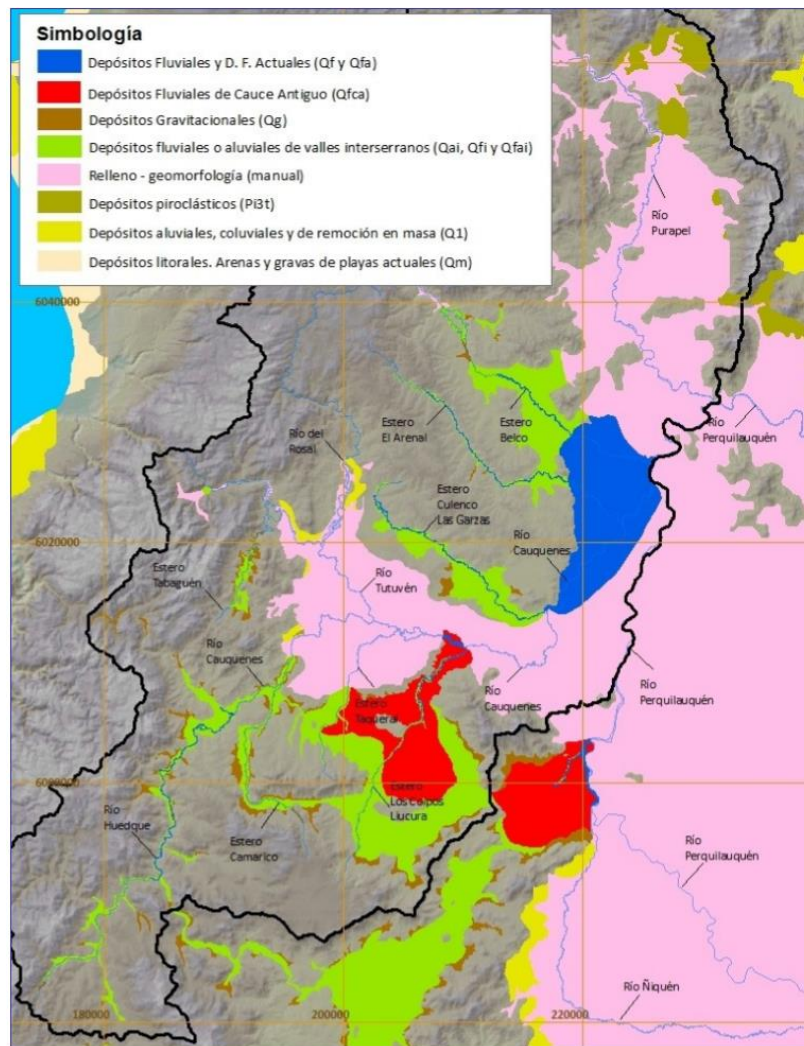


Figura A.2: Mapa de relleno de la cuenca Cauquenes en coordenadas UTM según datum WGS 84 y huso 19S.
Fuente: DGA 2013.

ANEXO B: RECOPIACIÓN DE DATOS GEOFÍSICOS

En el presente anexo se muestra el detalle de los estudios geofísicos en los cuales se sustentó este trabajo. A continuación, se muestra la distribución de estudios elaborados por GCF Ingenieros (2001) que incluyen TEMs y perfiles gravimétricos y por AC Ingenieros Consultores (1999) que incluyen sondajes eléctricos verticales y un perfil de gravedad.

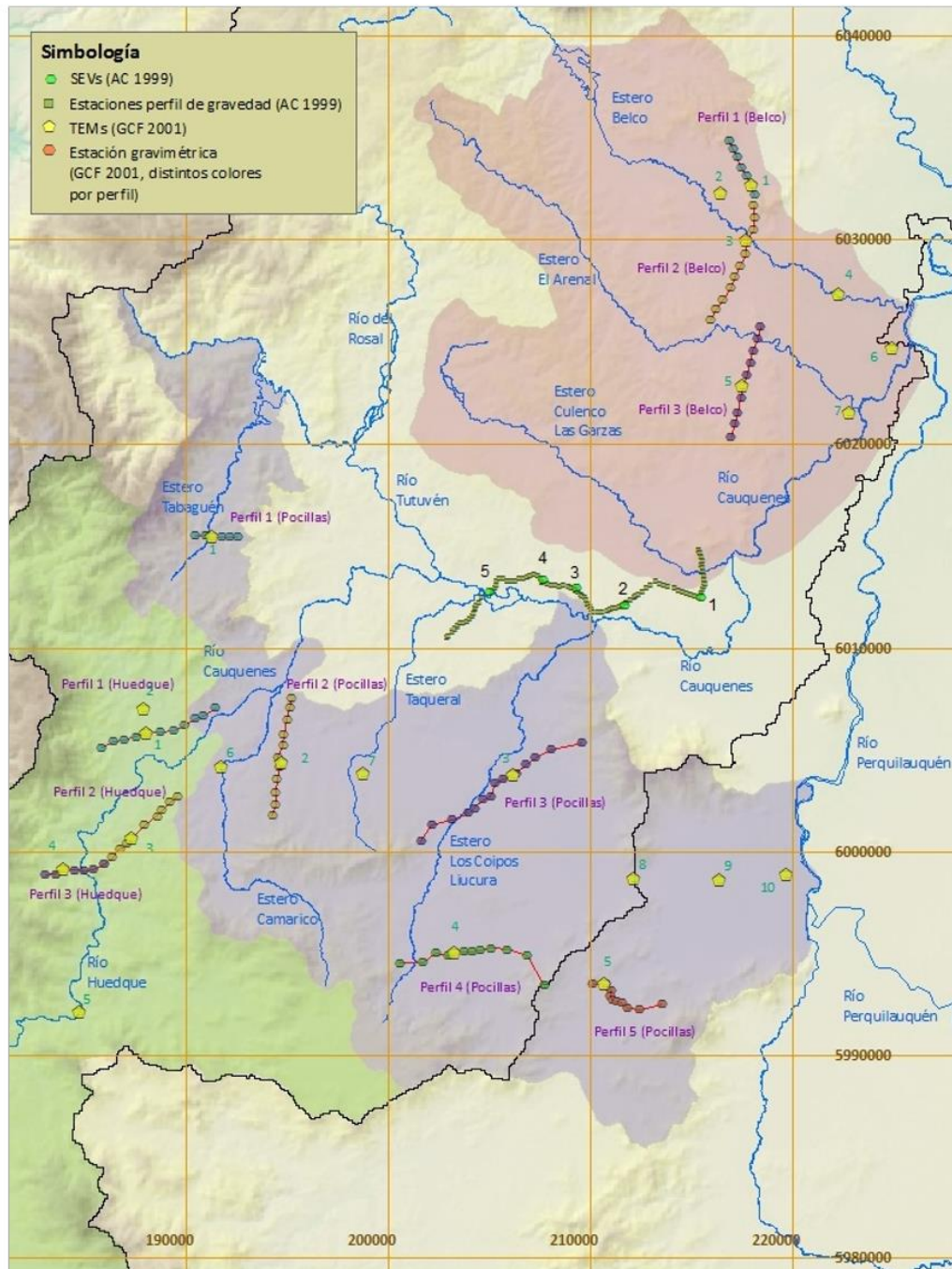


Figura B.1: Distribución de estudios geofísicos anteriores. Coordenadas en UTM, datum WGS 84 y Huso 19S.
Fuente: DGA,2013.

Los resultados obtenidos por AC (1999) corresponden a los siguientes:

Tabla B.1: Resultado de SEVs realizados por AC en 1999. Fuente: DGA 2013.

S.E.V. N°5			S.E.V. N°4			S.E.V. N°3		
Profundidad [m]	Cota [msnm]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]	Profundidad [m]	Cota [msnm]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]	Profundidad [m]	Cota [msnm]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]
0-1	134.7-133.7	175	0-4	136.5-132.5	800	0-2	134.3-132.3	500
1-7	133.7-126.7	90	4-18	132.5-114.5	300	2-7	132.3-125.3	150
7-20	126.7-106.7	128	18-20	114.5-94.5	150	7-25	125.3-100.3	110
20-30	106.7-76.7	120	20-30	94.5-64.5	300	25-40	100.3-60.3	280
30-	76.7-	160	30-	64.5-	600	40-	60.3-	400
S.E.V. N°2			S.E.V. N°1					
Profundidad [m]	Cota [msnm]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]	Profundidad [m]	Cota [msnm]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]			
0-3	148.6-145.6	500	0-3	128.5-125.5	500			
3-5	145.6-140.6	600	3-18	125.5-107.5	300			
5-20	140.6-120.6	300	18-15	107.5-92.5	130			
20-15	120.6-105.6	160	15-	92.5-	500			
15-	105.6-	800						

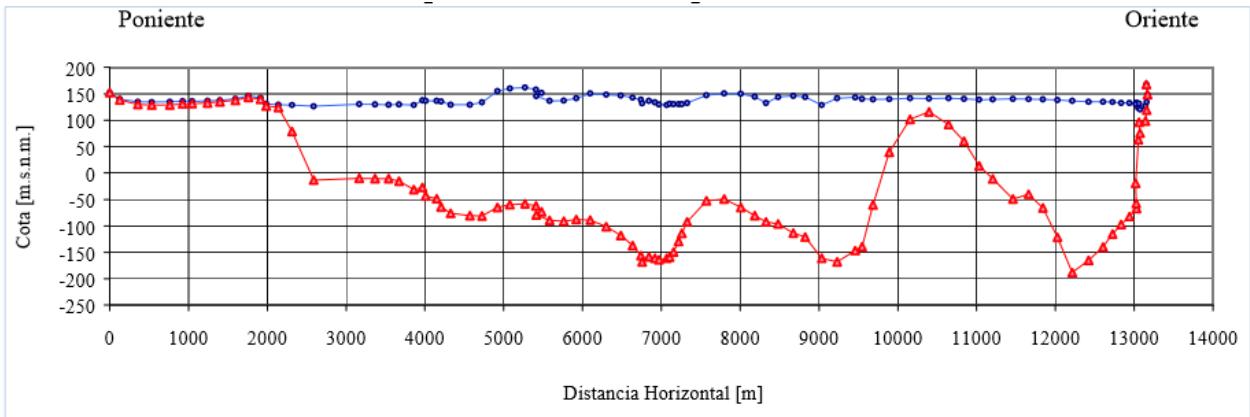


Figura B.2: Perfil de gravedad elaborado por AC ingenieros (1999). Fuente: DGA 2013.

A partir del estudio de GCF ingenieros se obtuvieron los siguientes perfiles:

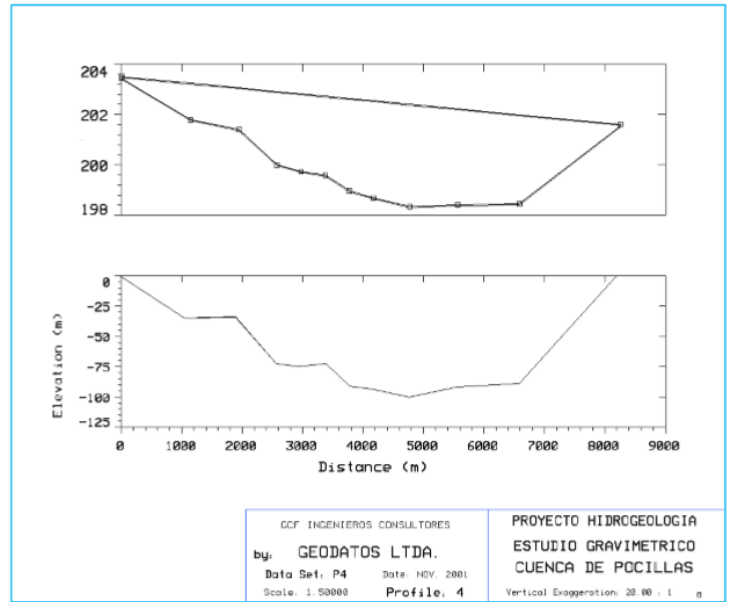
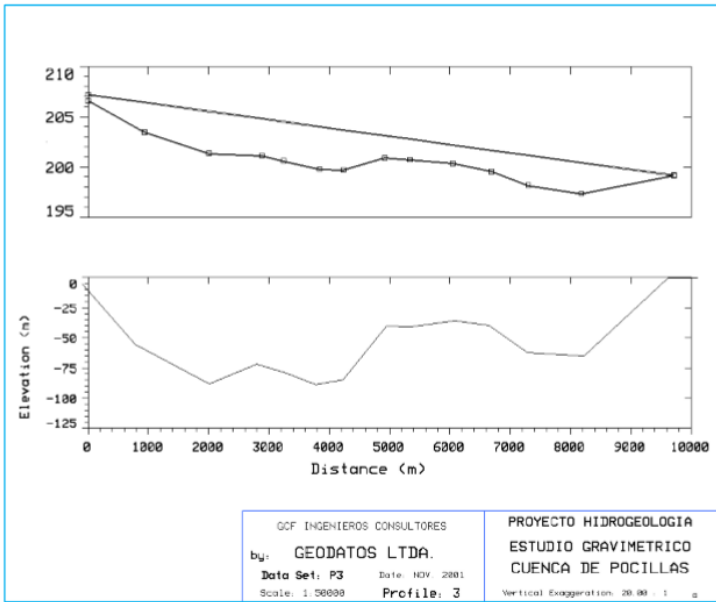
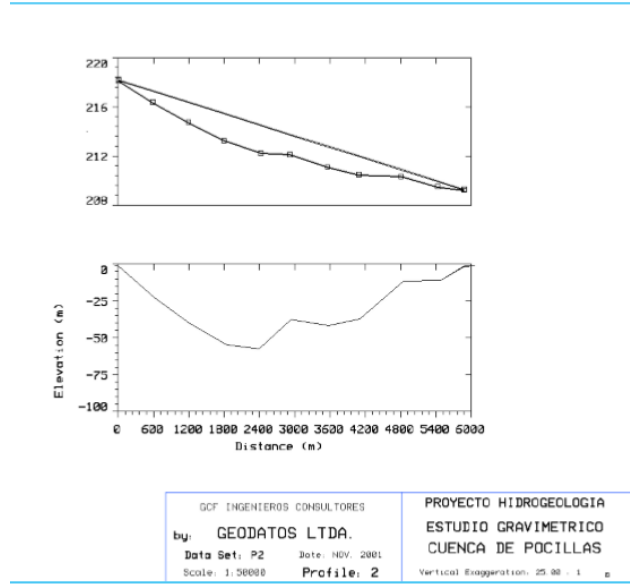
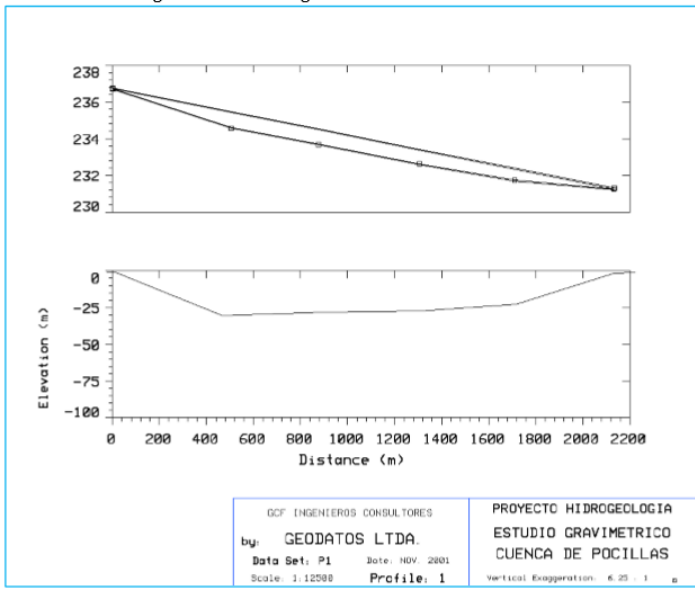


Figura B.3: Perfiles gravimétricos obtenidos por GCF ingenieros. Fuente: DGA 2013.

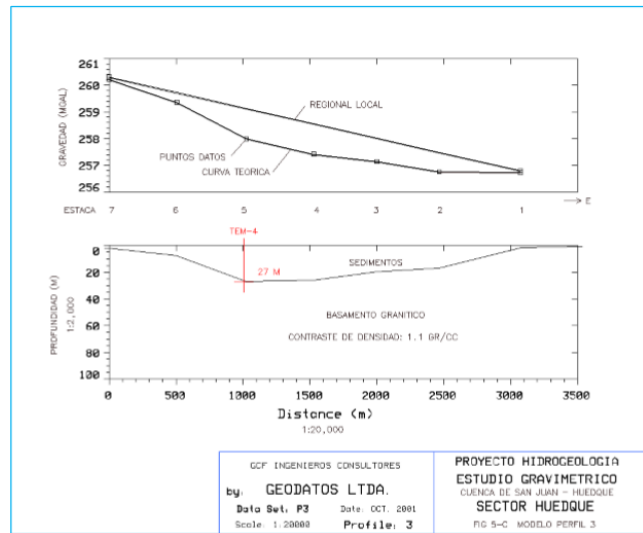
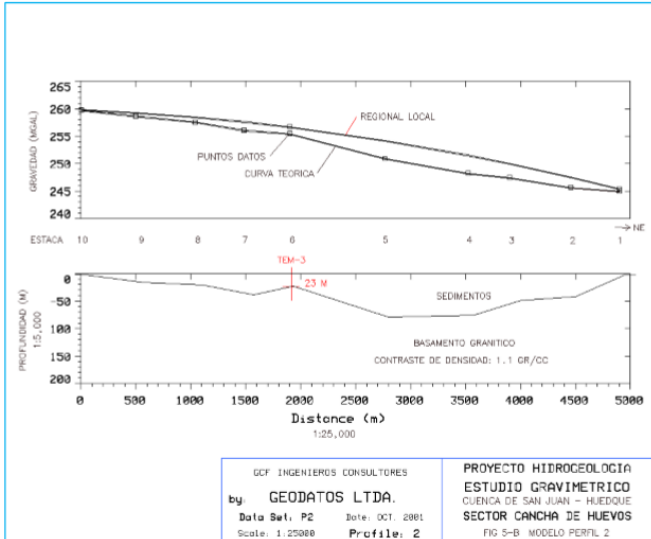
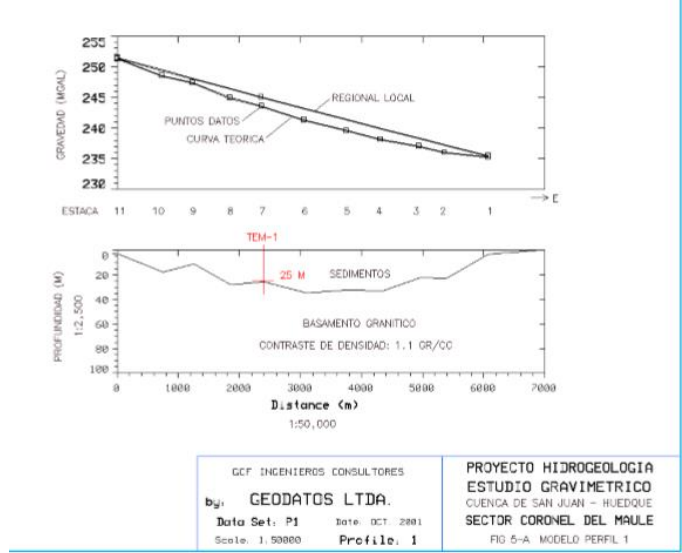
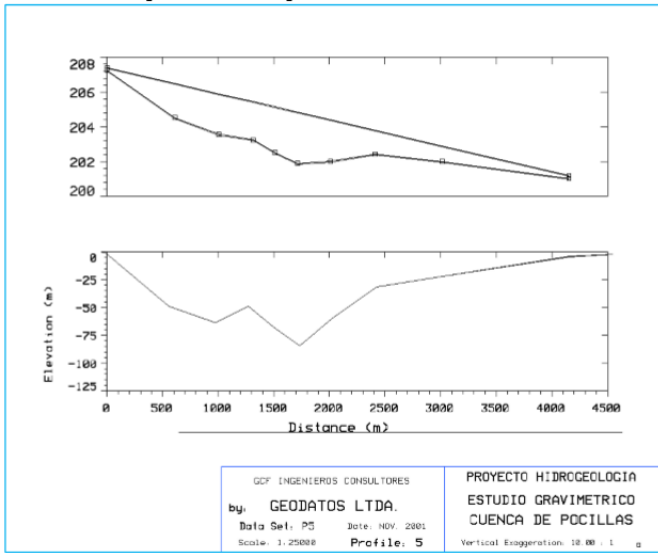


Figura B.4: Perfiles gravimétricos obtenidos por GCF ingenieros. Fuente: DGA 2013.

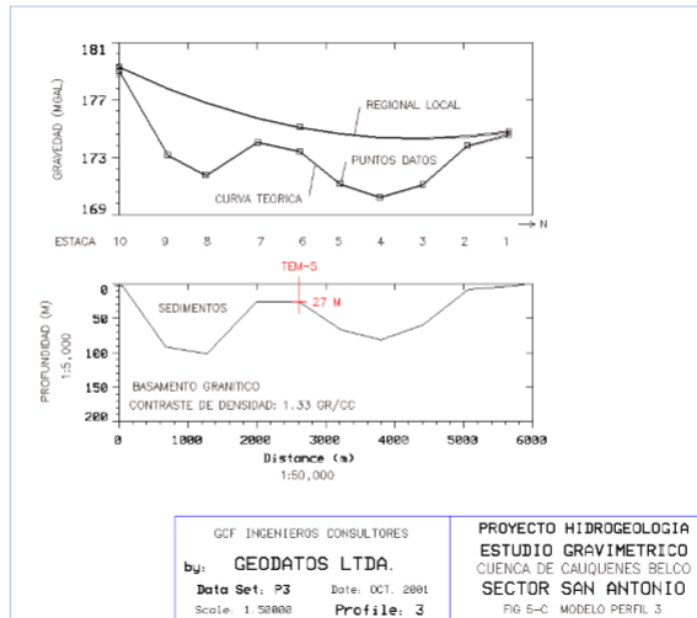
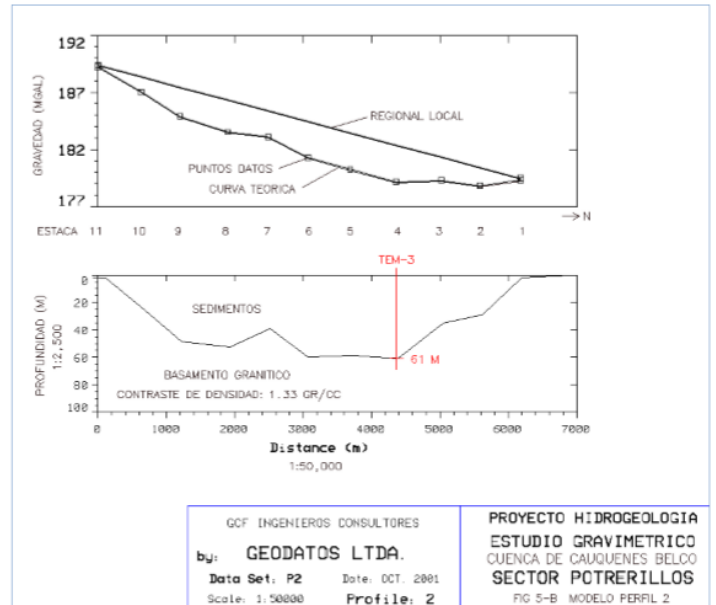
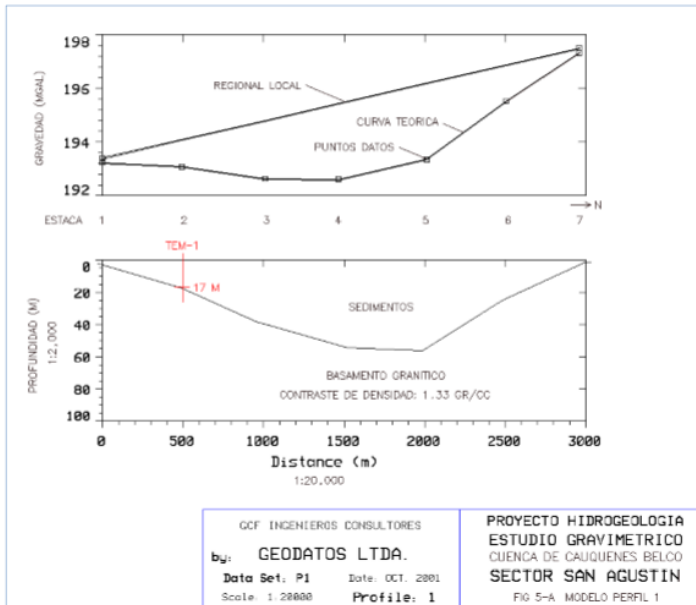


Figura B.5: Perfiles gravimétricos obtenidos por GCF ingenieros. Fuente: DGA 2013.

Tabla B. 2: Resultados TEMs para el sector de Pocillas y San Juan. Fuente: DGA 2013.

Pocillas

TEM	Estrato	Resistividad [Ω -m]	Profundidad m	Descripción
1	1	227	0 – 27	Cubierta seca
	2	1990	27 →	Basamento impermeable
2	1	87	0 – 45	Cubierta seca
	2	3404	45 →	Basamento impermeable
3	1	30	0 – 35	Cubierta, posible acuífero primario
	2	2002	35 →	Basamento impermeable
4	1	319	0 – 45	Cubierta seca
	2	21	45 – 73	Potencial acuífero (primario)
	3	1063	73 →	Basamento impermeable
5	1	37	0 – 50	Cubierta, posible acuífero primario
	2	1837	50 →	Basamento impermeable
6	1	82	0 – 20	Cubierta seca
	2	1832	20 →	Basamento impermeable
7	1	14	0 – 20	Cubierta, posible acuífero secundario
	2	8	20 – 43	Sedimentos finos impermeables
	3	1618	43 →	Basamento impermeable
8	1	29	0 – 88	Cubierta, posible acuífero primario
	2	2232	88 →	Basamento impermeable
9	1	19	0 – 18	Cubierta, posible acuífero secundario
	2	6	18 – 29	Sedimentos finos impermeables
	3	24	29 – 58	Potencial acuífero (primario)
	4	6	58 – 85	Sedimentos finos impermeables
	5	14	85 – 124	Potencial acuífero (secundario)
	6	4	124 – 174	Sedimentos finos impermeables
	7	1074	174 →	Basamento impermeable
10	1	80	0 – 19	Cubierta seca
	2	8	19 – 35	Sedimentos finos impermeables
	3	46	35 – 68	Potencial acuífero (primario)
	4	11	68 – 117	Potencial acuífero (secundario)
	5	1399	117 →	Basamento impermeable

Unidades geoelectricas

Resistividad [Ω -m]	Descripción de la unidad geoelectrica
14 – 320	Ripios, gravas y arenas, con zonas arcillosas (cubierta)
20 – 50	Arenas, gravas, ripios (potencial acuífero primario)
10 – 20	Gravas, arenas, limos (potencial acuífero secundario)
4 – 10	Limos, arcillas, arenas (unidad impermeable)
1000 – 3500	Roca basal granítica (unidad impermeable)

San Juan

TEM	Estrato	Resistividad [Ω -m]	Profundidad m	Descripción
1	1	51	0 – 25	Cubierta seca
	2	2042	25 →	Basamento granítico
2	1	70	0 – 21	Cubierta seca
	2	1720	21 →	Basamento granítico
3	1	50	0 – 23	Cubierta seca
	2	2200	23 →	Basamento granítico
4	1	73	0 – 27	Cubierta seca
	2	1064	27 →	Basamento granítico
5	1	180	0 – 18	Cubierta seca
	2	1020	18 →	Basamento granítico

No se observan estratos acuíferos; basamento somero.

Unidades geoelectricas

Resistividad [Ω -m]	Descripción de la unidad geoelectrica
50 – 180	Ripios, gravas y arenas (sedimentos secos)
1000 – 2200	Roca basal granítica (unidad impermeable)

Tabla B.3: Resultados TEMs para el sector de Cauquenes-Belco. Fuente: DGA 2013.

Cauquenes-Belco

TEM	Estrato	Resistividad [Ω -m]	Profundidad m	Descripción
1	1	42	0 – 9	Cubierta seca
	2	17	9 – 17	Potencial acuifero (secundario)
	3	1273	17 →	Basamento granítico
2	1	45	0 – 7	Cubierta seca
	2	23	7 – 15	Potencial acuifero (primario)
	3	1916	15 →	Basamento granítico
3	1	88	0 – 22	Cubierta seca
	2	7	22 – 61	Sedimentos finos (impermeables)
	3	2044	61 →	Basamento granítico
4	1	55	0 – 25	Cubierta seca
	2	9	25 – 52	Sedimentos finos (impermeables)
	3	6	52 – 103	Sedimentos finos (impermeables)
	4	1195	103 →	Basamento granítico
5	1	64	0 – 27	Cubierta seca
	2	1248	27 →	Basamento granítico
6	1	227	0 – 6	Cubierta seca
	2	2	6 – 9	Sedimentos finos (impermeables)
	3	28	9 – 18	Potencial acuifero (primario)
	4	7	18 – 50	Sedimentos finos (impermeables)
	5	1092	50 →	Basamento granítico
7	1	99	0 – 12	Cubierta seca
	2	18	12 – 103	Potencial acuifero (secundario)
	3	1026	103 →	Basamento granítico

Unidades geoelectricas

Resistividad [Ω -m]	Descripción de la unidad geoelectrica
40 – 230	Ripios, gravas y arenas (sedimentos secos)
20 – 40	Arenas, gravas, ripios (potencial acuifero primario)
10 – 20	Gravas, arenas, limos (potencial acuifero secundario)
2 – 10	Limos, arcillas, arenas (unidad de baja permeabilidad)
1000 – 2100	Roca basal granítica (unidad impermeable)

Por otra parte, la DGA (2013) mediante gravimetría definió el basamento que se observa en la Figura 4.1. La distribución de la gravimetría se muestra a continuación.

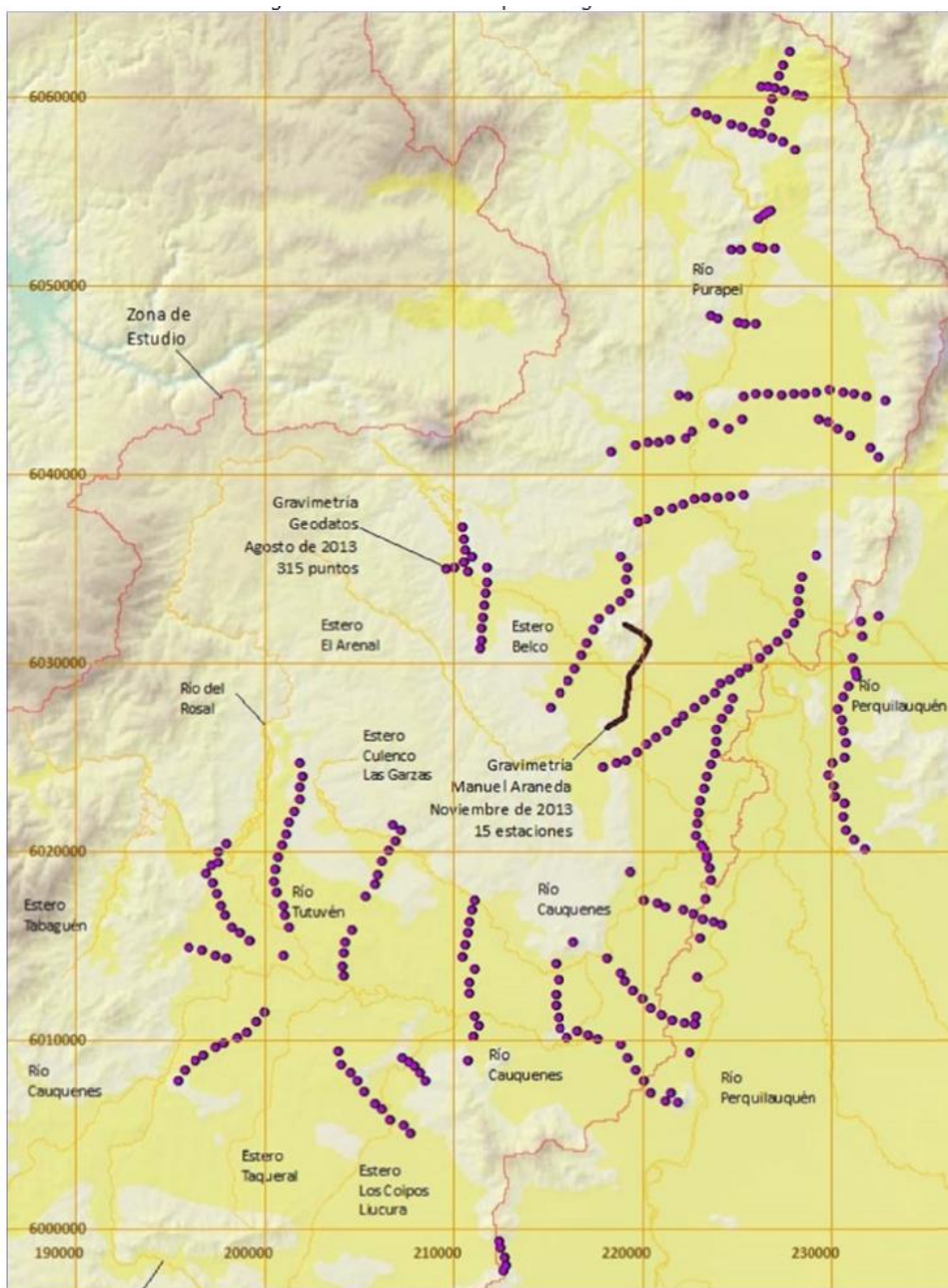


Figura B.6: Distribución de perfiles gravimétricos elaborados por la DGA. Fuente: DGA,2013.

ANEXO C: MEDICIÓN DE NIVELES FREÁTICOS

Tabla C.1: Niveles freáticos medidos en las 3 campañas de terreno.

Fecha	Cordenada Este	Cordenada Norte	Profundidad del Nivel freático (m)
24-02-2017	199575	6001916	7,65
25-02-2017	201614	6002292	7,78
27-02-2017	209551	6015252	18,32
31-08-2017	201872	6024007	12,311
31-08-2017	201062	6016892	14,236
31-08-2017	206942	6020371	2,004
01-09-2017	203471	6010096	2,603
01-09-2017	203499	6010037	0,375
02-09-2017	203789	5994193	5,495
02-09-2017	203778	5994201	0,46
02-09-2017	190997	6000084	1,13
02-09-2017	181433	5981162	0,32
03-09-2017	212688	6010234	7,88
03-09-2017	223449	6017697	9,665
03-09-2017	220682	6017477	6,25
03-09-2017	218267	6012646	0,57
04-09-2017	200519	6006706	0,825
04-09-2017	206525	6009999	10,62
28-11-2017	197314	6014572	7,25
28-11-2017	209269	6015117	18,56
29-11-2017	205441	6001175	7,41
29-11-2017	205499	6001212	6,73
29-11-2017	211908	6002320	0,2
29-11-2017	210212	6002004	2,17
29-11-2017	210474	6001998	15,78
30-11-2017	215148	6027907	16,63
01-12-2017	224317	6024459	10,14

ANEXO D: CATASTRO DE POZOS CON ESTRATIGRAFÍA

Tabla D.1: Pozos catastrados utilizados para la construcción del modelo 3D y elaboración de perfiles estratigráficos.

Pozo	Norte	Este
ND 0704-1163 Pozo A	6013602	191861
ND 0704-1163 Pozo B	6013391	191854
ND- 0704-1902 Pozo 1	6030137	221010
ND- 0704-1902 Pozo 2	6030251	220884
ND- 0704-1902 Pozo 3	6030287	220826
ND-0704-1006	6017090	200967
ND-0704-1372	6015512	210795
ND-0704-1375	6023023	208906
ND-0704-1391 Pozo 1	6016972	208924
ND-0704-1391 Pozo 2	6016755	209229
ND-0704-1427	6009443	205741
ND-0704-1438	6013868	214922
ND-0704-1668	6024098	224632
ND-0704-1671	6025751	220159
ND-0704-1676	6012740	215114
ND-0704-1681	6024634	223324
ND-0704-1696	6012530	217322
ND-0704-1697	6015511	209400
ND-0704-1698	6007389	217843
ND-0704-1713 pozo A	6012871	206573
ND-0704-1713 pozo B	6039828	204916
ND-0704-1728	6024355	220913
ND-0704-1735 Pozo 3	6013465	211170
ND-0704-1735 Pozo 5	6013674	211270
ND-0704-1745	6013054	217302
ND-0704-1751 Pozo 1	6018518	219994
ND-0704-1751 Pozo 2	6018734	220345
ND-0704-1751 Pozo 3	6018864	220787
ND-0704-1751 Pozo 4	6019588	222489
ND-0704-1751 Pozo 5	6020410	222439
ND-0704-1752	6002604	196487
ND-0704-1753 Pozo 1	6002604	196459
ND-0704-1753 Pozo 2	6003007	196495
ND-0704-1754	6016127	209581
ND-0704-1758 Pozo 1	6029170	220419
ND-0704-1758 Pozo 2	6029146	220605
ND-0704-1760	6010655	212944
ND-0704-1765	6024355	220913

Pozo	Norte	Este
ND-0704-1783	5998602	209592
ND-0704-1784	6012672	206530
ND-0704-1785	6015750	206618
ND-0704-1788	6007615	217484
ND-0704-1794	6009100	216716
ND-0704-1797	6008148	216980
ND-0704-1799	6023507	201977
ND-0704-1800	6004743	196661
ND-0704-1802	6006422	201748
ND-0704-1808	6014824	192332
ND-0704-1812 Pozo 2	6013530	217278
ND-0704-1814	6012205	205702
ND-0704-1815	6007813	216961
ND-0704-1816	6013079	206566
ND-0704-1817	6002011	210279
ND-0704-1818	6014387	192108
ND-0704-1822	6012838	217770
ND-0704-1825	6012997	208794
ND-0704-1828	6014108	215589
ND-0704-1832	6010340	202837
ND-0704-1834	6014114	213176
ND-0704-1837	6016092	204306
ND-0704-1851	6001649	203189
ND-0704-1851 Pozo 1	6009685	196584
ND-0704-1851 Pozo 2	6009592	196596
ND-0704-1851 Pozo 2	6009592	196596
ND-0704-1851 Pozo 3	6009729	196594
ND-0704-1851 Pozo 3	6009729	196594
ND-0704-1854 Pozo 1	6009679	196582
ND-0704-1854 Pozo 2	6009588	196594
ND-0704-1854 Pozo 3	6009726	196597
ND-0704-1864	6027631	221312
ND-0704-1886	6012998	208766
ND-0704-1888	6023926	220101
ND-0704-1898	6024666	219570
ND-0704-708	6016741	209243
ND-0801-6302	5991916	184597
ND-0801-6303	5991948	185136
ND-0801-6304	5990503	185688

ANEXO E: CÁLCULO DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Tabla E.1: Cálculos de conductividad hidráulica y transmisividad.

Pozo	Caudal Q (l/s)	Radio del pozo (m)	Transmisividad T (m ² /día)	Coefficiente de Almacenamiento S	Nivel freático (m)	Profundidad pozo (m)	Espesor saturado del acuífero (m)	K (m/día)	Tipo de acuífero
ND-0704-1006	5,04	0,1016	376	1,00E-07	5,86	30	24,14	15,58	Libre
ND-0704-1837	2,3	0,0508	29	6,42E-03	9,53	26,4	16,87	1,72	Semiconfinado
ND-0704-1785	8	0,1778	12,9	1,44E-01	2,3	91	66	0,20	Semiconfinado
ND-0704-1735 pozo 5	4,5	0,1524	23,6	1,14E-05	13,1	42	27,9	0,85	Libre
ND-0704-1676	35,1	0,1016	676	1,00E-07	14,35	61	46,65	14,49	Semiconfinado
ND-0704-1822	85	0,127	341	8,00E-02	0,3	91	90,7	3,76	Semiconfinado
ND-0704-1728	55	0,127	173	4,50E-02	10,7	60	49,3	3,51	Libre
ND-0704-1668	52	0,127	223	2,33E-02	1,9	60	58,1	3,84	Libre
ND-0704-1800	9	0,127	6,2	6,93E-01	7,25	55	47,75	0,13	Semiconfinado
ND-0704-1851	2,8	0,2032	1,17	1,76E-01	4	90	86	0,01	Semiconfinado
ND-0704-1817	1	0,0635	1,04	1,29E-01	2,2	21	11	0,09	Semiconfinado
ND-0704-1815	49	0,1016	159	3,71E-02	8,12	87	78,88	2,02	Semiconfinado
ND-0704-1696	65	0,1016	168	9,90E-01	7,72	50	42,28	3,97	Semiconfinado
ND-0704-1822	85	0,127	341	4,84E-01	0,3	91	90,7	3,76	Semiconfinado
ND-0704-1812 Pozo2	47	0,127	75,9	0,99	3,43	72	68,57	1,11	Semiconfinado
ND-0704-1751 Pozo1	60	0,127	251	9,90E-01	6,5	60	53,5	4,69	Semiconfinado
ND-0704-1671	43	0,127	229	2,86E-03	12,5	57	44,5	5,15	Semiconfinado
ND-0704-1758	12	0,0762	183	9,90E-01	5,76	40	32,24	5,68	Libre

ANEXO F: QUÍMICA DE LAS AGUAS

En el presente anexo se muestran los resultados de los parámetros medidos in situ y de los análisis químicos de las muestras. Las coordenadas se encuentran en UTM en el huso 19S (WGS 84).

Tabla F.1: Resultado análisis químicos de las muestras de agua. Muestras 001 a 023.

Código	PCA-001	PCA-002	PCA-003	PCA-004	PCA-005	PCA-006	PCA-015	PCA-016	PCA-017	PCA-018	PCA-019	PCA-023
Coordenada Este	192109	199574	201614	208578	221051	221924	209551	223312	223070	222803	223238	201062
Coordenada Norte	6014401	6001916	6002292	6002590	5996111	6008037	6015252	6020129	6024118	6023898	6023780	6016891
Fecha	24-02-2017	24-02-2017	25-02-2017	25-02-2017	25-02-2017	26-02-2017	27-02-2017	27-02-2017	27-02-2017	27-02-2017	27-02-2017	15-03-2017
Ph In situ	6.88	7.31	8.11	6.54	8.25	7.42	7.19	8.02	7.72	7.45	7.01	7.58
Conductividad in situ [μ S/cm]	221	251	249	129	132	575	405	320	448	485	733	405
Temperatura in situ (°C)		20.7	21.3	21.1	27.1	24.9	22.3	27.8	21.4	20.9	19.5	
pH	7.11	7.31	7.67	6.74	7.59	7.79	8.16	8.08	8.24	8.28	8.4	6.68
Conductividad [μ S/cm]	235	240	216	115	134	657	418	333	478	517	787	248
Carbonatos (CO ₃ ²⁻) [mg/L]	0	0	0	0	0	0	0	0	2.3	4.1	12	0
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻) [mg/L]	134	89	113	46	79	318	165	130	169	199	280	97
Fluor [mg/L]	0.25	0.35	0.21	0.05	0.08	0.45	0.17	0.28	0.37	0.4	0.37	0.16
Ca [mg/L]	26	14	33	8.5	14	58	25	18	24	27	47	22
Mg [mg/L]	6	6.5	2.9	4	5	29	12	10	10	13	25	8.5
Na [mg/L]	17	26	8.5	8.5	9	47	48	35	65	66	91	16
K [mg/L]	0.38	0.37	1.2	1.2	1	3.2	2.9	8.5	4.6	5.3	7.5	1.1
Li [mg/L]	0.02	0.02	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.02	0.02	0.02	0.04
Sulfatos [mg/L]	4.9	3.6	15	BDL	2.8	17	3.7	14	1.9	4.5	10	4.6
Cloruros [mg/L]	9.7	32	5.5	8.4	3.8	35	56	33	71	68	90	15
Nitratos [mg/L]	BDL	BDL	BDL	8.8	3	20.02	BDL	BDL	BDL	BDL	25	19
Alcalinidad total	110	73	92	37	64	261	135	107	142	169	249	

Código	PCA-001	PCA-002	PCA-003	PCA-004	PCA-005	PCA-006	PCA-015	PCA-016	PCA-017	PCA-018	PCA-019	PCA-023
Dureza total	90	62	93	38	54	263	112	85	100	121	219	
Dureza carbonatosa	90	62	93	38	54	263	112	85	100	121	219	
Dureza no carbonatosa	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	
Suma sólidos disueltos [mg/l]	130	128	122	63	74	365	229	182	251	289	445	
Sólidos disueltos por evaporación a 103°C	138	136	129	66	78	386	242	193	276	305	470	
Aluminio [mg/L]	BDL	BDL	0.087	BDL	0.036	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Antimonio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Arsénico [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.06	0.011	BDL	0.01	0.006	0.008	BDL
Bario [mg/L]	0.014	0.02	0.032	0.016	0.018	0.027	0.061	0.045	0.032	0.028	0.008	0.031
Berilio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Boro [mg/L]	0.29	0.25	0.22	0.18	0.17	0.17	0.08	0.07	0.098	0.09	0.089	BDL
Cadmio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cobalto [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cobre [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.012	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cromo [mg/L]	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	BDL	0.001	0.001
Estaño [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Fosforo [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.065	BDL	0.069	0.059	0.052	0.14
Hierro [mg/L]	BDL	0.01	0.13	0.015	0.057	0.012	0.11	0.072	0.12	0.016	BDL	0.023
Manganeso [mg/L]	BDL	BDL	0.19	BDL	BDL	0.004	0.33	0.046	0.24	0.21	BDL	0.003
Molibdeno [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Plata [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Plomo [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Selenio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.007
Vanadio [mg/L]	BDL	0.006	0.007	0.004	0.003	0.011	BDL	BDL	BDL	0.004	0.014	BDL
Zinc [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0.019	0.057	BDL	BDL	BDL	0.024	BDL
Mercurio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL

Tabla F.2: Resultado análisis químicos de las muestras de agua. Muestras 024 a 034.

Código	PCA-024	PCA-0025	PCA-026	PCA-027	PCA-028	PCA-029	PCA-030	PCA-031	PCA-032	PCA-033	PCA-034
Coordenada Este	223238	223294	209551	201872	201137	201062	206942	211083	212937	195794	187145
Coordenada Norte	6023780	6020192	6015252	6024007	6029714	6016892	6020371	6029947	6037360	6011921	6004037
Fecha	30-08-2017	30-08-2017	30-08-2017	31-08-2017	31-08-2017	31-08-2017	31-08-2017	31-08-2017	31-08-2017	01-09-2017	01-09-2017
Ph In situ	7,09	7,62	6,83	7,32	6,36	7,13	7,33	6,86	6,09	8,13	6,53
Conductividad in situ [μ S/cm]	581	74	345	240	105	469	369	191	170	82	184
Temperatura in situ (°C)	17,7	14,1	17,6	15,9	14,9	18,7	18,6	16,1	17,1	10,7	15,9
pH	7,31	6,67	6,97	6,5	6,11	7,02	7,08	6,6	6,4	6,7	6,68
Conductividad [μ S/cm]	681	72	380	279	116	567	439	225	181	68	188
Carbonatos (CO ₃ ²⁻) [mg/L]											
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻) [mg/L]	241	31	172	50	33	127	117	52	45	29	89
Fluor [mg/L]	0,43	0,04	0,16	0,07	0,04	0,11	0,32	0,05	0,04	0,04	0,1
Ca [mg/L]	39	4,8	22	14	9	37	25	19	16	4	17
Mg [mg/L]	22	2,2	11	5	3	18	8	5,5	5	2,2	5
Na [mg/L]	65	5,3	37	28	9,2	39	46	14	9,7	5,3	11
K [mg/L]	6,7	1,2	4,3	1,8	0,25	15	1,1	0,45	2	0,5	0,64
Li [mg/L]	0,02	BDL	BDL	BDL	0,02	0,02	BDL	0,02	BDL	BDL	BDL
Sulfatos [mg/L]	7,2	1,9	3,6	BDL	4,1	65	3,4	7,2	9,3	5,6	3
Cloruros [mg/L]	91	4,8	42	34	4	57	85	13	13	5,8	11
Nitratos [mg/L]	17	1,1	BDL	53	21	47	BDL	47	24	BDL	8,6
Alcalinidad total	198	25	141	41	27	104	96	43	37	24	73
Dureza total	184	21	98	55	35	165	95	70	60	19	63
Dureza carbonatosa	184	21	98	41	27	104	96	43	37	19	63
Dureza no carbonatosa	BDL	BDL	BDL	14	7	61	BDL	27	23	BDL	BDL

Código	PCA-024	PCA-0025	PCA-026	PCA-027	PCA-028	PCA-029	PCA-030	PCA-031	PCA-032	PCA-033	PCA-034
Suma sólidos disueltos [mg/l]	366	37	205	161	67	340	226	132	101	38	101
Sólidos disueltos por evaporación a 103°C	387	39	217	170	71	359	239	139	107	41	107
Aluminio [mg/L]	BDL	0,13	0,02	BDL	0,0755	BDL	BDL	0,045	0,031	0,056	BDL
Antimonio [mg/L]	0,11	0,026	0,11	0,033	BDL	0,37	0,068	0,062	0,045	0,17	0,057
Arsénico [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Bario [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Berilio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Boro [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cadmio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cobalto [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cobre [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0,012	BDL	BDL
Cromo [mg/L]	0,007	0,004	0,003	0,003	0,002	0,007	0,003	0,003	0,006	0,003	0,005
Estaño [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Fosforo [mg/L]	0,11	BDL	0,11	BDL	BDL	0,37	0,07	0,062	BDL	0,17	0,057
Hierro [mg/L]	0,04	0,19	0,18	0,019	0,062	0,035	0,032	0,053	0,08	0,16	0,037
Manganeso [mg/L]	BDL	0,015	0,32	BDL	BDL	BDL	0,004	BDL	0,003	0,017	BDL
Molibdeno [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Plata [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Plomo [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Selenio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Vanadio [mg/L]	0,017	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Zinc [mg/L]	0,04	BDL	BDL	0,038	0,011	BDL	BDL	0,03	0,051	BDL	BDL
Mercurio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL

Tabla F.3: Resultado análisis químicos de las muestras de agua. Muestras 035 a 045.

Código	PCA-035	PCA-036	PCA-0037	PCA-038	PCA-039	PCA-040	PCA-041	PCA-042	PCA-043	PCA-044	PCA-045
Coordenada Este	191485	196368	203465	203471	200121	203666	203789	190997	181509	210139	212709
Coordenada Norte	6004257	6008909	6010039	6010096	5998051	5994971	5994193	6000084	5981140	6010187	6010274
Fecha	01-09-2017	01-09-2017	01-09-2017	01-09-2017	02-09-2017	02-09-2017	02-09-2017	02-09-2017	02-09-2017	03-09-2017	03-09-2017
Ph In situ	6,81	7,2	6,18	5,98	7,4	7,4	7,3	6,08	6,8	7,13	7,35
Conductividad in situ [µS/cm]	316	104	489	202	250	113	200	181	223	124	393
Temperatura in situ (°C)	12,3	12,6	13,2	13,2	17,4	10,6	18,2	13,3	15,9	11,3	16,9
pH	6,93	6,79	6,44	6,29	7,22	6,61	7,35	6,45	6,66	6,05	6,93
Conductividad [µS/cm]	319	76	527	185	238	105	220	213	273	139	478
Carbonatos (CO32-) [mg/L]											6,4
Bicarbonatos (HCO3-) [mg/L]	49	35	38	38	101	28	114	58	54	46	196
Fluor [mg/L]	0,05	0,15	BDL	0,04	0,16	0,24	0,16	0,1	BDL	0,06	0,19
Ca [mg/L]	20	4,5	29	13	14	2,7	17	18	28	7	29
Mg [mg/L]	8	1	11	5,5	6,5	2	8,3	4	5,5	3,8	13
Na [mg/L]	21	8,9	44	9,9	22	13	15	17	14	12	46
K [mg/L]	8,3	0,13	13	4,7	2	0,48	0,32	0,33	0,86	0,16	1,4
Li [mg/L]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Sulfatos [mg/L]	8,3	BDL	57	3,7	5,3	2,1	2,1	38	6,1	1,1	11
Cloruros [mg/L]	37	3,3	37	13	23	13	16	6,9	15	9	54
Nitratos [mg/L]	62	5,8	130	40	2,1	5,9	BDL	7,9	75	22	6,6
Alcalinidad total	40	29	31	31	83	23	94	48	44	38	161
Dureza total	83	15	118	54	60	15	75	61	91	33	126
Dureza carbonatosa	40	15	31	31	60	15	75	48	44	33	126
Dureza no carbonatosa	43	BDL	87	23	BDL	BDL	BDL	14	47	BDL	BDL

Código	PCA-035	PCA-036	PCA-0037	PCA-038	PCA-039	PCA-040	PCA-041	PCA-042	PCA-043	PCA-044	PCA-045
Suma sólidos disueltos [mg/l]	189	41	339	107	125	53	115	120	171	78	259
Sólidos disueltos por evaporación a 103°C	199	43	358	113	132	56	121	127	180	82	273
Aluminio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	0,37	BDL	BDL	BDL	0,051	BDL	0,067	0,03
Antimonio [mg/L]	BDL	0,17	0,039	0,11	0,12	0,23	BDL	0,047	BDL	0,02	BDL
Arsénico [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Bario [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Berilio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Boro [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cadmio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cobalto [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cobre [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cromo [mg/L]	0,003	0,002	0,004	0,007	0,002	0,003	0,002	0,004	0,006	0,003	0,008
Estaño [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Fosforo [mg/L]	BDL	0,17	BDL	0,11	0,12	0,23	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Hierro [mg/L]	0,028	0,022	0,043	0,29	0,027	0,031	0,18	0,092	0,049	0,087	0,59
Manganeso [mg/L]	BDL	BDL	BDL	0,101	0,003	BDL	0,044	0,031	0,003	0,004	0,196
Molibdeno [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Plata [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Plomo [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Selenio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Vanadio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	0,007	BDL	0,006	BDL	BDL	BDL
Zinc [mg/L]	0,042	BDL	0,017	0,023	0,026	0,015	BDL	BDL	0,016	0,57	0,011
Mercurio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL

Tabla F.4: Resultado análisis químicos de las muestras de agua. Muestras 046 a 056.

Código	PCA-046	PCA-047	PCA-048	PCA-049	PCA-050	PCA-051	PCA-052	PCA-053	PCA-054	PCA-055	PCA-056
Coordenada Este	212688	213824	215661	223918	221926	223449	220682	218267	206037	206390	200519
Coordenada Norte	6010234	6005696	6006114	6005526	6008037	6017697	6017477	6012646	6011465	6010015	6006706
Fecha	03-09-2017	03-09-2017	03-09-2017	03-09-2017	03-09-2017	03-09-2017	03-09-2017	03-09-2017	04-09-2017	04-09-2017	04-09-2017
Ph In situ	8,65	6,6	7,52	7,74	7,03	7,62	6,93	6,65	8,34	7,79	7,71
Conductividad in situ [μS/cm]	552	344	314	185	425	724	191	172	257	331	281
Temperatura in situ (°C)	16	11,3	15	17	15,5	14,7	16,8	16,1	13,7	13	17
pH	8,42	6,97	6,99	7,43	7,92	8,17	7,58	7,16	7,65	7,31	7
Conductividad [μS/cm]	683	415	388	222	500	890	232	201	307	406	340
Carbonatos (CO ₃ ²⁻) [mg/L]											
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻) [mg/L]	247	254	255	132	236	358	135	104	152	196	104
Fluor [mg/L]	0,32	0,12	0,08	0,17	0,36	0,13	0,05	0,04	0,26	0,4	0,14
Ca [mg/L]	45	41	38	14	53	55	24	15	22	37	30
Mg [mg/L]	16	20	18	8,5	22	27	7,5	10	6	14	7
Na [mg/L]	70	20	20	19	23	85	12	11	26	25	24
K [mg/L]	3,2	0,87	0,21	1,4	5,9	6,8	3,2	1,8	2	0,44	1,9
Li [mg/L]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Sulfatos [mg/L]	14	15	3,2	1,3	11	36	4,7	BDL	2,7	8,1	33
Cloruros [mg/L]	79	11	7,7	0,2	18	63	5,2	6,5	27	20	29
Nitratos [mg/L]	14	BDL	4,8	BDL	53	94	4,9	15	BDL	30	13
Alcalinidad total	213	208	209	108	194	293	111	85	125	161	85
Dureza total	178	183	168	70	221	247	91	78	80	150	104
Dureza carbonatosa	178	183	168	70	194	247	91	78	80	150	85
Dureza no carbonatosa	BDL	BDL	BDL	BDL	28	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	18

Código	PCA-046	PCA-047	PCA-048	PCA-049	PCA-050	PCA-051	PCA-052	PCA-053	PCA-054	PCA-055	PCA-056
Suma sólidos disueltos [mg/l]	369	234	217	119	300	543	128	110	161	231	189
Sólidos disueltos por evaporación a 103°C	390	247	229	126	317	574	135	117	170	244	200
Aluminio [mg/L]	0,34	BDL	BDL	0,023	0,078	0,027	0,099	0,035	BDL	BDL	BDL
Antimonio [mg/L]	0,075	0,059	BDL	0,27	2	0,83	0,2	0,13	0,342	0,064	BDL
Arsénico [mg/L]	BDL	BDL	BDL	0,025	0,023	0,025	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Bario [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Berilio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Boro [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cadmio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cobalto [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cobre [mg/L]	BDL	0,023	BDL	BDL	0,016	0,018	BDL	0,019	BDL	BDL	BDL
Cromo [mg/L]	0,005	0,004	0,005	0,003	0,004	0,005	0,005	0,003	0,003	0,007	0,004
Estaño [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Fosforo [mg/L]	0,075	0,059	BDL	0,27	2	0,83	0,2	0,13	0,342	0,064	BDL
Hierro [mg/L]	0,055	0,029	0,073	0,031	0,073	0,046	0,094	0,057	0,037	0,052	0,055
Manganeso [mg/L]	BDL	0,003	0,005	BDL	BDL	BDL	0,003	BDL	3,94	BDL	0,048
Molibdeno [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Plata [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Plomo [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Selenio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Vanadio [mg/L]	0,024	0,013	0,008	0,025	0,23	0,025	0,019	0,006	BDL	0,003	BDL
Zinc [mg/L]	BDL	0,034	0,12	0,01	0,012	0,016	BDL	0,074	BDL	BDL	0,488
Mercurio [mg/L]	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL

A continuación, se observa el límite de detección instrumental para las muestras tomadas en las campañas de invierno y de verano.

Tabla F.5: Límite de detección y errores asociados a los análisis químicos.

Parámetro	Límite de detección Verano	Límite de detección Invierno
Dureza no carbonatosa	<1	<1
Li	<0,02	<0,02
Sulfatos	<1	<1
Nitratos	<3	<3
Aluminio	<0,02	<0,02
Antimonio	<0,01	<0,02
Arsénico	<0,005	<0,02
Bario	<0,005	<0,02
Berilio	<0,002	<0,002
Boro	<0,06	<0,06
Cadmio	<0,002	<0,002
Cobalto	<0,002	<0,002
Cobre	<0,01	<0,01
Cromo	<0,001	<0,001
Estaño	<0,003	<0,003
Fosforo	<0,05	<0,05
Hierro	<0,01	<0,01
Manganeso	<0,003	<0,003
Molibdeno	<0,005	<0,005
Plata	<0,002	<0,002
Plomo	<0,002	<0,002
Selenio	<0,005	<0,005
Vanadio	<0,003	<0,003
Zinc	<0,01	<0,01
Mercurio	<0,0003	<0,0003

ANEXO G: PERFIL BB''

Perfil BB''

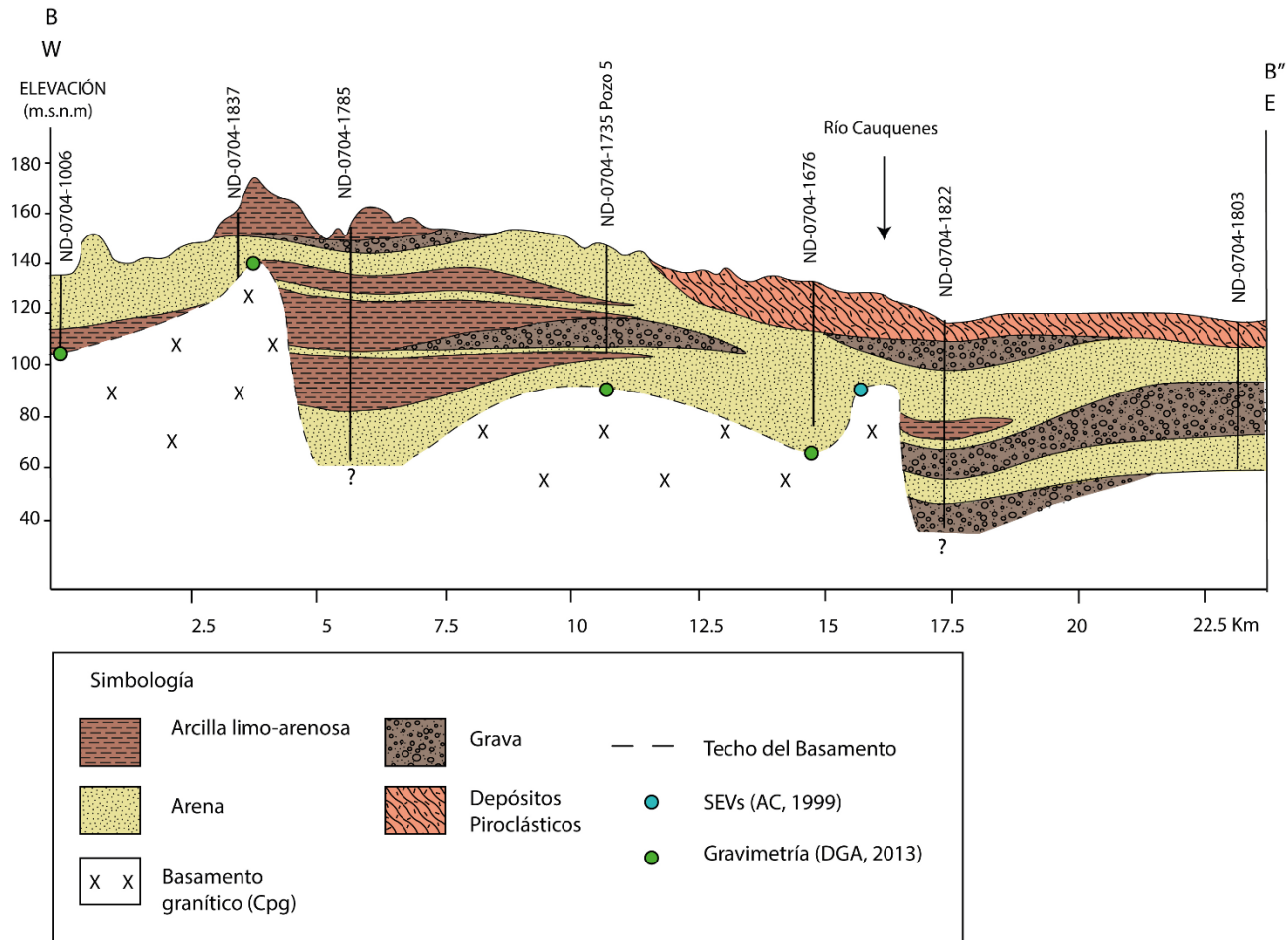





Figura G.1: Perfil estratigráfico BB' extendido hacia la cuenca Perquilauquén.

ANEXO H: DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS

Código: D1P2 nivel A	
GPS: 215504 6012270	
Nombre de Roca: Toba Lítica	
Textura	
Piroclastos (Fragmentos mayores)	<p>30% de líticos: monomícticos, angulares a sub-angulares. alta esfericidad, de tamaños variables entre 0,1mm a 5mm.</p> <p>25% de cristales: cuarzo y subordinadamente algunos cristales máficos</p> <p>25% de vidrio: obsidianas (30%) de corte angular y fractura concoide, de fragmentos de pómez (20%) alargadas y sub redondeadas y escoria volcánica (50%), angulares, porosas, con alta esfericidad y en un (97%) oscuras y algunas ~3% con un intenso color rojizo. Ambos de entre 0,2mm a 2mm de diámetro.</p>
Matriz	20% de matriz de ceniza fina blanco-grisácea


Código: D1P2 nivel B			
GPS: 215504 6012270			
Nombre de Roca: Grava Arenosa			
Textura			
Tamaño de grano	90% de clastos tamaño grava (0,5cm – 30 cm) 10% de matriz de arena media a fina (entre 0,2mm -0,5mm)	Grado selección	Mala
Clastos	Polimícticos. Imbricados.	Grado esfericidad	Baja
Matríz	Polimíctica. 30% de granos de cuarzo y un 50% de granos líticos, y 20% de limos o material muy fino	Redondeamiento	Sub-redondeada a redondeada
Relación con la matriz	Clasto soportado		
Observación	Se observa baja bioturbación producto de la actividad radicular de la vegetación.		


Código: D2P1			
GPS: 206076 6009060			
Nombre de Roca: Granitoide			
Textura			
Tamaño absoluto de cristales	Fanerítico	Cristales	Plagioclasa (35%) Cuarzo (50%) Piroxenos 15% y algunos óxidos de hierro cristalinos.
Tamaño relativo de cristales	Equigranular	Grado de cristalinidad	Holocristalina
Observación	Meteorizado y obliterado. La alteración se observa principalmente como óxido de hierro lo que genera un alto porcentaje de limonitas y subordinadamente hematitas. Las limonitas se presentan en tamaño limo y arcilla		


Código: D2P2			
GPS: 205712 6008620			
Nombre de Roca: Granitoide			
Textura			
Tamaño absoluto de cristales	Fanerítico (Entre 2mm a 5mm)	Cristales	Cuarzo (50%) Plagioclasas (35%) Piroxenos (10%) y Biotitas (5%)
Tamaño relativo de cristales	Equigranular	Grado de cristalinidad	Holocristalina
Observación	Meteorizado y fuertemente alterado, se desgrana con facilidad. Cristales subhedrales a anhedrales.		





Textura			
Tamaño de grano	70% de clastos 30% de matriz (20% limo, 10% arena fina)	Grado selección	Moderada
Clastos	Polimícticos	Grado esfericidad	Baja
Matríz	Matriz no cementada de materiales finos tamaño arenas finas a limo	Redondeamiento	Sub-redondeado
Relación con la matriz	Clasto soportado		
Observación	Abundante presencia de raíces		


Código: D2P4 Nivel C			
GPS: 209454 6014850			
Nombre de Roca: Grava Arenosa			
Textura			
Tamaño de grano	90% Clastos (1-2 cm) 10% Matriz tamaño arena fina (0,1-0,2 mm)	Grado selección	Buena
Clastos	Polimícticos	Grado esfericidad	Alta
Matriz	No cementada	Redondeamiento	Sub-redondeados
Relación con la matriz	Clasto soportada		

Código: D2P8			
GPS: 193422 6014740			
Nombre de Roca: Granitoide			
Textura			
Tamaño absoluto de cristales	Fanerítico	Cristales	Cuarzo (40%) (1-5 mm) Plagioclasas (35%) Hornblenda (5%) (0,5-1 mm) Biotitas (20%) (1-5 mm)
Tamaño relativo de cristales	-	Grado de cristalinidad	Holocristalina
Observación	Meteorizado		


Código: D3P1			
GPS: 202856 5998130			
Nombre de Roca: Granitoide			
Textura			
Tamaño absoluto de cristales	Fanerítico	Cristales	30% cuarzo anhedrales 10% de óxidos de hierro 60% limonitas y otros óxidos de hierro indiferenciados.
Tamaño relativo de cristales	-	Grado de cristalinidad	Holocristalina
Observación	Alterado a óxidos de hierro.		

Código: D3P2			
GPS: 202040 6000260			
Nombre de Roca: Granitoide			
Textura			
Tamaño absoluto de cristales	-	Cristales	Plagioclasas Cuarzo Biotitas
Tamaño relativo de cristales	-	Grado de cristalinidad	Holocrystalina
Observación	Obliterada. Presenta dos zonas con diferentes tipos de alteración: 1) óxidos de hierro en las fracturas y 2) silicificación y argilización pervasiva que deja observar solo algunos cristales de plagioclasas, cuarzo y algunas biotitas.		

Código: D4P5 Nivel A			
GPS: 217102 6031080			
Nombre de Roca: Limo arenoso			
Textura			
Tamaño de grano	70% de clastos tamaño arenas muy finas y limos 30% de matriz (0,2-0,5mm)	Grado selección	Moderado
Clastos	-	Grado esfericidad	Angulosos
Matríz	Cuarzo	Redondeamiento	Bajo
Observación	Cuarzos se presentan en aglomerados limosos que se disgregan con facilidad.		

Código: D4P5 Nivel B			
GPS: 217102 6031080			
Nombre de Roca: Grava arenosa			
Textura			
Tamaño de grano	70% Clastos 30% Matriz tamaño arena fina	Grado selección	Bajo
Clastos	Polimícticos	Grado esfericidad	Bajo
Matriz	Principalmente de cuarzo, limo y arcillas no cementadas	Redondeamiento	Angulares a subangulares
Observación	Muy retrabajados y alterados a arcillas. Se observan precipitados de yeso.		

Código: D5P2 Nivel A			
GPS: 223889 6024390			
Nombre de Roca: Limo arenoso			
Textura			
Tamaño de grano	90% Clastos (0,1-0,3 mm) 30% Matriz	Grado selección	Moderado
Clastos	Monomícticos de cuarzo	Grado esfericidad	Bajo
Matriz	De arenas finas principalmente de cuarzo, limo y arcillas no cementadas	Redondeamiento	Subangulares
Observación	Presencia de raíces		

Código: D5P2	
GPS: 223889 6024390	
Nombre de Roca: Toba Cristalina	
Textura	
Piroclastos (Fragmentos mayores)	Líticos: polimícticos subangulares, de alta esfericidad y subredondeados de composición volcánica. 25% de vidrio: Obsidianas de tamaño variable entre 0,2mm a 1mm y pómez elongadas de entre 0,5mm a 5mm
Matriz	De ceniza fina