



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

EFFECTO ANTRÓPICO EN EL ACUÍFERO ALUVIAL DE SAN FELIPE, REGIÓN DE VALPARAÍSO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

ANDREA MARINA MEDINA SAGREDO

PROFESOR GUÍA:
MATÍAS TAUCARE TORO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LINDA DANIELE
BENOÎT VIGUIER

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CAPTA-CORFO (19CTIGH-121349) y por los fondos públicos asociados a FONDECYT no. 1170569, FONDAP no. 15090013/ACE210005 (Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes – CEGA), FONDEQUIP no. EQM120098, y Fondo de Investigación Estratégica en Sequía no. FSEQ210007.

SANTIAGO DE CHILE
2023

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Geóloga
ESTUDIANTE: Andrea Marina Medina Sagredo
FECHA: 2023
PROFESOR GUÍA: Matías Taucare Toro

EFFECTO ANTRÓPICO EN EL ACUÍFERO ALUVIAL DE SAN FELIPE, REGIÓN DE VALPARAÍSO.

Este estudio pretende determinar el umbral natural de la calidad del agua subterránea e identificar el origen de los iones disueltos en esta para así evaluar adecuadamente el impacto de la agricultura en los acuíferos. Se toma como caso de estudio el acuífero aluvial de San Felipe, ubicado en la cuenca del río Aconcagua en Chile Central.

En primera instancia se realiza una evaluación de las extracciones de agua subterránea y los niveles piezométricos, lo cual revela que las extracciones afectan tanto a los niveles como a la dirección de flujo alterando sus comportamientos naturales. Por otro lado, se determina el umbral natural del agua subterránea, donde los valores fueron definidos por el percentil 90 de los datos de cada ion. Del total de muestras evaluadas, 33 se encuentran sobre el umbral de Cl^- , 34 sobre el umbral de SO_4^{2-} , 45 sobre el umbral de NO_3^- , y 2 sobre el umbral de As.

Posteriormente, los datos son procesados mediante los análisis estadísticos multivariante para determinar la fuente de los iones disueltos. Los resultados preliminares (análisis factorial) entregan 3 factores principales: (1) Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ni, Sr; (2) HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , SiO_2 ; (3) NO_3^- . El Factor 1 tiene mayor peso en las muestras cercanas al río y a canales de regadío. El Factor 2, tiene mayor significancia en muestras cercanas a la montaña, donde la disolución de silicatos sería la fuente de los iones disueltos agrupados en este. A su vez, su distribución espacial podría reflejar flujos de agua subterránea provenientes del bloque de montaña. Por último, el Factor 3 solo se constituye por el NO_3^- , su fuente serían los fertilizantes empleados por la actividad agrícola. De los resultados obtenidos, se concluye que la composición química del agua subterránea del acuífero aluvial de San Felipe estaría alterada por la actividad agrícola, lo cual ha quedado evidenciado por las muestras que sobrepasan los umbrales naturales y que estarían asociadas a los factores 1 y 3.

Mediante el análisis isotópico se determina que el agua subterránea es originada por la recarga de agua meteórica con un predominio de procesos de recarga focalizada influenciada principalmente por los canales utilizados para riego de zonas agrícolas. La distribución de las muestras de pozos clasificadas de acuerdo con los clústers jerárquicos, revelan que pozos pertenecientes al clúster 1 y 2 presentan una composición isotópica similar al de aguas superficiales, mientras que los pozos pertenecientes al clúster 3 muestran una relación con las aguas subterráneas de manantiales.

Finalmente, se propone un modelo conceptual del acuífero Aluvial de San Felipe destacando los tres factores principales que muestran los procesos e interacciones del agua subterránea. Esto con el fin de comprender la complejidad y vulnerabilidad de este tipo de sistema acuífero.

*A Marcia y Marina, mis
dos grandes pilares.*

*“Seguir adelante fue la mayor de
sus hazañas”*

El Hobbit - J.R.R.Tolkien

Agradecimientos

Esta tesis se enmarca en el “Work package 1” del proyecto Anillos Temáticos no. ATE220029 dirigido por la profesora Dra. Linda Daniele. Las campañas de muestreo y los análisis de laboratorio de las muestras de agua empleadas en esta tesis fueron financiados por el consorcio tecnológico no. 19CTIGH-121349 (Centro Avanzando Para Tecnologías del Agua – CAPTA) y por los fondos públicos otorgados por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile (ANID): FONDECYT no. 1170569, FONDAP no. 15090013/ACE210005 (Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes – CEGA), FONDEQUIP no. EQM120098, y Fondo de Investigación Estratégica en Sequía no. FSEQ210007.

Parto agradeciendo a mi profesor guía, Matías Taucare por la oportunidad que me brindó para aprender sobre un área tan bonita, compleja y fascinante como la hidrogeología, gracias por su disponibilidad a resolver todas mis dudas, por la paciencia, la confianza y todas sus enseñanzas. Gracias a los miembros de mi comisión, a la profesora Linda por su tiempo, consejos y el ánimo brindado, y al profesor Benoît por sus consejos a distancia.

Por sobre todo agradecer a mi mamá, por su apoyo constante a lo largo de mi carrera y de mi vida, gracias por celebrar mis triunfos y consolarme en mis derrotas, por su esfuerzo diario trabajando para sacar adelante a una hija que ella siempre ha dicho que vale por tres. A mi abueli Marina, cuya expresión de amor más pura es regalarme con comida, nunca me faltó un plato rico después de llegar cansada de la universidad. Gracias por ser la mejor abuela, mi segunda madre, por cuidarme y preocuparte de mí. Siempre hemos estado apoyándonos las tres y estoy feliz de haber terminado otra etapa más de mi vida junto a ustedes, a dos mujeres que amo y admiro mucho. Gracias a mi pequeña Diana, compañerita en noches de desvelos.

A mis amigos de la vida, al flaco, por toda la paciencia que me ha tenido durante esta última etapa universitaria, gracias por tu amistad que me ha brindado los momentos más felices. A mis Tamis por llegar por mí cuando lo necesité y darme ánimo para enfrentar todo. Al Pipe y Chelo por todas esas risas. Realmente estoy muy agradecida de tenerlos en mi vida y de saber que puedo contar con ustedes.

A los niños de la universidad, a mi amiguita Javi que desde el día uno estuvimos juntas enfrentando la vida universitaria, gracias a esta mujer por escucharme mil y una vez, y darme ánimo, A los amiguitos de plan común, al Mati, a Rodrigo, a Cata y Mariana que también estuvieron desde el principio, siempre ayudando y sacando risas en momentos que estudiar era lo único que se hacía. A mis amigos de Geo; los geopanes, a Javier, creo que no hay palabras para expresar todo lo que me han regalado, momentos lindos de mucha compañía, risas y cariño. Agradecer especialmente a mi grupito que fue fundamental en pandemia; kelo y Catita, realmente ese viaje a las Torres me recordó todo lo lindo y me hizo olvidar todo lo malo. A Dani Mo. por ser el mejor consejero, por levantarme el ánimo a lo largo de este proceso, gracias por dar los mejores abrazos de contención, a Coon por todo el apoyo (especialmente en el tenis de mesa) y las risas. Agradecer a Dani por sus palabras que me motivaron a seguir adelante, su preocupación, por el cariño y la paciencia, a Cril por todas esas veces que me regaló su atención, me escuchó y me acompañó en momentos tristes, conocerte durante un terreno de hidro fue lo mejor, agradezco infinito tu amistad.

Tabla de Contenido

Capítulo 1 : Introducción	1
1.1. Formulación de trabajo	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
Capítulo 2 : Área de Estudio	4
2.1. Ubicación y Accesos	4
2.2. Marco Geológico.....	5
2.2.1. Rocas intrusivas	6
2.2.2. Rocas estratificadas.....	6
2.2.3. Depósitos no consolidados.....	7
2.3. Fisiografía y Drenaje.....	7
2.4. Clima e Hidrología.....	8
2.4.1. Megasequía en Chile Central	9
2.5. Situación Socioeconómica y Usos de suelo	10
Capítulo 3 : Metodología	11
3.1. Recopilación de Antecedentes	11
3.2. Trazado de isopiezas	11
3.3. Determinación del Background Geológico.....	12
3.4. Muestreo de Agua y Análisis de Laboratorio	14
3.4.1. Validación de los análisis químicos.....	14
3.5. Hidrogeoquímica y Análisis Estadístico Multivariante	15
3.6. Análisis Geoestadístico	17
3.7. Análisis de Isotopos Estables de Agua	17
Capítulo 4 : Resultados y discusiones.....	18
4.1. Extracciones	18
4.1.1. Evolución Temporal.....	18

4.1.2. Uso, Título y Ejercicio del Agua Subterránea	19
4.1.3. Análisis Espacio Temporal.	24
4.2. Piezometría.....	26
4.2.1. Evolución Histórica	29
4.3. Background Geológico.....	32
4.3.1. Normativas	32
4.3.2. Comparación de las normativas con límites naturales.....	34
4.4. Hidrogeoquímica.....	43
4.4.1. Parámetros Fisicoquímicos	44
4.4.2. Elementos mayoritarios	48
4.4.3. Elementos Trazas	53
4.4.4. Clasificación de aguas y su distribución espacial.....	56
4.4.5. Correlación de iones	62
4.5. Análisis Estadístico Multivariante	68
4.5.1. Análisis de Conglomerados Jerárquicos (HCA).....	68
4.5.2. Análisis de Factores (AF)	70
4.5.3. Geoestadística	79
4.6. Isótopos	82
4.7. Modelo hidrogeológico conceptual	85
Capítulo 5 : Conclusiones	87
Bibliografía.....	88
Anexo A	95
A.1. Validación de los análisis químicos	95
Anexo B.....	97
B.1. Datos de Nivel Piezométrico	97
Anexo C.....	107
C.1. Base de datos Hidrogeoquímicos	107
Anexo D : Isótopos	109
Datos isotópicos	109
Anexo E.....	113
E.1. Background Geológico	113

Índice de Figuras

Figura 1: Mapa uso de suelo. Caracterización del área de estudio de acuerdo con el uso que se le da al suelo, incluyendo canales de origen antrópico. Fuente: Corporación Nacional Forestal 2014.	2
Figura 2. Mapa de ubicación y Accesos a la zona de estudio	4
Figura 3: Mapa principal: mapa geológico del área de estudio, escala 1:200.000. Mapa de vista general: morfoestructuras, escala 1:800.000. Modificado de (Taucare et al., 2020).	5
Figura 4. Mapa de Fisiografía de la zona de estudio, junto al mapa de la cuenca río Aconcagua, cuenca principal, y las cuencas cercanas, cuenca río Ligua por el norte y cuenca río Maipo por el sur.....	8
Figura 5. Contexto hidrológico en la cuenca del Aconcagua. Series temporales hidroclimáticas desde 1980 hasta la actualidad: a) Índice del Niño Oceánico (NOAA/Servicio Meteorológico Nacional, 2019); b) precipitación mensual en la estación meteorológica "San Felipe"; c) caudal diario del río en la estación de aforo "Río Aconcagua en San Felipe"; d) profundidad del nivel freático en el pozo de observación "Perfil San Felipe". En rojo se destaca la "Megasequía" de Chile Central.Modificado de Taucare et al., 2020.....	9
Figura 6. Evolución temporal desde 1991 hasta 2022 de las extracciones de agua subterránea. Fuente: Dirección General de Aguas año 2022.....	19
Figura 7. Caudales en [m ³ /s] otorgados de acuerdo con el tipo de uso. Fuente: Dirección General de Aguas año 2022	20
Figura 8. Distribución de los derechos de agua en el valle según su uso.....	21
Figura 9. Diagrama de tortas con el uso de los derechos de agua desde la década de 1990 hasta el 2020.....	22
Figura 10.Diagrama de torta de Seguridad de Título por década desde el 1990 hasta el 2020.	23
Figura 11.Diagrama de torta de Ejercicio de Derecho por década desde el 1990 hasta el 2020.....	23
Figura 12. Mapa de ubicación de los datos correspondientes a los Derechos de Agua. Información obtenida de la DGA.....	24
Figura 13. Mapa de los derechos de agua de acuerdo con su distribución espacial por década, desde el 1990 hasta el 2020	25

Figura 14. Mapa de ubicación de los pozos supervisados por la DGA y de los pozos medidos durante la campaña de terreno febrero 2022, junto con la Red Hidrográfica obtenida de la BCN.....	26
Figura 15. Mapa de Isopiezas cada 10 [m]. Representa la forma de la superficie piezométrica del acuífero aluvial. Red hidrográfica obtenida de la BCN.	27
Figura 16. Mapa con las líneas de flujo del área de estudio. Red Hidrográfica obtenida de la BCN.....	28
Figura 17. Ubicación de las captaciones de agua subterránea monitoreados por la DGA	29
Figura 18. Evolución temporal de la profundidad del agua subterránea en los distintos puntos de captación de la base de datos de la DGA. Se considera una escala temporal desde 1980 hasta el 2021	31
Figura 19. Diagrama caja de las muestras de manantiales con los elementos principales para el estudio de las concentraciones natural dentro del acuífero aluvial de San Felipe.	34
Figura 20. Gráfico con los valores de pH de pozos, junto con los límites máximos y mínimos de las normativas NCh 409/1 y NCh 1333/78	35
Figura 21. Gráfico con los valores de pH de pozos y el límite definido por el background geológico	35
Figura 22. Concentración del cloruro en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite de las normas NCh 409/1 y NCh 1333/78.....	36
Figura 23. Concentración del cloruro en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite natural del acuífero.	36
Figura 24. Concentración del sulfato en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite natural del acuífero.....	37
Figura 25. Concentración del sulfato en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite de las normas NCh 409/1 y NCh 1333/78	37
Figura 26. Concentración del nitrato en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite de las normas NCh 409/1.	38
Figura 27. Concentración del nitrato en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite del background geológico	38
Figura 28. Concentración del magnesio en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite de la norma NCh 409/1.....	39
Figura 29. Concentración del magnesio en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite del background geológico	39
Figura 30. Concentración del zinc en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite de las normas NCh 409/1 y NCh 1333/78.	40

Figura 31. Concentración del zinc en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite natural del acuífero. Valores en escala logarítmica	40
Figura 32. Concentración del arsénico en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite de las normas NCh 409/1 y NCh 1333/78.	41
Figura 33. Concentración del arsénico en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite natural del acuífero.	41
Figura 34. Mapa de la Base de Datos Hidrogeoquímicos. Ubicación de los puntos muestreados en las distintas campañas de terrenos. Incluye muestras de pozos, manantiales, ríos y canales.....	43
Figura 35. Diagrama cajas de Parámetros Fisicoquímicos de Manantiales.	47
Figura 36. Diagrama cajas de Parámetros Fisicoquímicos de Pozos	48
Figura 37. Diagrama cajas de Cationes y Sílice. Se muestra la concentración en ppm por temporada de los datos relacionados a manantiales.....	49
Figura 38. Diagrama cajas de Cationes y Sílice. Concentración en ppm de los datos de pozos	49
Figura 39. Mapa de variación espacial de cationes y sílice. La escala de colores va desde azul, indicando menor concentración al rojo el cual indica una concentración máxima.	50
Figura 40. Diagrama cajas de Aniones. Se muestra la concentración en ppm por temporada de los datos relacionados a manantiales.....	51
Figura 41. Diagrama cajas de Aniones. Concentración en ppm de los datos de pozos. ...	52
Figura 42. Mapa de variación espacial de aniones. La escala de colores va desde azul, indicando menor concentración al rojo el cual indica una concentración máxima. ..	53
Figura 43. Diagrama cajas de Elementos Trazas. Se muestra la concentración en ppb por temporada de los datos relacionados a manantiales.....	54
Figura 44. Diagrama cajas de Elementos Trazas. Se muestra la concentración en ppb de los datos relacionados a pozos	55
Figura 45. Mapa de Variación espacial de elementos trazas.....	55
Figura 46. Diagrama Piper para la clasificación de agua correspondiente a las muestras de pozos. Datos en meq/L.....	56
Figura 47. Diagrama Piper para la clasificación de agua correspondiente a las muestras de manantiales. Datos en meq/L	57
Figura 48. Diagrama Piper para la clasificación de agua correspondiente a las muestras de ríos. Datos en meq/L	58

Figura 49. Diagrama Piper para la clasificación de agua correspondientes a las muestras de canales. Datos en meq/L	58
Figura 50. Mapa de la distribución de los diagramas Stiff de las aguas de pozo.....	59
Figura 51. Mapa de la distribución de los diagramas Stiff de las aguas de manantial en la temporada de verano.	60
Figura 52. Mapa de la distribución de los diagramas Stiff de las aguas de manantial en la temporada de invierno.....	61
Figura 53. Matriz de correlación. Color rojo marca una alta correlación $> 0.7 $. El color amarillo marca correlaciones moderadas entre $ 0.5 $ y $ 0.7 $. Finalmente, el color azul marca valores entre $ 0.3 $ y $ 0.5 $ mostrando una correlación débil o nula.	63
Figura 54. Relaciones iónicas en mg/L de Cl^- con respecto a los iones mayoritarios	65
Figura 55. Relaciones iónicas en mg/L de SO_4^{2-} con respecto a los iones mayoritarios. .	66
Figura 57. Relaciones iónicas en mg/L de SO_4^{2-} con respecto a elementos trazas	67
Figura 56. Relaciones iónicas en mg/L de HCO_3^- con respecto a cationes.....	67
Figura 58. Dendrograma con línea horizontal imaginaria (línea fenónica en rojo) para definir tres grupos de muestras de agua en función del análisis de conglomerados jerárquicos de las variables utilizando un conjunto de datos normalizados.	68
Figura 59. Distribución de los clústers obtenidos del análisis de conglomerados jerárquicos	69
Figura 60. Gráfico de factores y la carga factorial asociada a cada variable y muestra analizada. a) representación gráfica del Factor 1 y 2, b) representación gráfica del Factor 1 y 3, c) representación gráfica del Factor 2 y 3.....	72
Figura 61. Variación espacial de los factores F1, F2 y F3.	73
Figura 62. Relación molar de Na^+ vs HCO_3^-	75
Figura 63. Relación molar de Ca^{2+} vs HCO_3^-	76
Figura 64. Relación molar de Ca^{2+} vs SO_4^{2-}	77
Figura 65. Relación molar de $\text{Ca}^{2+}-(\text{HCO}_3^-/3)$ vs SO_4^{2-}	78
Figura 66. Distribución espacial del Factor 1, compuesto por Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Ni y Sr...	79
Figura 67. Distribución espacial del Factor 2, compuesto por HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , SiO_2 ..	80
Figura 68. Distribución espacial del Factor 3, compuesto por el NO_3^-	81
Figura 69. Relación entre el $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de los datos de agua tanto subterránea como superficial,.....	84
Figura 70. Relación entre la elevación (metro sobre el nivel medio del mar) y $\delta^{18}\text{O}$ (‰) para el agua de pozos, manantiales, río y canales	84

Figura 71. Modelo hidrogeológico conceptual: representación de los procesos e interacciones principales en el acuífero, no está escalado. 85

Índice de Tablas

Tabla 1. Error admisible según conductividad eléctrica	15
Tabla 2. Resultados de la prueba de esfericidad de Bartlett y del índice KMO.....	17
Tabla 3. Límites establecidos en la NCh. 409/1, para elementos esenciales, no esenciales y características organolépticas.....	32
Tabla 4. Concentraciones máximas de elementos químicos para el agua destinada a riego	33
Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de pozos.....	44
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de manantiales	45
Tabla 7. Matriz de componente rotado, análisis de factores con rotación Varimax. Valores en rojo representan las variables indicadas en cada factor.	70
Tabla 8. Balance iónico de los datos de pozos y manantiales. Datos destacados en celeste se consideran en el análisis junto con los pozos.	95
Tabla 9. Datos del Nivel piezométrico asociado a las muestras obtenidas durante el terreno y los valores obtenidos de la base de datos de la DGA, identificados como DG por simplificación.....	97
Tabla 10. Códigos e información de las muestras utilizadas para el análisis hidrogeoquímico. Manantiales destacados en celeste se analizan junto con los pozos.	107
Tabla 11. Datos isotópicos de pozo, manantiales, ríos y canales.....	109
Tabla 12. Datos utilizados para obtener los límites naturales	113

Capítulo 1: Introducción

1.1. Formulación de trabajo

Las aguas subterráneas proporcionan aproximadamente un tercio del agua dulce a escala mundial. Las descargas naturales de aguas subterráneas mantienen el flujo de base de ríos, lagos y humedales durante los periodos de escasez o ausencia de precipitaciones (Gleeson & Richter, 2018). La creciente demanda hídrica y el aumento de las actividades antropogénicas han provocado que los sistemas acuíferos sean vulnerables al agotamiento de este recurso hídrico, esto principalmente reflejado en regiones que se sustentan económicamente en actividades agrícolas (Siebert et al., 2010). En zonas áridas y aquellas propensas a la sequía, el uso creciente del agua subterránea está causando un grave agotamiento de los acuíferos y la degradación de la calidad de las aguas subterráneas (S. S. D. Foster & Chilton, 2003).

Mundialmente, la agricultura es el mayor extractor y consumidor predominante de recursos hídricos subterráneos (Siebert et al., 2010), y durante mucho tiempo se ha reconocido que los nitratos representan el principal problema en cuanto a la calidad del agua subterránea en áreas agrícolas. Es un hecho ampliamente divulgado y discutido que las aguas subterráneas, especialmente en zonas asociadas a esta actividad económica, están expuestas a la contaminación difusa, particularmente por nitratos debido al uso excesivo de fertilizantes (Spalding & Exner, 1993.) Así mismo, en las zonas semiáridas, es habitual la desviación del caudal de los arroyos mediante canales de riego para agricultura, los que también pueden alterar las condiciones naturales (Jódar et al., 2022). Conforme a esto, es fundamental comprender el impacto actual de esta actividad en el ciclo hidrológico para un mejor uso del agua subterránea, una gestión eficaz de los recursos hídricos subterráneos y para promover prácticas agrícolas más sostenibles (S. Foster & Natwarlal Shah, 2012).

En Chile Central (32°S-36°S) la exploración de los recursos hídricos subterráneos se ha centrado en los depósitos aluviales cuaternarios que rellenan los fondos de valles y cuencas en la Depresión Central. La cuenca del río Aconcagua se extiende desde la cordillera de los Andes hasta el océano Pacífico. Es una de las cuencas hidrográficas más importantes de Chile Central, debido al abastecimiento de agua donde el río Aconcagua es una de las fuentes cruciales de agua dulce para la región central de Chile, proporcionando agua para el consumo humano, riego agrícola y otros usos industriales. A su vez la cuenca es conocida por su importancia agrícola, siendo una zona que destaca por la producción de diversos tipos de cultivos, como frutas, hortalizas y cereales. Por otro lado, Chile Central se ha caracterizado por experimentar una sucesión ininterrumpida de años secos desde 2010, conocida como "Megasequía", con una disminución de precipitaciones que oscila entre el 20% y el 40% (Garreaud et al., 2020). Las características mencionadas, es decir los efectos combinados entre años secos continuos y las crecientes extracciones de agua ligados a la actividad agrícola pueden impactar negativamente los recursos hídricos subterráneos, en particular a la zona central de Chile.

Estudios recientes enfocados en el Frente Andino Occidental de la Cuenca del río Aconcagua (Taucare et al., 2020; Yáñez Carrizo & Herrera, 2021) han demostrado algunos de los efectos an-

tropogénicos en el sistema de aguas subterránea. Es por tanto fundamental extender el conocimiento del comportamiento del agua subterránea enfocada particularmente en la zona de la Depresión Central y ver cómo la actividad antrópica ha impactado en la calidad de esta.

Para resolver la pregunta anterior, este estudio pretende determinar el umbral natural de la calidad del agua subterránea e identificar el origen de los iones disueltos en esta para así evaluar adecuadamente el impacto de la agricultura en los acuíferos. Se propone un estudio piezométrico, hidrogeoquímico e isotópico tomando como caso de estudio el acuífero aluvial de San Felipe, ubicado en la cuenca del río Aconcagua. Esta zona de estudio posee una ubicación estratégica en la cuenca, siendo una fuente esencial de agua para la agricultura, el suministro de agua potable y otros usos industriales en la zona. A su vez, es un área adecuada para la evaluar el efecto antrópico sobre las aguas subterráneas puesto que existen numerosos manantiales (n=34) bajo condiciones naturales en la montaña, y hacia la Depresión Central existen numerosos pozos (n=44) bajo un área de tradiciones agrícolas (área=346.38 Km²; Figura 1).

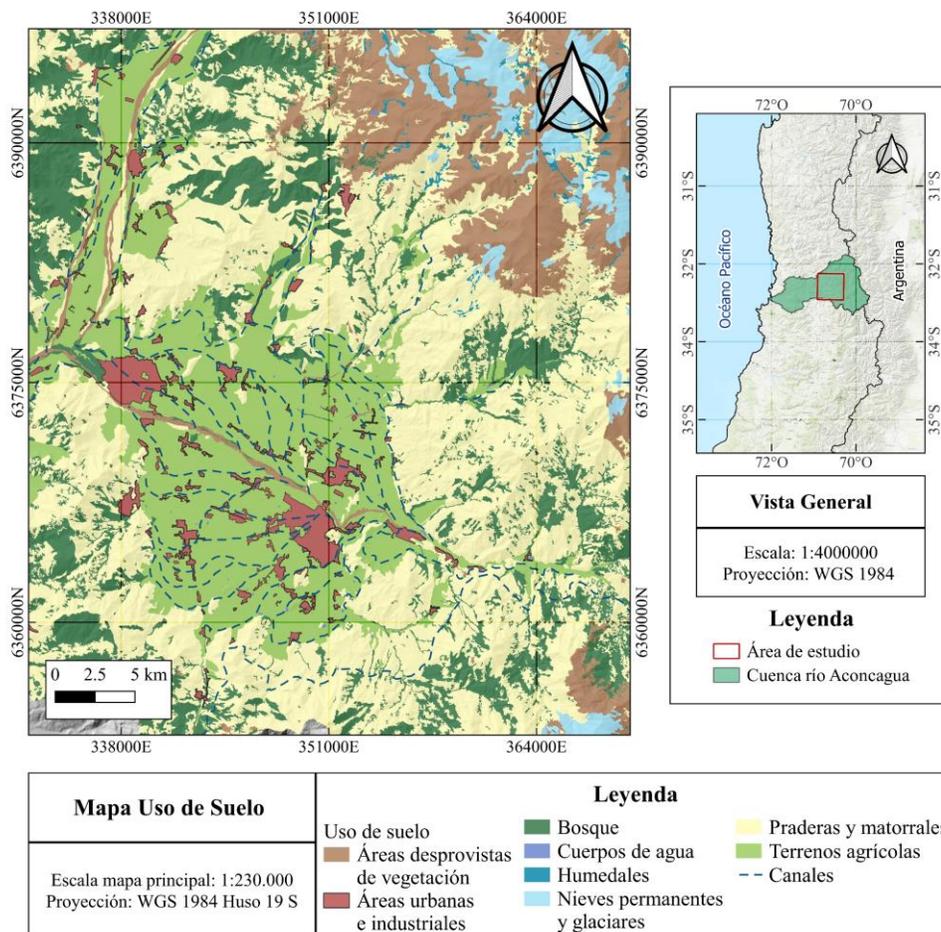


Figura 1: Mapa uso de suelo. Caracterización del área de estudio de acuerdo con el uso que se le da al suelo, incluyendo canales de origen antrópico. Fuente: Corporación Nacional Forestal 2014.

Finalmente, la hipótesis central de este trabajo sostiene que la actividad antrópica, principalmente la agricultura, afecta tanto a la cantidad como a la calidad del agua subterránea de los acuíferos aluviales de Chile Central. Por un lado, la extracción de agua subterránea alteraría la circulación del agua subterránea distorsionando la piezometría. Por otro lado, tanto la implementación de químicos en superficie (como fertilizantes en el caso de la agricultura) como de técnicas de captación de agua para el desarrollo de la actividad económica (como canales de regadío) afectarían la composición química del agua subterránea.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar cuantitativamente el impacto de la actividad antrópica sobre los niveles y calidad del agua subterránea del acuífero aluvial de San Felipe.

1.2.2. Objetivos Específicos

Para cumplir con el objetivo general, se deben lograr los siguientes objetivos específicos:

- Analizar las extracciones de agua subterránea
- Determinar los patrones de circulación de agua subterránea.
- Establecer el umbral composicional de agua subterránea bajo condiciones naturales.
- Identificar las fuentes de iones disueltos y mecanismo de recarga.

Capítulo 2: Área de Estudio

En la presente sección se exponen todos los antecedentes de interés sobre el área de estudio, organizándose estos en; ubicación y accesos, marco geológico, fisiografía y drenaje, antecedentes climáticos, y situación socioeconómica y uso de suelo.

2.1. Ubicación y Accesos

El área de estudio se ubica en el valle de la cuenca río Aconcagua en la Región de Valparaíso. Se localiza a unos 90 [Km] al norte de Santiago (Figura 2). Específicamente abarca parte de la provincia de San Felipe y Los Andes, entre las coordenadas 32°55'S – 32°95'S y 70°39'W – 70°79'W con una superficie de 1692 [km²].

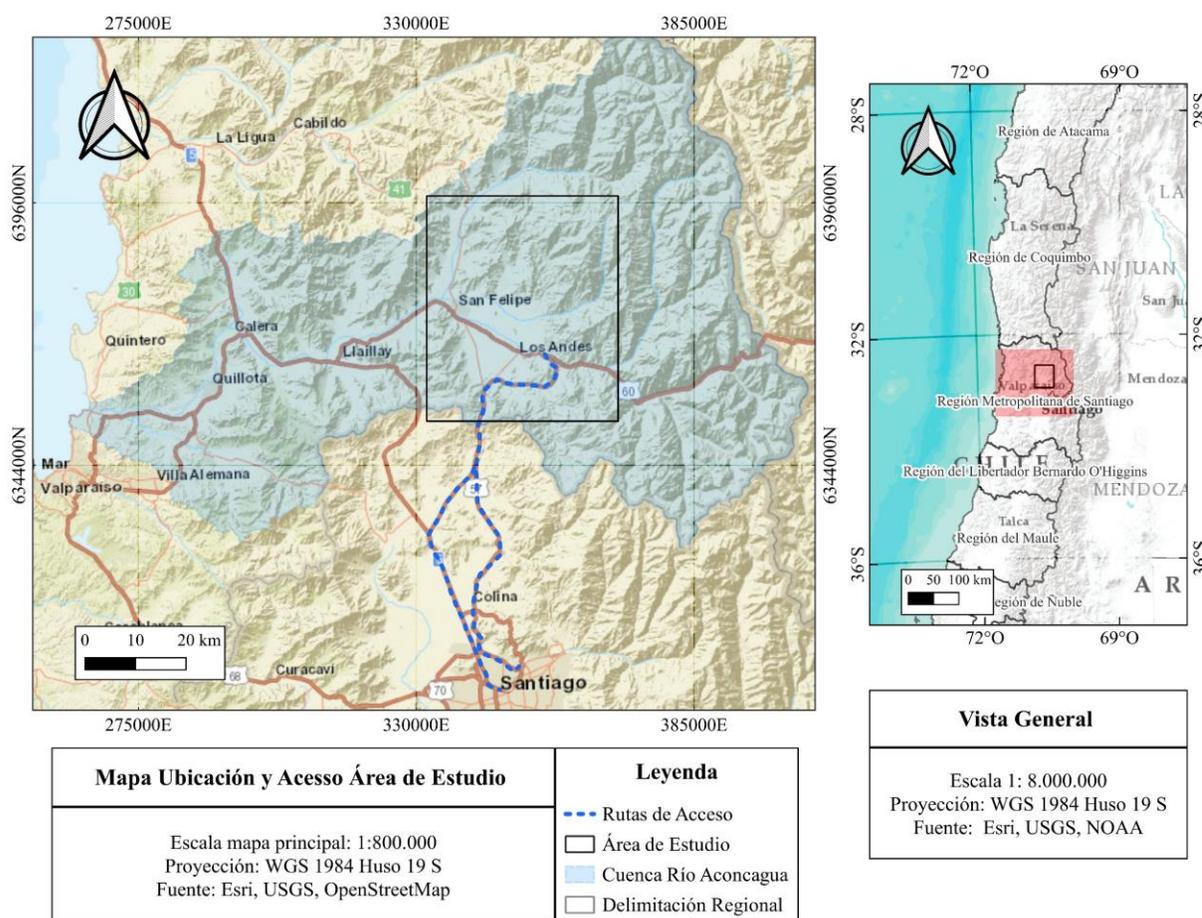


Figura 2. Mapa de ubicación y Accesos a la zona de estudio

Para acceder a la zona de estudio desde Santiago, se debe tomar la Autopista Central Ruta 5 con dirección Norte, luego tomar la Autopista Norte Ruta 70, salir hacia Los Andes/Colina para incorporarse a la Autopista Los Libertadores Ruta 57, finalmente tomar la salida a Calle Larga. Este trayecto considera un viaje de aproximadamente 1 Hora 15 minutos en auto. La ruta principal mencionada y una ruta alternativa se destacan en azul en el mapa anterior.

2.2. Marco Geológico

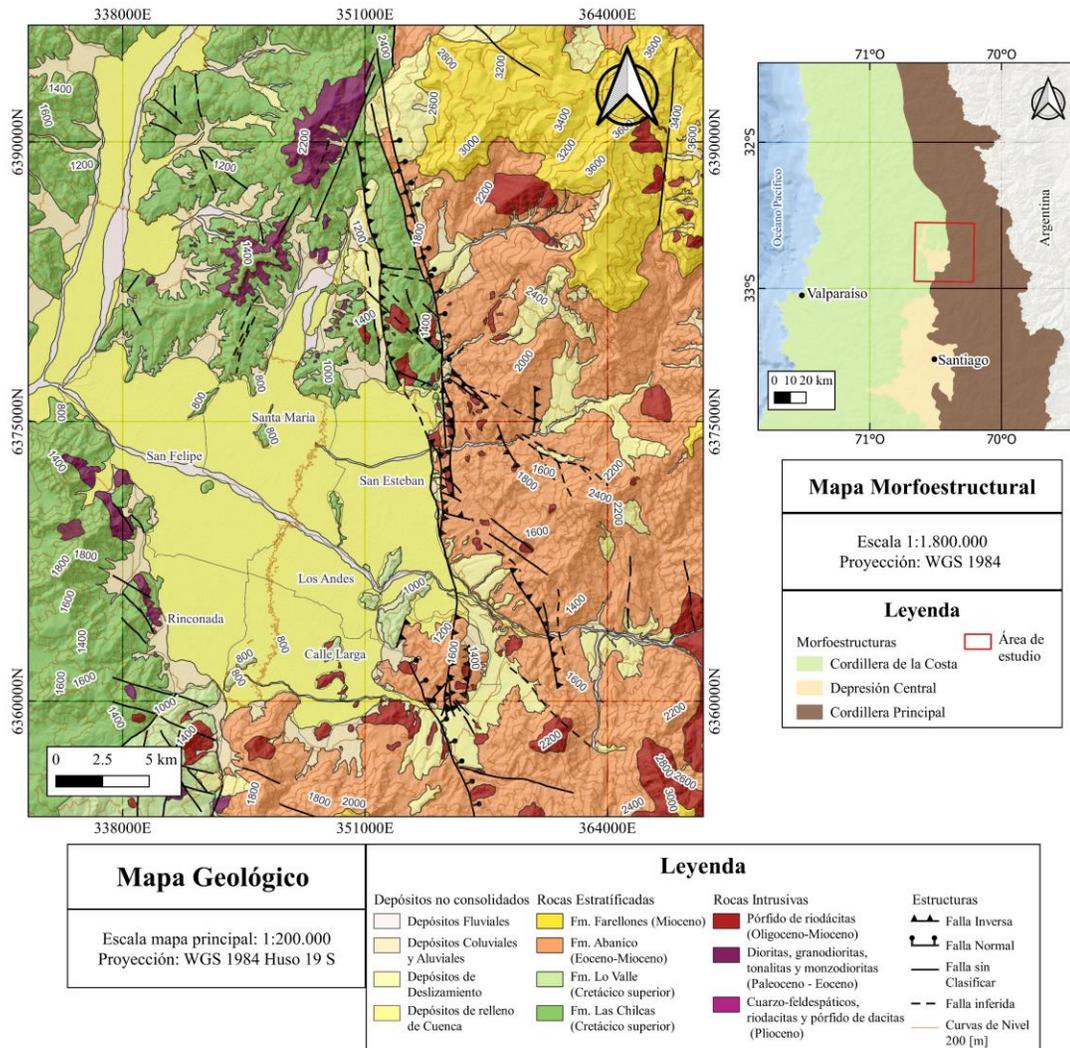


Figura 3: Mapa principal: mapa geológico del área de estudio, escala 1:200.000. Mapa de vista general: morfoestructuras, escala 1:800.000. Modificado de (Taucare et al., 2020).

La Cordillera de los Andes es el resultado del acortamiento de la corteza continental relacionado con la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Sudamericana, desde el Jurásico hasta la actualidad (Decelles et al., 2009). En Chile Central (32°-36°S), el acortamiento de la corteza continental se desarrolló por desplazamiento en varias fallas de la corteza con orientación N-S que, a su vez, fueron segmentadas por fallas del basamento oblicuas al orógeno orientado N-S (Piquer et al., 2016, 2017; Yáñez Carrizo & Herrera, 2019; Yáñez et al., 2020). Este proceso tectónico ha controlado el paisaje andino actual, teniendo como consecuencia la formación de tres grandes dominios morfotectónicos de orientación N-S, de oeste a este; la Cordillera de la Costa (hasta 2000 msnm), la Depresión Central (~570 msnm) la cual está conformada por un relleno promedio de 250 m de espesor de depósitos aluviales cuaternarios estimados en la cuenca sedimentaria de Santiago (Yáñez et al., 2015a), y la Cordillera Principal (hasta 5000–6000 msnm). El flanco occidental de la Cordillera Principal es conocido regionalmente como Frente Andino Occidental (Taucare et

al., 2022). Es una zona de transición geomorfológica de unos 2000 m de altura entre la Depresión Central y la Cordillera Principal.

El Frente Andino Occidental está controlado por importantes fallas inversas de orientación N-S. Chile Central también se caracteriza por la presencia de valles de tipo fluvio-glacial exorreicos de orientación E-O (Carretier et al., 2015; Farías et al., 2008), como la correspondiente al valle del río Aconcagua. En cuanto a la litología, en el Frente Andino Occidental, el basamento volcano-sedimentario está constituido por secuencias continentales depositadas durante el Neógeno (Formación Abanico y Formación Farellones) (Fuentes et al., 2002; Jara & Charrier, 2014; Piquer et al., 2017). Estas secuencias volcano-sedimentarias fueron afectadas por la Zona de Falla de Pocuro (ZFP) de orientación N-S: una zona de deformación frágil de 150 km de longitud y 4 km de ancho a lo largo del Frente Andino Occidental (Rivano et al., 1993; Jara & Charrier, 2014). De igual modo en la zona oeste del área de estudio, tanto al norte como al sur de la Depresión central, se distinguen de forma más local fallas que afectan la Formación Lo Valle y la Formación las Chilcas (Figura 3).

La zona de Falla Pocuro, según Taucare et al., 2022, corresponde a una zona de falla extensiva y en parte de rumbo, con una serie de fallas paralelas menores de rumbo y fallas conjugadas que obliteran la estratificación debido al intenso clivaje de fractura producido. De acuerdo con (Taucare et al., 2022), la ZFP está compuesta por tres rasgos tectónicos principales no coetáneos; fallas normales orientadas N-S constituidas por un núcleo de falla rico en arcilla (es decir, gouge) rodeado por una densa red de vetas rellenas de minerales hidrotermales, fallas inversas orientadas N-S también constituidas por un núcleo de falla rico en arcilla, y fallas inversas orientadas NW-SE.

A continuación, se describe de forma detalla la litología presente en la zona de estudio:

2.2.1. Rocas intrusivas

Las rocas plutónicas del área de estudio intruyen coetáneamente a las secuencias volcano-sedimentarias resultado de la migración hacia el este del arco magmático y de procesos sedimentarios (Kay et al., 2005; Parada et al., 1988). Según la descripción realizada por trabajos como (Fuentes et al., 2002; Rivano et al., 1993), algunas de estas rocas incluyen pórfidos riódacíticos, que se encuentran principalmente en la parte este del área de estudio. Además, se observan dioritas, granodioritas, tonalitas y monzodioritas, principalmente en la zona norte. También se ha identificado la presencia de cuarzo-feldespático riódacitas y pórfidos de riódacitas, aunque en menor proporción (Figura 3).

2.2.2. Rocas estratificadas

- **Formación Las Chilcas (Cretácico medio a tardío):** Se ubica en la Cordillera de la Costa, comprende ~6000 m de basaltos, andesitas y rocas piroclásticas intercaladas por capas sedimentarias cementadas por calcita y óxidos de hierro (Boyce et al., 2020).

- **Formación Lo Valle (Cretácico tardío):** Aflora como monte isla en la Depresión Central y está constituida por 700–1800 m de toba dacítica con intercalaciones de andesitas porfídicas (Boyce et al., 2020).
- **Formación Abanico (Eoceno tardío a Mioceno temprano):** Se encuentra en la Cordillera Principal está compuesta por ~3000 m de andesitas, basaltos y rocas piroclásticas intercaladas con conglomerados, areniscas y lutitas (Fuentes et al., 2002; Jara & Charrier, 2014; Piquer et al., 2017).
- **Formación Farellones (Mioceno temprano a medio):** Aflora en la parte más alta de la Cordillera Principal y es una secuencia de 1000–2500 m de espesor de tobas dacítico-riolíticas, andesitas y riolitas (Fuentes et al., 2002; Jara & Charrier, 2014; Piquer et al., 2017).

2.2.3. Depósitos no consolidados

Procesos erosivos posteriores (post Plioceno) en la Cordillera Principal, originaron materiales detríticos que fueron transportados a lo largo de valles fluvio-glaciares orientados al EW, como el río Aconcagua. Luego, el transporte de materiales detríticos permite el relleno del fondo de cuenca de la Depresión Central, con un espesor promedio de ~300 m (Yáñez et al., 2015b).

2.3. Fisiografía y Drenaje

El medio físico del área de estudio se caracteriza por la presencia de la Cordillera de Los Andes, valles y cordones transversales a la cordillera principal, juntos a importantes recursos hídricos como el río Aconcagua y sus tributarios. En particular, el valle río Aconcagua forma una cuenca de hundimiento con numerosas terrazas fluviales formadas por el depósito de rocas sedimentarias. Desde el borde occidental de la Cordillera de los Andes aparecen cordones transversales a esta que se prolongan hasta la Cordillera de la Costa enmarcando de esa manera a esta cuenca. Otro cordón importante es el de Chacabuco que se encuentra al sur de la región y que separa a ésta de la Región Metropolitana (Rivano et al., 1993).

La cuenca río Aconcagua (Figura 4), limita al norte con la cuenca del río La Ligua y por el sur con la cuenca del río Maipo, posee una superficie de 7337 [km²]. Su cauce principal es el río Aconcagua, que nace en la cordillera de Los Andes entre alturas de 5400 a 7000 [m.s.n.m], a través de la conjunción de los ríos Juncal y Blanco, recibiendo su mayor aporte andino desde el río Colorado por su lado norte. A 1420 [m.s.n.m], el río Aconcagua posee un promedio anual natural de 20.5 [m³/s], alcanzado en el valle central un caudal anual promedio de 33.0 [m³/s]. Aguas abajo de San Felipe, recibe por el norte el aporte del río Putaendo y del estero San Francisco, mientras que por su lado sur recibe el aporte del estero Pocuro. Este río conforma una red de drenaje de unos 7000 [km²] con un recorrido de 190 [Km] hasta su desembocadura en la bahía de Concón en la Región de Valparaíso (DGA, 2004).

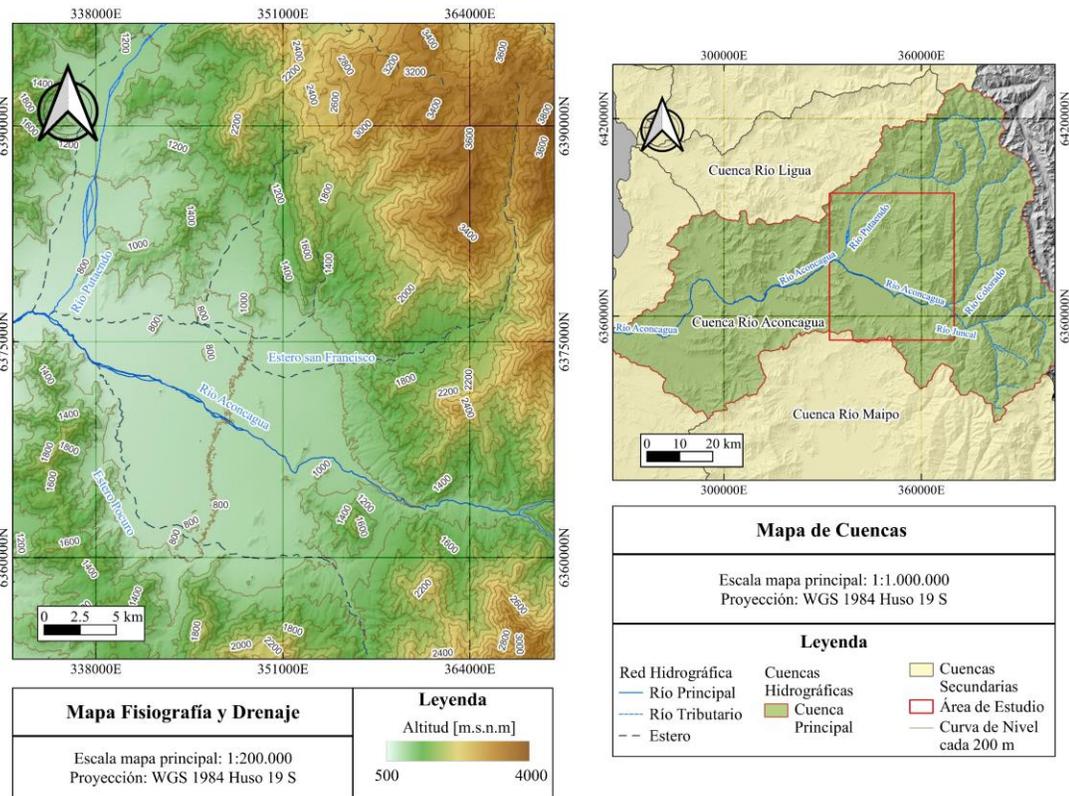


Figura 4. Mapa de Fisiografía de la zona de estudio, junto al mapa de la cuenca río Aconcagua, cuenca principal, y las cuencas cercanas, cuenca río Ligua por el norte y cuenca río Maipo por el sur.

2.4. Clima e Hidrología

La zona de estudio se localiza en el contexto climático de Chile Central (30-35°S), es decir se encuentra bajo la influencia de un clima de tipo mediterráneo (Luebert & Pliscoff, 2012; Sarricolea et al., 2017) determinado por el anticiclón subtropical y la trayectoria de las tormentas en latitudes medias (Garreaud et al., 2017). Este clima, se caracteriza por un régimen estacional de precipitaciones y temperaturas, con una estación invernal fría y húmeda, y una estación estival cálida y seca (Aschmann, 1984). Particularmente, las precipitaciones presentan una media anual que oscila entre los 100 a 1000 [mm] y un marcado ciclo estacional (Garreaud et al., 2017). Estas precipitaciones presentan una importante variabilidad interanual parcialmente condicionada por el fenómeno océano-atmosférico Oscilación “El Niño Sur” (ENOS), donde los años húmedos ocurren durante el periodo del niño, mientras que los años secos durante el periodo de la niña (Montecinos & Aceituno, 2003). No obstante, desde 1970 se ha observado una tendencia de sequías regionales atribuidas en parte al cambio climático antropogénico. Los factores anteriormente mencionados han evidenciado una disminución de las precipitaciones a lo largo de la costa (Quintana & Aceituno, 2012) y la cordillera de los Andes (Masiokas et al., 2016), acentuada por un déficit ininterrumpido de lluvias desde 2010 hasta la actualidad (Garreaud et al., 2017).

La temperatura promedio en el Valle de Aconcagua, puede variar según la estación del año. Sin embargo, durante los meses de verano, que corresponden a diciembre, enero y febrero, la temperatura promedio puede oscilar entre los 25°C y los 30°C. Por otro lado, durante los meses de invierno, que corresponden a junio, julio y agosto, las temperaturas promedio suelen situarse entre los 10°C y los 15°C, siendo las noches más frías.

2.4.1. Megasequía en Chile Central

El déficit anual de precipitación de entre el 25 y el 45 % que se ha presentado desde el 2010 en Chile Central se ha denominado como Megasequia (Garreaud et al., 2017), esto debido a su perdurabilidad temporal y su gran extensión espacial en el registro histórico. Este déficit tuvo como consecuencias una disminución de la capa de nieve andina, los volúmenes de los embalses, los caudales superficiales del río Aconcagua y los niveles de agua subterránea en el Centro de Chile (Figura 5).

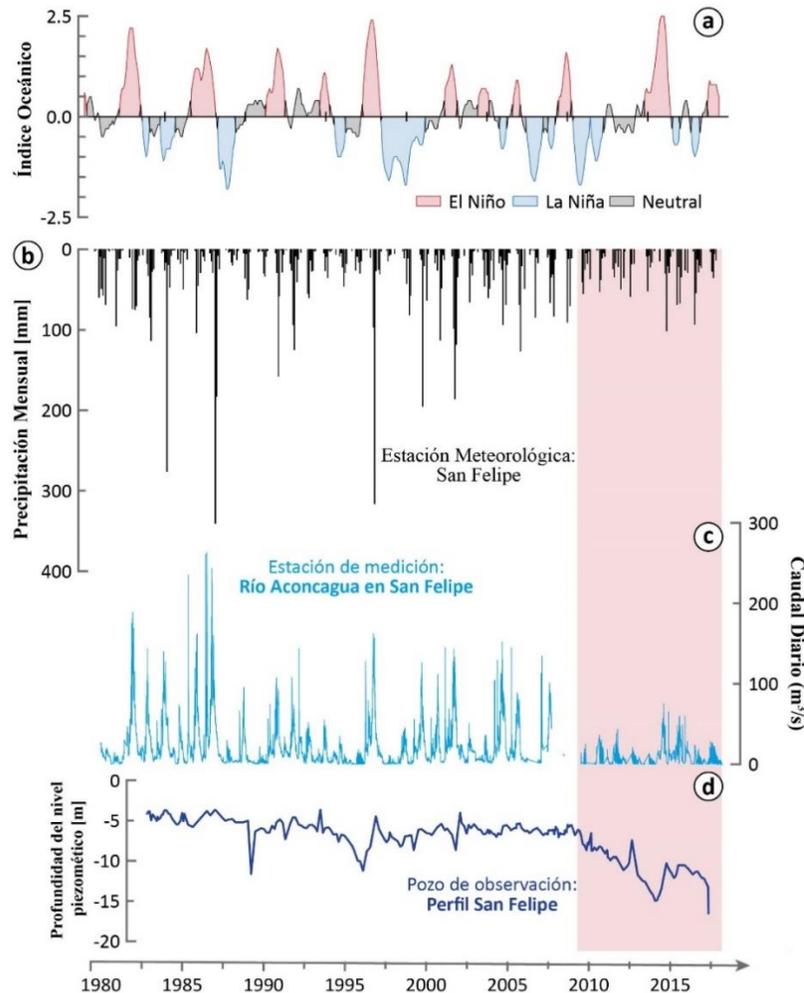


Figura 5. Contexto hidrológico en la cuenca del Aconcagua. Series temporales hidroclimáticas desde 1980 hasta la actualidad: a) Índice del Niño Oceánico (NOAA/Servicio Meteorológico Nacional, 2019); b) precipitación mensual en la estación meteorológica "San Felipe"; c) caudal diario del río en la estación de aforo "Río Aconcagua en San Felipe"; d) profundidad del nivel freático en el pozo de observación "Perfil San Felipe". En rojo se destaca la "Megasequía" de Chile Central. Modificado de Taucare et al., 2020.

Los caudales de agua en el río Aconcagua han variado significativamente desde el 2010. Se calcula un promedio de 26.56 [m³/s] desde el año 2005 hasta el 2009. No obstante, el último registro de caudal medido en la estación Río Aconcagua en San Felipe el 2020 muestra un caudal promedio de 3.07 [m³/s]. A su vez los valores de precipitación, antes del año 2010 presentaban valores de 15.21 [mm] promedio, sin embargo, desde ese año hasta el 2020 las precipitaciones presentan un promedio anual de 10.04 [mm]. Todos estos valores han afectado los niveles estáticos de agua que registran descensos de hasta 10 [m] de profundidad desde el año 2010 a la actualidad.

2.5. Situación Socioeconómica y Usos de suelo

El valle del Aconcagua se distingue por su dedicación productiva relacionada con la agricultura, esto se debe a la existencia de múltiples y extensas subcuencas y valles entre montañas de altura media y baja, así como el lecho de la depresión, lo cual resulta en un suelo con una aptitud agrícola sobresaliente (Soto Bäuerle et al., 2011). El área de la cuenca destinada al uso agrícola es de un 12% de la superficie total, con un 41% de la producción total de paltos del país, de plantaciones en terrenos con grandes pendientes y prácticas de manejo rentables a la producción, principalmente de exportación.

La zona de la Depresión central se encuentra dominada por extensas áreas agrícolas, abarcando aproximadamente 346.38 [km²] en total. Además, se extienden praderas y matorrales en una superficie aproximada de 722.94 [km²]. En términos de áreas urbanas, estas ocupan alrededor de 52.67 [km²], siendo las comunas de San Felipe y Los Andes las más pobladas, con una población de 76,844 y 66,708 respectivamente, según datos del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) del año 2017. En menor medida, también se pueden observar zonas con presencia de bosques, humedales, cuerpos de agua, nieves y glaciares.

Las principales actividades económicas en la zona incluyen la agricultura, la minería y la industria. La agricultura se centra en los alrededores de las ciudades de San Felipe y Los Andes, donde los cultivos principales son cereales. En relación con esta actividad, es notable la presencia de una cantidad significativa de canales en el valle, que proporcionan riego a las áreas agrícolas y se originan en el río Aconcagua (Figura 1). En cuanto a la actividad industrial, la minería metálica juega un papel destacado, especialmente la extracción de cobre fino en áreas de Los Andes y Catemu. Esta explotación minera es llevada a cabo por empresas como la minera Andina, División de Codelco Chile (cobre y molibdeno), y la Compañía Minera Disputada de Las Condes Ltda. (cobre) (DGA, 2004).

Capítulo 3: Metodología

3.1. Recopilación de Antecedentes

Se recompila la información pública de los principales organismos estatales encargados de la administración del recurso hídrico en Chile.

Parte de la compilación de datos consiste en la búsqueda y ordenamiento de antecedentes de derechos de agua y niveles estáticos obtenidos del inventario de datos de la Dirección General de Aguas (DGA). En base a estos se realizan tablas, gráficos y mapas presentes en la sección de Resultados. El análisis de derechos de agua se realizó utilizando la base de datos de Derechos de Aprovechamiento de Aguas registrados y obtenidos en la plataforma web de la DGA. Para llevar a cabo este análisis se siguieron los siguientes pasos:

1. Filtro según tipo de derecho. Para el estudio solo se consideraron los derechos de otorgamiento consuntivos, los cuales facultan a su titular consumir totalmente las aguas en cualquier actividad. Representan el consumo total del caudal de agua solicitado sin restitución alguna.

2. Estandarización de unidades de caudal. Dada la variabilidad de unidades de caudal registrados por derecho (L/s, L/min, L/día, L/h, L/mes, m³/s, m³/año, Mm³/año, acciones, %) se estandarizaron las unidades a m³/s. Vale señalar que los derechos registrados en unidades de acciones y porcentaje de acciones fueron considerados únicamente si se indicaba la equivalencia en caudal, en caso contrario estos datos no fueron considerados.

3. Filtro espacial. Este paso se realizó para analizar únicamente los derechos ubicados dentro del área de interés. Para llevar a cabo este paso fue necesario estandarizar el datum de los derechos de otorgamiento de agua, ya que se encuentran registrados con distintos datum (WGS84-geográficas, PSAD56-UTM, SAD69-UTM, WGS84-UTM) y husos (18°S y 19°S). Entonces, se llevó a cabo una reproyección de los datos y recálculo de las nuevas coordenadas en QGIS v.3.18.3 considerando como datum estándar el WGS84-UTM19S. Vale señalar que aquellos datos que no contaban con registro de coordenadas no fueron considerados en este estudio.

Una vez filtrados los datos y estandarizadas las unidades de caudal y espacial de los registros de Derechos de Aprovechamientos de Aguas, se llevó a cabo un análisis de variabilidad espacio-temporal y de tipo de uso del derecho.

3.2. Trazado de isopiezas

La piezometría del área de estudio se realiza mediante 25 datos obtenidos en la campaña de terreno, en el cual se midieron los niveles de agua subterránea mediante un piezómetro. Esta información se complementa con 28 datos obtenidos del inventario de datos de la DGA. Para el trazado de las isopiezas se utiliza los valores de la cota hidráulica, teniendo como referencia el nivel del mar. Para llevar a cabo este proceso, se utiliza el software QGIS y se realiza una interpolación de

los datos utilizando el complemento de SAGA-GIS y el método de interpolación multilevel b-spline. Este método se basa en la utilización de funciones de interpolación b-spline, que son funciones matemáticas que se ajustan a los datos disponibles y permiten estimar valores desconocidos dentro de una región.

3.3. Determinación del Background Geológico

El background natural o (NBLs), por sus siglas en inglés (Natural Background Values), proporcionan información crucial sobre la concentración de un determinado elemento, especie o sustancia química presente en una solución derivada de procesos naturales, que tienen su origen en fuentes geológicas, químicas, biológicas y atmosféricas (Müller et al., 2006). Estos valores basales naturales nos permiten establecer comparaciones y determinar si los niveles de concentración de ciertos compuestos químicos están dentro de los límites considerados como naturales y propios del ambiente, o si, por el contrario, se encuentran alterados debido a actividades humanas. (Nieto et al., 2005). Son una herramienta esencial en la evaluación de la calidad del agua subterránea y la identificación de posibles impactos antropogénicos en los recursos hídricos.

En este estudio se utiliza el método desarrollado en el marco del proyecto "BRIDGE" (Background cRiteria for the Identification of Groundwater thrEsholds) de la Unión Europea, el cual fue iniciado en 2005. El objetivo principal de este proyecto fue desarrollar una metodología para determinar los NBL de las aguas subterráneas. La metodología desarrollada ha sido exitosamente probada en varios estudios, como los realizados por Coetsiers et al., 2009, Hinsby et al., 2008; Marandi & Karro, 2008 Parrone et al., 2019; Preziosi et al., 2010; Wendland et al., 2008, y Zabala et al., 2016. La aplicación exitosa de esta metodología en numerosos estudios respalda su validez y relevancia en la determinación de valores umbrales para las aguas subterráneas.

Esta metodología utiliza una preselección simplificada que se define como el percentil 90 o 97,7 de un conjunto de datos cuidadosamente seleccionados. Estos datos se eligen de manera que representen aproximadamente la composición natural de las aguas subterráneas en un acuífero específico. Esta aproximación se aplica especialmente cuando no existe una metodología nacional establecida para la derivación de los NBL.

La elección del percentil 90 o 97,7 se basa en consideraciones relacionadas con la cantidad y calidad de los datos disponibles (Müller et al., 2006). En situaciones en las que se cuenta con una gran cantidad de datos (más de 60 puntos de muestreo) que representan aguas subterráneas con una composición natural, se prefiere utilizar el percentil 97,7. Por otro lado, cuando se dispone de conjuntos de datos más pequeños o cuando no se puede descartar la influencia humana en los datos, se sugiere utilizar el percentil 90 (Müller et al., 2006). Esta elección del percentil se realiza con el objetivo de obtener un valor de referencia que refleje de manera adecuada la composición natural del agua subterránea en función de la disponibilidad y fiabilidad de los datos recopilados.

En el proceso de preselección se aplican ciertos criterios para filtrar las muestras y garantizar la calidad de los datos obtenidos. Estos criterios incluyen:

1. Eliminar las muestras que no cumplan con la validación de los datos químicos, ya que esto indica posibles inconsistencias en los datos recopilados.

2. Excluir las muestras de profundidad desconocida, ya que es importante tener una información precisa sobre la ubicación de las muestras para un análisis adecuado.
3. Descartar las muestras que no puedan atribuirse a una tipología de acuífero específico, ya que esto podría introducir sesgos en los resultados.
4. Excluir muestras provenientes de sistemas hidrotermales, ya que estos pueden tener características químicas y geológicas particulares que los diferencian de los acuíferos convencionales.
5. Descartar las muestras de acuíferos salinos con concentraciones de Na+Cl superiores a 1.000 [mg/L], ya que estas muestras representan condiciones químicas diferentes a las de interés.
6. Eliminar los análisis de aguas subterráneas que presenten concentraciones de nitrato (NO_3^-) superiores a 10 [mg/L], con el objetivo de eliminar las muestras contaminadas.

Además, para garantizar una representación equitativa de los datos, las series temporales se sustituyen por los valores medios de los distintos análisis. Esto se realiza para asegurar que cada punto de muestreo tenga la misma contribución en la base de datos y evitar sesgos debido a mediciones repetidas en el mismo punto. Estos criterios de preselección se aplican con el propósito de asegurar la calidad y la fiabilidad de los datos utilizados en el análisis de las muestras de agua subterránea.

Teniendo en cuenta la información anterior y la disponibilidad de datos, se opta por preseleccionar y filtrar los datos químicos de los manantiales para obtener el umbral natural del área de estudio. Se considera que estos manantiales están potencialmente menos afectados por influencias antropogénicas, lo que podría ayudar a obtener valores de fondo más representativos y aceptables. Finalmente se utilizarán 37 muestras de manantiales, cantidad de datos óptimos para definir el percentil 90 como el background. Al aplicar esta estrategia de selección de datos y utilizar el percentil 90, buscamos asegurar que los valores de fondo obtenidos reflejen de manera más precisa la composición química natural de los manantiales, permitiéndonos establecer una referencia confiable para futuros análisis y evaluaciones en el contexto de nuestro estudio. Por último, para visualizar y obtener el percentil 90 se utilizarán los gráficos de caja.

3.4. Muestreo de Agua y Análisis de Laboratorio

Se realiza una campaña de terreno en la parte alta de la cuenca del río Aconcagua, específicamente dentro de lo actualmente definido como el acuífero aluvial de San Felipe, durante el mes de febrero del 2022. En esta campaña se obtienen un total de 25 datos, entre los cuales 21 corresponden a muestras de pozos, 3 muestras de canales y 1 muestra de río. Para cada muestra se mide in situ parámetros fisicoquímicos con un multiparámetro portátil; pH, temperatura y conductividad eléctrica. La compleción de la base de datos y muestras de agua subterránea (pozos y manantiales) y superficiales (ríos y canales) se realiza mediante la información obtenida de las muestras tomadas durante las campañas de terreno del Dr. Matías Taucare realizadas durante los meses de febrero, julio y septiembre del 2018, febrero del año 2017.

Para el análisis hidrogeoquímico en cada muestra se utilizan tres botellas de polietileno de alta densidad de 125 [ml] previamente limpiadas. Estas botellas corresponden a i) **isotopos estables de agua**, ii) **aniones/sílice** y iii) **cationes/elementos trazas**. Para analizar aniones, cationes, sílice y oligoelementos se utiliza un filtro de 0.45 [μm], mientras que para realizar el análisis de isotopos estables se recogen muestras de agua sin filtrar. Con el fin de conservar correctamente los cationes y oligoelementos, se acidifica las botellas correspondientes con 1.50 [ml] de HNO_3 Suprapur® (4,0 N). Finalmente, todas las muestras se conservan a 4°C en neveras portátiles.

Los isótopos estables del agua (^{18}O , ^2H) se analizaron en la Estación Experimental de Zaidín del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (Granada, España) mediante un espectrómetro de masas Finnigan Delta Plus XL con una incertidumbre analítica de $\pm 0,10\text{‰}-\delta^{18}\text{O}$ y $\pm 1,10\text{‰}-\delta^2\text{H}$ VSMOW.

Los análisis hidrogeoquímicos (incluyendo aniones, cationes, sílice y elementos traza) se realizaron en el Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) de la Universidad de Chile (Santiago, Chile). Los contenidos de aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , F^-) se determinaron por cromatografía iónica (IC, 861 Compact IC Metrohm). Los contenidos de cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) y sílice (SiO_2) se midieron por Espectrofotometría de Absorción Atómica (F-AAS, Perkin-Elmer PinAAcle 900F). Los contenidos de elementos traza (Li, B, Al, Cr, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, Mo, Cd, Cs, Ba, Hg, Pb, U) se determinaron por Espectrometría de Masas de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS, Thermo iCAP Q).

3.4.1. Validación de los análisis químicos

Se comprueba la precisión del análisis químico mediante el cálculo manual del porcentaje de error del balance iónico de las especies mayores (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , NO_3^-). Este porcentaje se obtiene aplicando la siguiente fórmula, en donde las concentraciones de los elementos químicos se encuentran en [meq/L].

Ecuación 1

$$\text{Error de Balance Iónico (\%)} = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \times 200$$

Basado en el principio de electroneutralidad, el error admisible debe ser menor a $\pm 5\%$ (Apelo & Postma, 2005), sin embargo, este límite puede variar considerando la Conductividad Eléctrica del agua (CE).

Tabla 1. Error admisible según conductividad eléctrica

Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	<50	200	500	2000	>2000
Error admisible (%)	30	10	8	4	4

EL error admisible es mayor para las muestras con CE baja mientras que para muestras con CE alta el error admisible es menor. Esto se debe a que a menor conductividad eléctrica se espera un menor contenido iónico y, en consecuencia, aumenta el error en la detección de estos. Las muestras que presentan un porcentaje de error del balance iónico entre los límites ya mencionados son consideradas aceptables, mientras que el resto de las muestras no son consideradas para los análisis posteriores de este estudio porque podría significar que la concentración de alguna o varias especies iónicas pueden estar sobreestimadas o subestimadas. Para el área de estudio, se observa en la Tabla 8. del Anexo A, que el error de balance iónico es admisible para todas las muestras.

3.5. Hidrogeoquímica y Análisis Estadístico Multivariante

Como primera etapa se realiza un Análisis Exploratoria de Datos (AED). Este permite organizar y preparar datos, identificar casos atípicos y comprobar los supuestos necesarios para los siguientes pasos dentro de la etapa del análisis estadístico (Salvador y Gargallo, 2003). Con ello también se consigue una primera visualización y entendimiento de las variables en cuestión. Existen diferentes técnicas que utilizan el análisis exploratorio de datos, entre ellas se encuentran las técnicas gráficas que permiten mostrar las características y propiedades implícitas en los parámetros analizados. Dentro de los métodos más comunes de este tipo se encuentran los histogramas, los diagramas de puntos, diagramas de bloques, diagramas de medias y los diagramas de cajas o box plots (Daniele, 2007). Para el presente estudio se ocupa el análisis mediante la elaboración de diagramas cajas para parámetros fisicoquímicos, elementos mayoritarios y trazas. Posterior a esta etapa, se utilizan técnicas típicas aplicadas al análisis hidrogeoquímico, tales como la elaboración de diagramas Piper y diagramas Stiff, realizados en el programa Geochemist's Workbench (GWB).

Para estudiar las distintas relaciones entre iones, elementos, oligoelementos y parámetros fisicoquímicos se realiza un análisis de correlación. Este método se aplica para describir el grado de relación entre dos parámetros. Un alto coeficiente de relación entre dos variables posee valores cercanos a 1 (o -1, correlación inversa), por el contrario, un valor próximo a cero indica una ausencia de relación. Se definirá un $r > |0.7|$ para indicar una alta correlación, entre $|0.5|$ y $|0.7|$ una correlación moderada, entre $|0.3|$ y $|0.5|$ una correlación débil y menor a $|0.3|$ una escasa o nula correlación. De acuerdo con los resultados de la matriz de correlación se realizan los distintos diagramas binarios entre los elementos que presenten una mayor correlación para ser analizados.

Tras esta etapa, se empleará los análisis estadísticos multivariantes con el fin de agrupar las muestras de agua de acuerdo con sus similitudes hidrogeoquímicas (análisis jerárquico de conglomerados o HCA), y para estudiar las correlaciones entre los iones disueltos analizados (análisis factorial o FA). Esta metodología ha sido utilizada por diversos autores en estudios hidrogeológicos (Daniele et al., 2020; Moeck et al., 2016a; Taucare et al., 2020), y se realizarán mediante el software IBM SPSS Statistics V26®. En cuanto a la etapa de procesamiento de los datos, se realizó un filtro como el explicado en Cloutier et al., 2008, el cual consistió en eliminar características aditivas como la conductividad eléctrica, variables con un número elevado de muestras por debajo del límite de detección, variables que no se analizaron en todas las muestras (por ejemplo, $\delta^{18}\text{O}$ y δD y variables con variaciones espacial no significativas como la temperatura y pH. Para el análisis estadístico multivariante, los parámetros con valores de concentración inferiores al límite de detección tienen que ser reemplazados. Existen varios métodos para reemplazar estos datos (Güler et al., 2002), para este estudio se optó por sustituir los datos por la mitad del límite de detección (Farnham et al., 2002). Luego, para minimizar o eliminar la presencia de valores atípicos y el alto sesgo, típico de los datos de composición (Filzmoser et al., 2009), se aplicó la transformación logarítmica en los datos sin procesar antes del análisis multivariante. Finalmente, todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 , Ni y Sr como variables.

Para el análisis jerárquico de conglomerados se utilizó como medida de distancia o medida de similitud entre los sitios de muestreo, la **distancia euclidiana** de los datos. En primer lugar, se agrupan los sitios de muestreo con mayor similitud, luego estos grupos de muestras se unen con una regla de vinculación y los pasos se repiten hasta que se hayan clasificado todas las observaciones. Como regla de vinculación se utilizó el **método de Ward**, el cual establece grupos de tal forma que la suma de los cuadrados de las desviaciones con respecto a la media de cada variable es mínima para todas estas (Castro Heredia et al., 2012). Al utilizar este método en las muestras correspondientes, se lograron formar grupos que son más o menos homogéneos y con características geoquímicas distintas. Otros estudios utilizaron el método de Ward como regla de ligamiento en su análisis de conglomerados (Güler et al., 2002; Taucare et al., 2020a) también encontraron que el uso de la distancia euclidiana como medida de distancia y el método de Ward como regla de vinculación produjeron los grupos más distintivos.

Para determinar los factores que explican la varianza de las variables geoquímicas se utilizó el test de Medida Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), el cual indica la proporción de esta varianza. Se considera que valores altos (cerca de 1.0) indican un análisis factorial adecuado, valores menores a 0.5 se considera un resultado que no será útil. En este estudio el valor de KMO de **0.61** garantiza la aptitud del análisis para los datos. Para que el análisis sea preciso, los factores deben tener valores propios superiores a uno. Los factores se rotaron utilizando el método Varimax para maximizar la varianza de la carga al cuadrado de cada factor. Por último, el peso de las variables en cada factor es relevante si es > 0.50 .

Tabla 2. Resultados de la prueba de esfericidad de Bartlett y del índice KMO.

Prueba de KMO y Bartlett		
Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0.611
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	567.883
	gl	45
	Sig.	0.000

3.6. Análisis Geoestadístico

El análisis geoestadístico para representar espacialmente los resultados obtenidos del análisis multivariante se hace a través de la interpolación mediante el método Kriging Ordinario. Para ello se utilizan las herramientas geoestadísticas que proporciona el software de Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGIS. Para llevar a cabo el modelo geoestadístico se siguieron los siguientes pasos:

1. Análisis exploratorio de los datos, viendo el comportamiento estadístico de las variables a utilizar y su tendencia espacial.
2. Ajuste del semivariograma experimental y teórico respecto a uno Lineal, Esférico, Exponencial y Gaussiano, considerando un comportamiento anisótropo de las variables estudiadas.
3. Validación del modelo mediante el método de validación cruzada y el análisis de los errores del modelo predicho.
4. Interpolación de los datos a través del método de Kriging ordinario por medio del semivariograma que se ajuste mejor a los datos.

3.7. Análisis de Isotopos Estables de Agua

Los isótopos estables del agua han sido ampliamente utilizados para estimar los procesos hidrogeológicos, identificar las áreas que contribuyen a la recarga de las aguas subterráneas y evaluar el mecanismo de recarga (Custodio & Jódar, 2016; Daniele et al., 2020; Taucare et al., 2020). El análisis isotópico del presente estudio considerará los isótopos $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ para determinar fuentes y zonas de recarga al sistema acuífero aluvial de San Felipe. Para ello se compara los resultados de las muestras isotópicas con respecto a la línea de agua meteórica local (es decir, la línea de referencia que refleja las variaciones isotópicas de la precipitación de una zona determinada) y el gradiente de elevación desarrollado en los Andes a la latitud 33°S (33°S Chile MWL; Taucare et al., 2020a). Para el estudio se ocupa un total de 30 muestras de pozos, 64 muestras de manantiales, 43 muestras de ríos y 3 muestras de canales.

Capítulo 4: Resultados y discusiones

4.1. Extracciones

La base de datos de extracciones de agua subterránea se obtuvo mediante la información en línea que proporciona la DGA. En ella se informa del expediente del derecho de agua concedido, las coordenadas geográficas, el nombre del usuario asociado, el año, el uso que se le da a este derecho, su caudal entre otra información relevante.

4.1.1. Evolución Temporal

En primer lugar, la Figura 6.a) resume el valor del caudal máximo otorgado por cada año desde 1991 hasta el 2022. Como se logra observar no existe una relación entre las variables anteriormente mencionadas, no obstante, se destaca un peak en el año 2001 y 2018, donde el volumen de caudal otorgado alcanza un valor máximo de 0.211 y 0.274 [m³/s] respectivamente. Desde el año 1991 hasta el 2000 se tiene un caudal de 0.10 [m³/s] como máximo otorgado, distinguiéndose valores nulos en los años 1993 y 1994. Entre los años 2002 y 2017 no se destaca ningún rango anómalo, solo mencionar que existen caudales sobre los 0.10 [m³/s]. Finalmente, desde el 2020 se observan extracciones por sobre los 0.15 [m³/s].

En el gráfico de la Figura 6.b) se despliega información incluyendo la cantidad de derechos otorgados por cada año. Desde el año 2014 existe un aumento considerable en la cantidad de derechos otorgados, a diferencia de lo observado con respecto a los años anteriores, los cuales no se superan la cantidad de 12 extracciones concedidas. El mayor peak se presenta nuevamente en el año 2018, con un total de 50 derechos, seguido por el año 2021 con 41.

En Figura 6.c) se muestra la suma de los caudales del total de los derechos otorgados por año. De esta forma queda claramente evidenciado que los años 2018 y 2021 poseen una mayor relevancia en la extracción de agua subterránea del acuífero aluvial de San Felipe. Finalmente, el gráfico de la Figura 6.d) evidencia el caudal acumulado desde el año 1991 hasta el 2022, observándose una clara tendencia a un aumento con los años. Se destaca una curva que parte con una pendiente relativamente horizontal hasta el año 1997, aumentando constantemente hasta alcanzar un quiebre importante desde el 2017, coincidiendo con el aumento de la cantidad de caudal extraído del 2018.

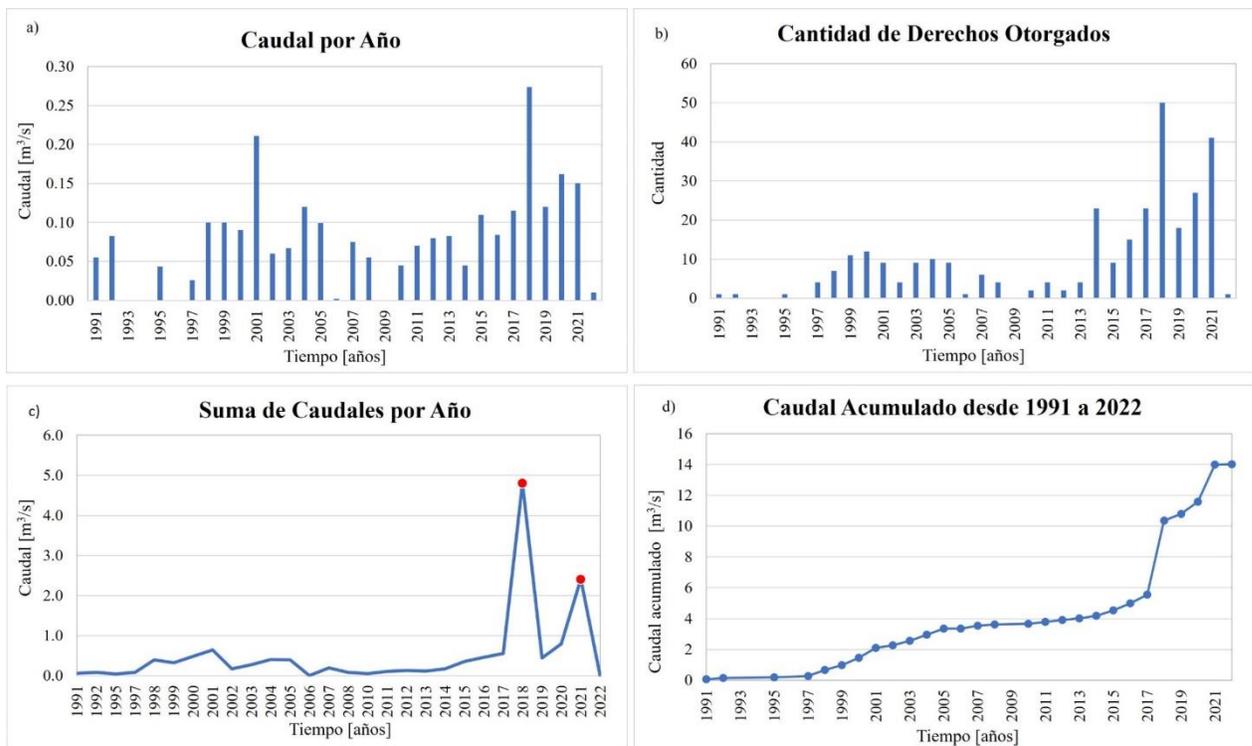


Figura 6. Evolución temporal desde 1991 hasta 2022 de las extracciones de agua subterránea. Fuente: Dirección General de Aguas año 2022.

En resumen, el total de los datos ilustrados en la Figura 6 ejemplifica un aumento significativo en la cantidad de derechos otorgados, lo que constituye un incremento en el volumen de agua subterránea extraída con relación al tiempo. Esto respondiendo posiblemente al desarrollo que se ha dado socioeconómicamente en el valle, en donde ha habido una constante extensión de las zonas destinadas a la producción agrícola (Soto Bäuerle et al., 2011).

4.1.2. Uso, Título y Ejercicio del Agua Subterránea

Cada uno de los derechos de agua, presenta un tipo de uso el cual puede estar dentro de las categorías: agricultura, minería, industria, agua potable y otros. Otro parámetro es la Seguridad del título que se clasifica de acuerdo con la expropiación o renovación del título por parte de las autoridades, siendo un título **Permanente** aquellos inscritos en los Registros de Propiedad de Aguas de los Conservadores de Bienes Raíces, mientras que el título **Provisional** es otorgado por la DGA en los Sectores Hidrogeológico de Aprovechamiento Común que puedan ser declarados áreas de restricción. Por tanto, la DGA como organismo regulador puede limitar o revocar los Derechos de Aprovechamiento de Agua en caso de detectar perjuicios ante ellos.

En cuanto al ejercicio de derecho, existen dos componentes: probabilidad y oportunidad de uso, siendo la primera clasificada como **permanente** cuando se otorga a fuentes no agotadas, y **eventual** que solo faculta para usar el agua en épocas en que el caudal matriz tenga sobrante después de abastecidos los derechos de aprovechamiento de ejercicio permanente. Mientras que la clasificación de acuerdo con la oportunidad será **continuo**, el cual permite el uso ininterrumpido

durante las 24 horas del día, **discontinuo** que permite el uso del agua durante períodos determinados y establecidos, y **alternado** cuyo uso del agua se distribuye entre dos o más personas que se turnan. Estas categorías se pueden combinar entre probabilidad y oportunidad resultando en seis tipos de ejercicio de derecho; Permanente y continuo, Permanente y alternado, Permanente y discontinuo, Eventual y continuo, Eventual y alternado y Eventual y discontinuo. Teniendo en cuenta las categorías mencionadas anteriormente se presentan los siguientes resultados.

Respecto al uso del derecho, se puede mencionar que la agricultura es la actividad que posee caudales con valores notablemente superiores, con un total de 6.085 [m³/s] entre los años 1991 a 2022. Es seguido por otras actividades con 5.962 [m³/s], agua potable con un 1.216 [m³/s], industria con 0.394 [m³/s] y finalmente uso de agua relacionada a labores mineras con un caudal total de 0.354 [m³/s] (Figura 7).

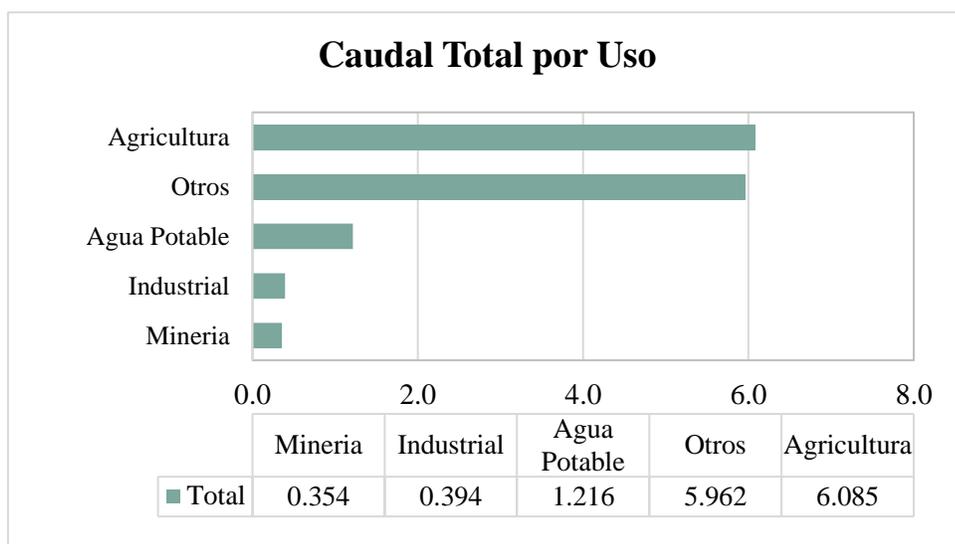


Figura 7. Caudales en [m³/s] otorgados de acuerdo con el tipo de uso. Fuente: Dirección General de Aguas año 2022

Destaca la categoría de *Otros*, ya que posee valores muy cercanos a la actividad económica principal del valle. No obstante, gran parte de estos derechos son designados a Dirección de Obras Hidráulicas de Valparaíso, encargada de la planificación, diseño, construcción y supervisión de obras relacionadas con el manejo y control de los recursos hídricos.

Como se logra observar en la Figura 8, gran parte de la zona de estudio muestra una extracción de agua asociada a un uso agrícola, lo que guarda relación con la información del uso de suelo y la actividad socioeconómica que domina en el valle Aconcagua.

Los derechos asociados al uso de agua potable se encuentran principalmente al este de la ciudad de Los Andes y San Felipe, así mismo el uso industrial se encuentra concentrado en las zonas urbanas ya mencionadas. Destaca la concentración de los puntos asociados al uso en categoría de otros usos, debido que estos se ubican en la zona media del curso del río Aconcagua y próximas a la ciudad de San Felipe, lo cual probablemente tiene relación con proyectos en el río desarrollados por la Dirección de Obras Hidráulicas.

Finalmente se observan dos puntos asociados a la actividad minera.

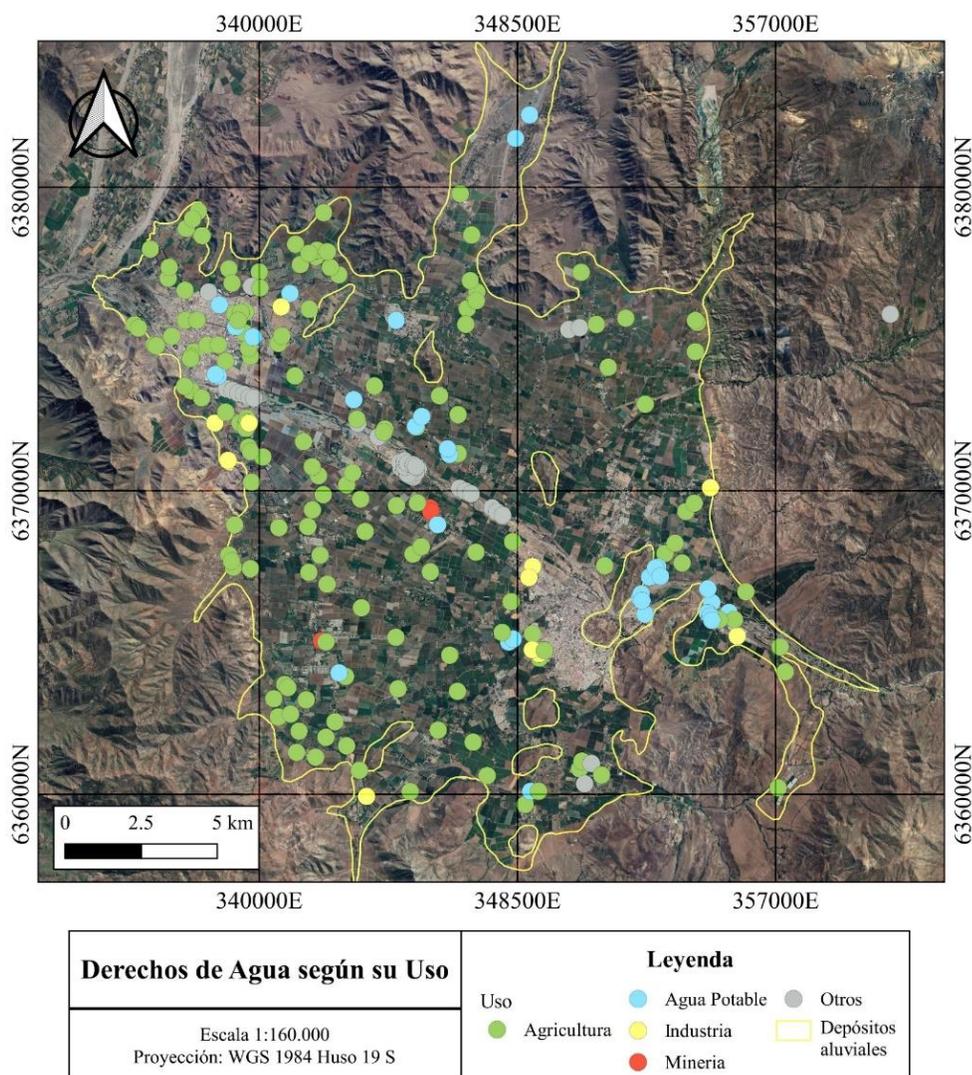


Figura 8. Distribución de los derechos de agua en el valle según su uso.

El resultado anterior resalta la importancia del agua como recurso vital para la producción agrícola y subraya la interdependencia entre el recurso hídrico y la actividad socioeconómica en el área de estudio. Es necesario tener en cuenta esta relación al tomar decisiones vinculadas con la gestión y la planificación de los recursos hídricos, a fin de garantizar un equilibrio adecuado entre la disponibilidad de agua y las necesidades agrícolas de la región.

Particularmente, al analizar la evolución de los usos de los derechos de agua subterránea por década, se pueden obtener los siguientes resultados:

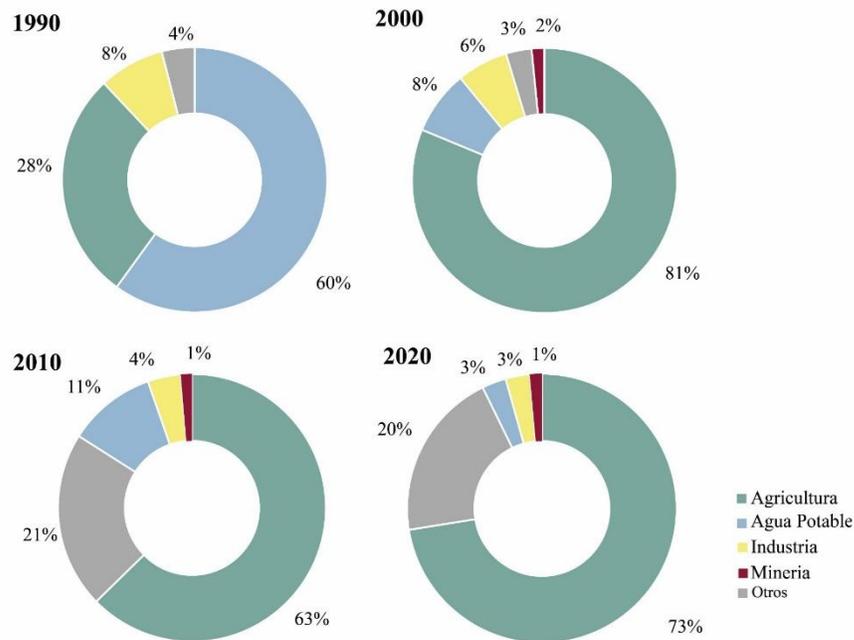


Figura 9. Diagrama de tortas con el uso de los derechos de agua desde la década de 1990 hasta el 2020

Donde se logra observar que en la década del 90 hay un 60% de derechos otorgados a agua potable seguido por la agricultura. No obstante, desde el 2000 esto cambia, manteniéndose la agricultura como la actividad principal de derechos de aprovechamiento de agua subterránea, teniendo un porcentaje máximo de 81%. En los últimos años, se ha observado una tendencia a la disminución del porcentaje de extracciones de agua subterránea destinada al consumo de agua potable, representando aproximadamente el 20% del total. Por otro lado, el sector industrial no supera el 8% de las extracciones totales de agua subterránea. En cuanto a la minería, su participación en las extracciones de agua subterránea ha sido mínima, comenzando a tener un porcentaje significativo a partir del año 2000, alcanzando un máximo del 2% en ese mismo año. Estos resultados indican una distribución variada en el uso de los derechos de agua subterránea a lo largo de las décadas analizadas, con el consumo de agua destinado a la agricultura como principal usuario.

En relación con la seguridad del título, se puede observar en la Figura 10 que desde 1990 hasta 2009 los títulos de agua tenían un carácter perpetuo, es decir, eran registrados como derecho de propiedad. Sin embargo, a partir del año 2010, se ha vuelto relevante la emisión de títulos de carácter provisional, los cuales tienen una validez limitada. Estos títulos representan aproximadamente el 28% del total de títulos emitidos, lo que indica un cambio significativo en el enfoque de la seguridad de los derechos de agua. Este porcentaje se mantuvo relativamente constante hasta el año 2019. A partir del año 2020, se observa un ligero descenso en la emisión de títulos provisionales, representando aproximadamente el 9% del total de títulos emitidos. Esta disminución sugiere una mayor estabilidad en la seguridad de los derechos de agua, aunque es importante tener en cuenta que aún se emiten títulos provisionales en cierta medida.

Estos resultados destacan la evolución en la seguridad de los títulos de agua a lo largo del tiempo, con una transición hacia la emisión de títulos provisionales en lugar de títulos perpetuos. Este cambio puede reflejar la necesidad de una gestión más dinámica y adaptable de los recursos hídricos, así como la implementación de medidas para asegurar un uso sostenible y equitativo del agua en el tiempo.

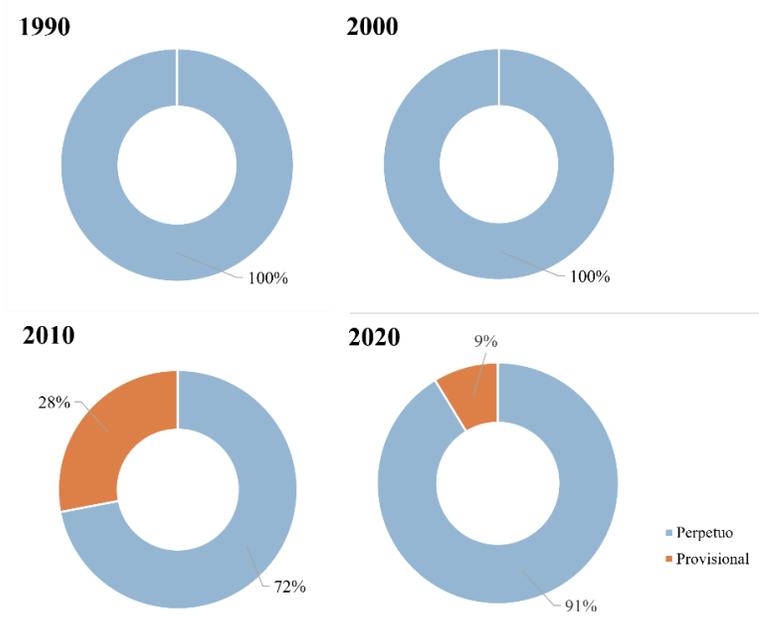


Figura 10. Diagrama de torta de Seguridad de Título por década desde el 1990 hasta el 2020.

Por último, el Ejercicio de Derecho muestra una tendencia clara a considerar fuentes de agua no agotadas en el cual se ejerce un derecho de carácter continuo, por lo tanto, se destaca la categoría PC representada en azul como ejercicio Permanente Continuo desde el año 1990 hasta la actualidad. En la década del 2010 se registra un leve cambio perteneciente a un 1% de ejercicio de carácter Permanente Discontinuo (PD). Finalmente, en el 2020 se sigue con el predominio del ejercicio Permanente Continuo con lo distinción que se comienza a otorgar derechos de carácter Eventual y Continuo.

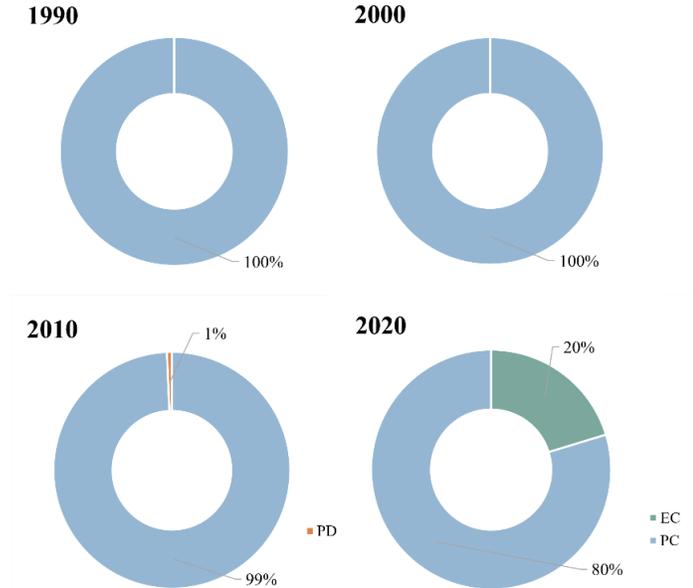


Figura 11. Diagrama de torta de Ejercicio de Derecho por década desde el 1990 hasta el 2020.

4.1.3. Análisis Espacio Temporal.

Con un total de 308 datos de Derechos de Agua relacionados al área de estudio se genera una serie de composiciones de mapas que muestran su evolución temporal por década. La Figura 12 representa la totalidad de los datos desde el año 1991 hasta abril del año 2022. El color de los datos representa el caudal otorgado en L/s, siendo el color azul asignado al menor caudal y el color rojo el mayor valor registrado.

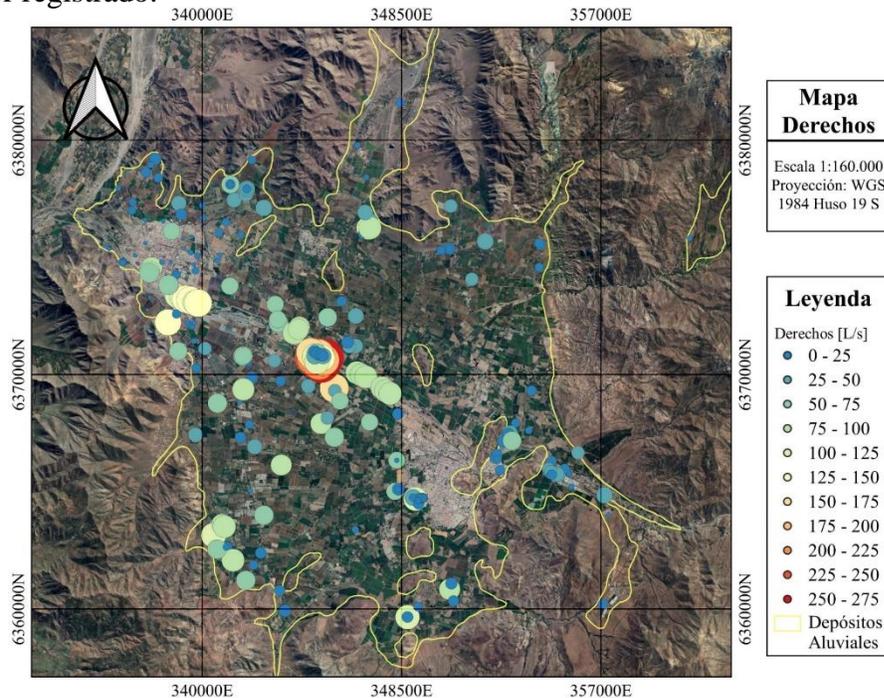


Figura 12. Mapa de ubicación de los datos correspondientes a los Derechos de Agua. Información obtenida de la DGA

Como se logra observar, existe una concentración de datos en la zona central del acuífero aluvial siguiendo el curso del río Aconcagua donde se registran principalmente caudales que van desde los 75 [L/s] hasta valores máximos de 275 [L/s] aproximadamente. En las zonas más próximas al piedemonte y en las zonas más pobladas (San Felipe) existen derechos de agua con caudales menores de 25 [L/s] hasta 50 [L/s] aproximadamente. No se observa una distribución clara de los puntos con caudales menores a 25 [L/s] pero si existe una mayor concentración de estos en la ciudad de San Felipe.

La Figura 13 presenta el mapa espacio temporal de los derechos otorgados acumulados desde el año 1990 hasta la década del 2020. En la Figura 13.a) se distingue una mínima cantidad de extracciones de aguas subterráneas, específicamente un total de 25 derechos cuyos caudales no superan los 100 [L/s]. Espacialmente estos se localizan en zonas pobladas, alrededor del río principal y cerca del piedemonte. En el año 2000, se acrecienta la cantidad de datos, mostrando una notoria concentración en zonas más rurales al sur del área de estudio. Destaca un dato en color anaranjado, representando un aumento en el caudal otorgado correspondiente a 211 [L/s]. Desde el 2010 se suman un total de 150 derechos otorgados (Figura 13.c) donde se observan nuevos pozos de extracción alrededor del río, alcanzándose un peak de 274 [L/s], además se sigue condensando mayor cantidad de puntos en la zona sur de los depósitos aluviales y hay una mayor consolidación de extracciones cercanas al piedemonte. Por último, desde el 2020 se suman 69 pozos con derecho

a extracción de agua subterránea de los cuales gran parte se concentra en torno al cauce del río Aconcagua, pero cercano a las zonas pobladas de San Felipe y Los Andes. Destaca que, en esta última ciudad a diferencia de San Felipe, no se observen derechos.

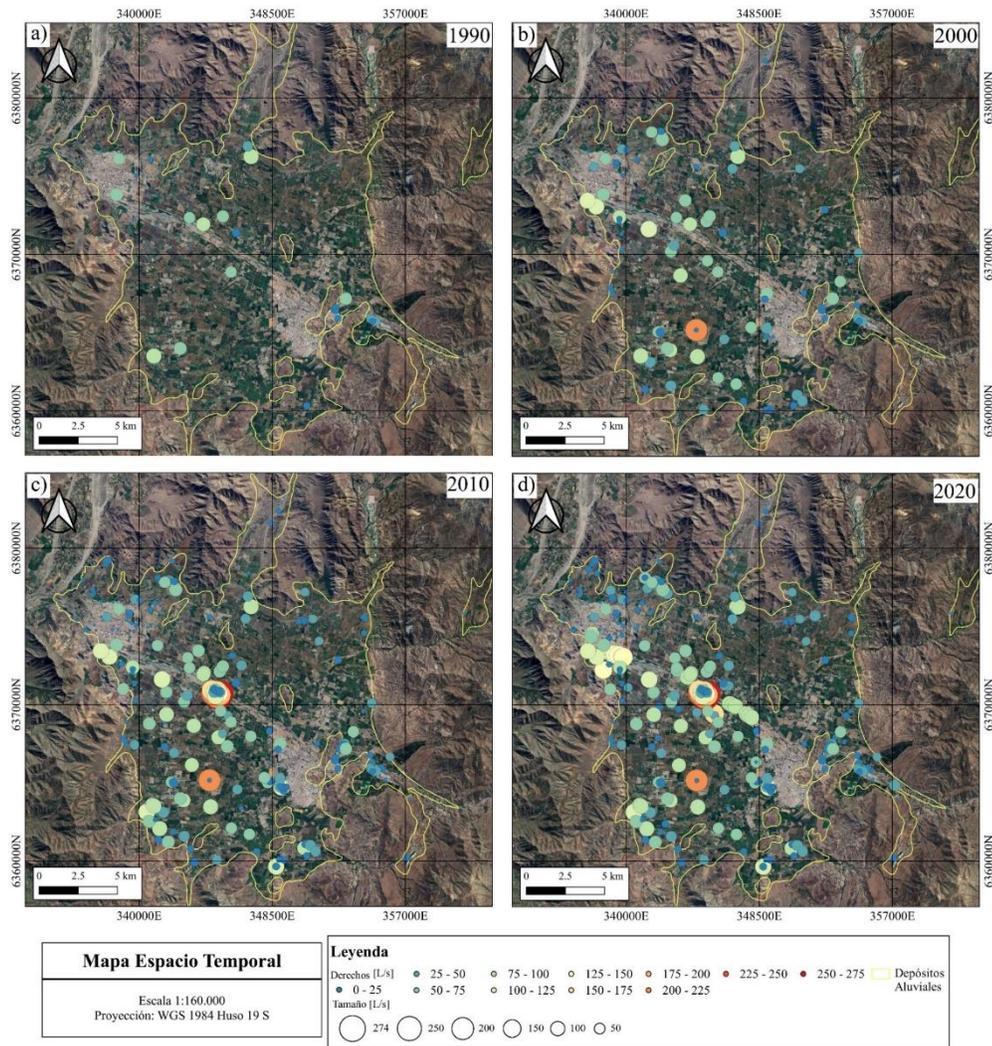


Figura 13. Mapa de los derechos de agua de acuerdo con su distribución espacial por década, desde el 1990 hasta el 2020

4.2. Piezometría

En el área de estudio, se ha establecido un inventario de 53 puntos de captación de agua subterránea. Estos puntos están categorizados y georreferenciados en la Tabla 9 del Anexo B. De estos puntos, 28 pozos son supervisados por la Dirección General de Aguas (DGA), mientras que el resto de los datos se obtuvieron en terreno durante febrero de 2022.

En la Figura 14 se puede observar la ubicación de todos los puntos, siendo los pozos de la DGA representados en color verde. Estos pozos se encuentran principalmente alrededor del río principal. Por otro lado, los datos obtenidos en terreno se muestran en color rojo y abarcan desde el piedemonte hasta el valle. Estos datos revelan una mayor distribución en el área cubierta por los depósitos aluviales.

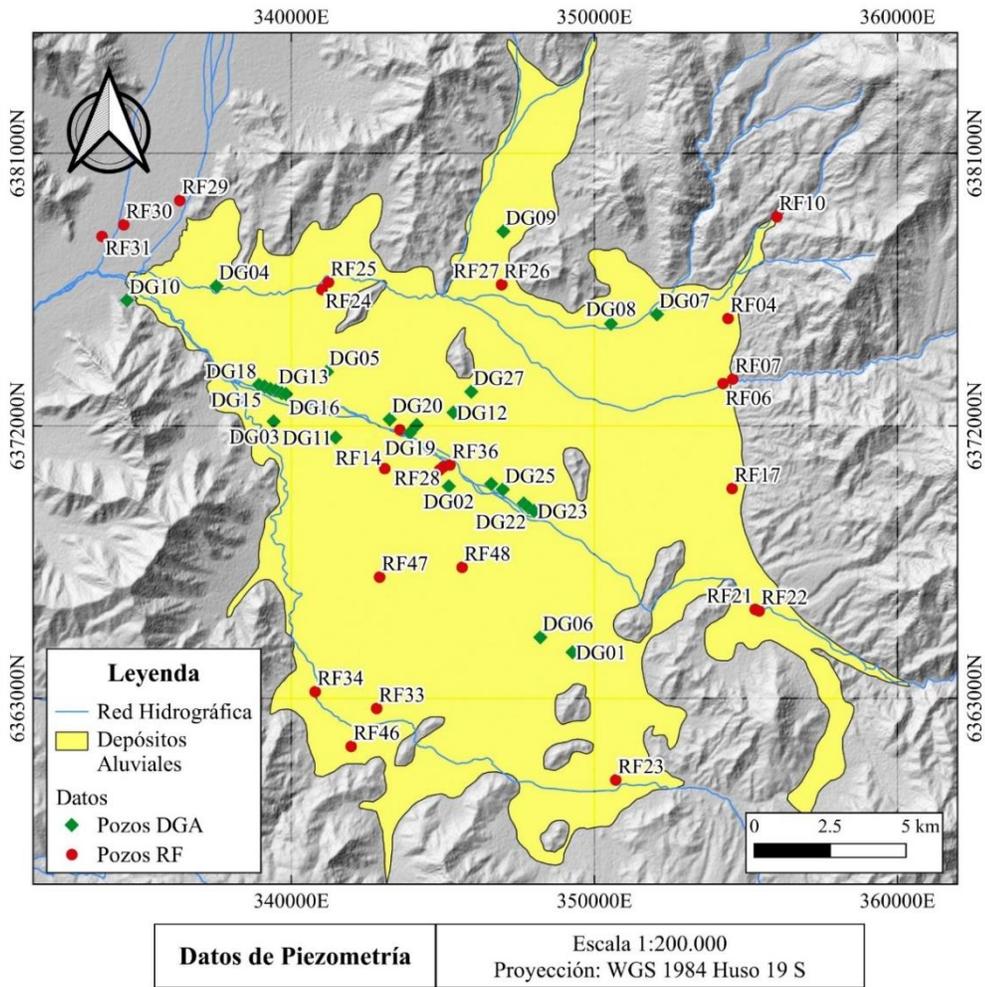


Figura 14. Mapa de ubicación de los pozos supervisados por la DGA y de los pozos medidos durante la campaña de terreno febrero 2022, junto con la Red Hidrográfica obtenida de la BCN.

El nivel piezométrico del total de datos mencionados permitió establecer la superficie piezométrica del área de estudio, la cual se representa por líneas equipotenciales definidas como curvas llamadas **isopiezas**. Esta superficie piezométrica proporciona información respecto de la evolución

espacial de la profundidad del agua desde la superficie del terreno, del sentido y valor de los gradientes hidráulicos, la dirección y sentido del flujo de agua subterránea, entre otros aspectos relevantes.

En la Figura 15 se presenta el mapa de isopiezas de la zona de estudio. Las isopiezas muestran una discontinuidad en los bordes del depósito aluvial, lo cual refleja una simplificación de las isopiezas. Aunque las líneas trazadas proporcionan una representación general del nivel piezométrico, es necesario reconocer que existe una falta de detalle en los límites del acuífero debido a la escasez de información disponible en esas áreas. Además, el cambio de comportamiento al pasar de depósitos aluviales a roca volcánica puede tener un impacto significativo en la distribución de las isopiezas.

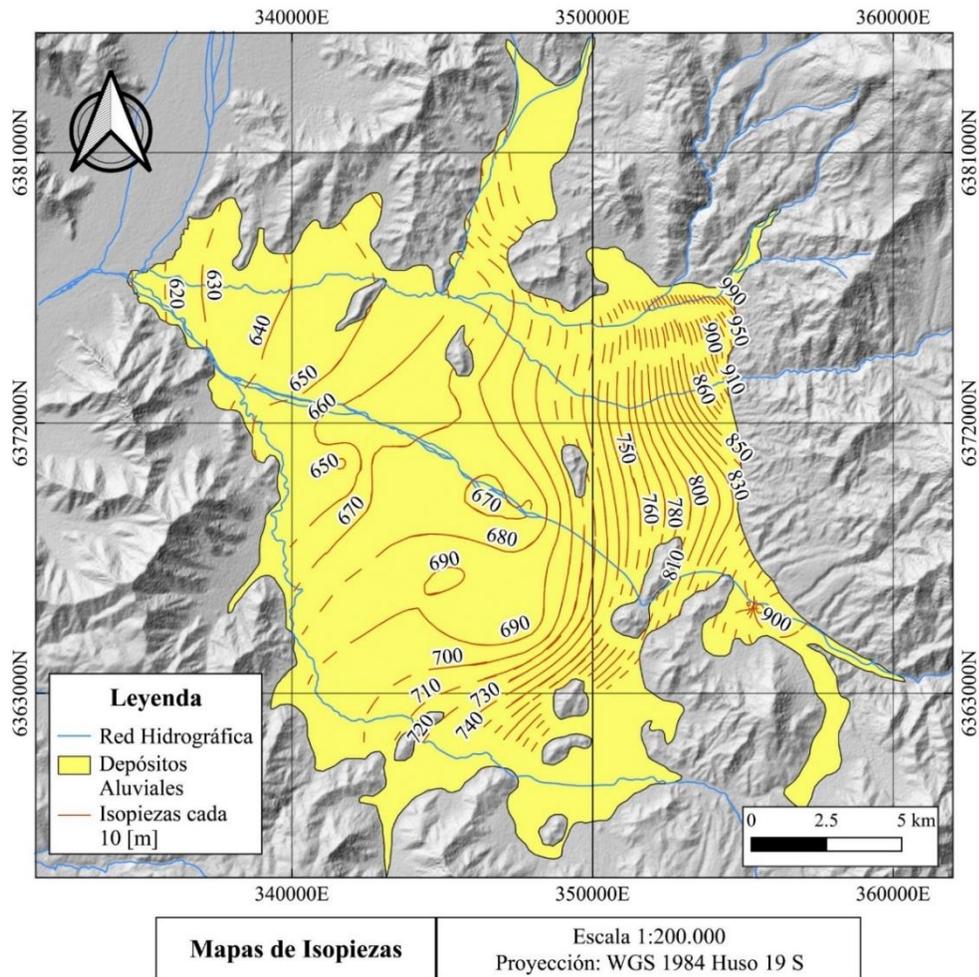


Figura 15. Mapa de Isopiezas cada 10 [m]. Representa la forma de la superficie piezométrica del acuífero aluvial. Red hidrográfica obtenida de la BCN.

Teniendo en cuenta lo anterior, la información refleja un nivel piezométrico que disminuye de sureste a noroeste desde valores de 990 a 620 [m.s.n.m]. Existe **un aumento** en la separación espacial de las isopiezas siguiendo la misma tendencia espacial anteriormente mencionada. Esto último indicaría una **disminución en el gradiente hidráulico** lo que se puede deber a un aumento de la permeabilidad del medio, existencia de alguna zona de recarga natural o artificial, entre otras.

En la zona central del área de estudio, se observan curvas piezométricas cerradas correspondiente a los 650, 670 y 690 [m.s.n.m], esto cercano a zonas donde las isopiezas tienden a curvarse más en comparación al comportamiento con el resto del área de estudio. Esto refleja zonas de descarga, las cuales pueden ser por efecto antrópico o natural debido a las mismas características de la zona de estudio. Se observa un comportamiento similar alrededor de las isopiezas correspondiente a los 900 [m.s.n.m], donde existen posibles zonas de descarga o recarga del acuífero, alterando el comportamiento de la isopiezas que se observan en la zona norte.

Con la superficie piezométrica, se pueden definir las **líneas de flujo** del agua subterránea dentro del acuífero aluvial, las cuales considerando un material isótropo (por simplificación) deben ser perpendiculares a las isopiezas y en sentido decreciente a los potenciales hidráulicos. El resultado obtenido se observa en la siguiente Figura 16, donde las flechas verdes indican el sentido y dirección del flujo.

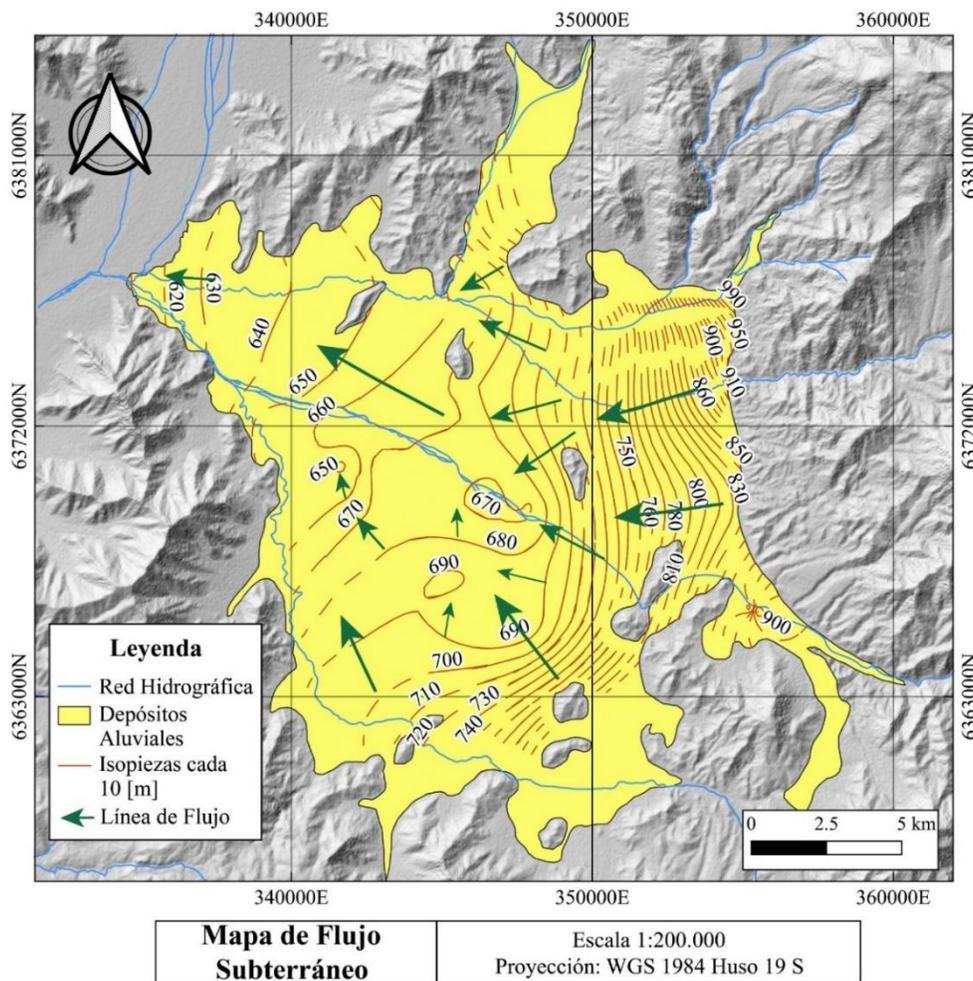


Figura 16. Mapa con las líneas de flujo del área de estudio. Red Hidrográfica obtenida de la BCN

Las líneas de flujo muestran un comportamiento que se puede describir de acuerdo con tres zonas en específico; en la zona sur del depósito entre las curvas 690 y 740 [m.s.n.m] se observan líneas de flujo con sentido noroeste convergiendo hacia el curso del río principal; la zona noreste

entre las curvas 690 y 990 [m.s.n.m] se ven líneas que convergen también en sentido al río principal con dirección suroeste; la tercera zona ubicada hacia el noroeste entre las curvas 620 [m] a 650 [m] , muestra líneas de flujo van en sentido paralelo al río principal.

Las direcciones que siguen las líneas de flujo en ciertos sectores del acuífero (entre los 690 y 680 [m.s.n.m] muestran el desarrollo de conos de depresión al surponiente del río Aconcagua esto debido posiblemente a la cantidad de pozos que extraen agua subterránea y que se encuentran en la zona.

Puesto que la altitud de la zona es de aproximadamente 800 [m.s.n.m], se tienen zonas con una diferencia importante entre el escurrimiento del cuerpo de agua superficial principal y la profundidad del flujo del agua subterránea. Esto indica una desconexión entre el acuífero y el río Aconcagua en el trayecto estudiado.

4.2.1. Evolución Histórica

Para analizar la evolución histórica del nivel piezométrico en el acuífero se recopiló la información de los pozos monitoreados por la DGA entre los años 1980 hasta el año 2021. Estos datos se encuentran en Anexo A. La ubicación de los pozos se expone en la siguiente Figura 17:

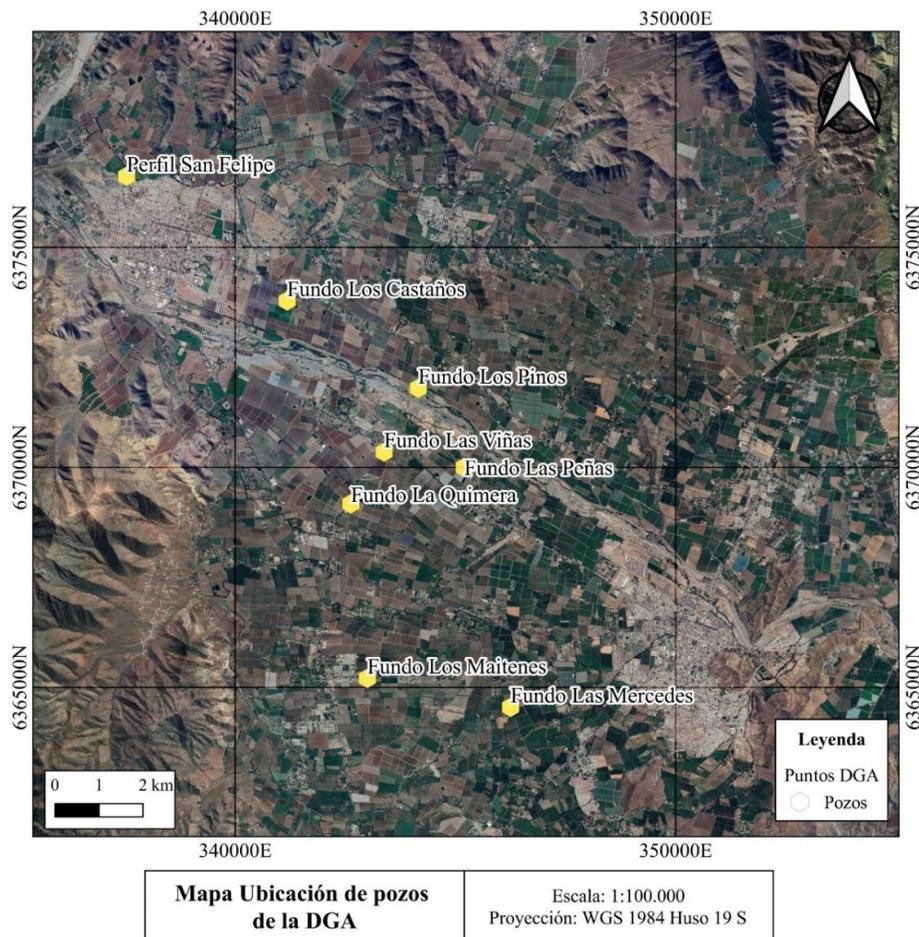


Figura 17. Ubicación de las captaciones de agua subterránea monitoreados por la DGA

En relación con esta información se obtuvieron los siguientes gráficos de tiempo versus profundidad (Figura 18) en los cuales se destaca una tendencia a un aumento del nivel estático del agua a lo largo de los años. Este efecto se observa en los pozos Fundo Los Maitenes, Fundo Las Mercedes, Fundos Los Pinos, Perfil San Felipe y Fundo Las Viñas en menor medida con una variación que va entre 20-30 [m] aproximadamente. Por otro lado, en el resto de los pozos existe una mayor variación siendo el Fundo Las Peñas (Figura 18.d) el que presenta un valor mínimo de 42.04 [m] en el año 2000 y una profundidad máxima de 109.3 [m] en el año 2020, obteniendo una diferencia de 67.26 [m] aproximadamente. Este efecto destaca aún más desde el año 2010 en adelante en todos los pozos exceptuando el perteneciente al Fundo Las Mercedes que no presentan información desde el 2008 y que muestra una disminución en la profundidad. Esto se puede deber a varios factores, tanto naturales como antrópicos, con la información disponible no se puede obtener una respuesta clara. Por otro lado, posiblemente el aumento generalizado en la profundidad se puede asociar a los efectos climáticos mencionadas anteriormente donde existe un claro déficit de las precipitaciones desde el año 2010 o a un efecto antrópico de procesos de bombeo que puedan alterar los niveles estáticos de agua a lo largo de los años.

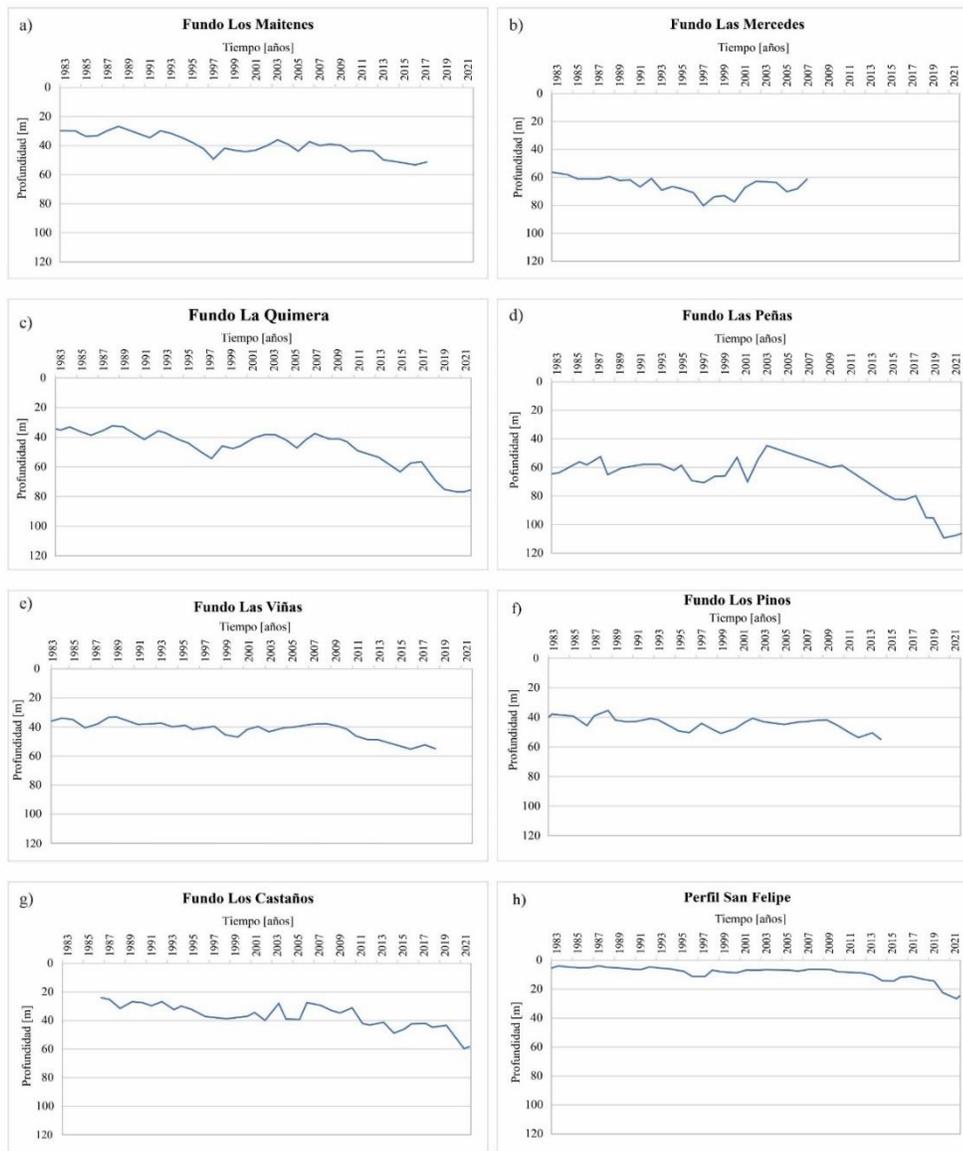


Figura 18. Evolución temporal de la profundidad del agua subterránea en los distintos puntos de captación de la base de datos de la DGA. Se considera una escala temporal desde 1980 hasta el 2021

Se distingue un comportamiento errático de los niveles entre los años, intercalándose aumentos y descensos de estos, asociado principalmente a un efecto de estacionalidad en el clima que afecta a la zona, pero siguiendo bajo un dominio de descenso de los niveles con respecto al tiempo.

Los resultados y análisis de las extracciones de agua proporcionan información relevante para la interpretación de las líneas de flujo mencionadas anteriormente. Específicamente, las zonas de descarga previamente descritas se forman debido a las extracciones significativas o bombeos que se han llevado a cabo desde 2010, como resultado del aumento en los derechos de extracción otorgados. Esta situación ha provocado una modificación importante en las isopiezas, es decir, en las líneas que conectan puntos de igual profundidad del agua subterránea.

El comportamiento de los niveles estáticos, especialmente en áreas como Fundo Las Peñas y La Quimera, también está relacionado con la cantidad de extracciones que se realizan en las proximidades de estos pozos. Esto ha generado un aumento significativo en la profundidad del agua subterránea en esas áreas en particular.

4.3. Background Geológico

En la presente sección se muestra el background geológico obtenido mediante la aplicación de la metodología explicada en la Sección 3.3. Los datos utilizados se encuentran en el Anexo E para su revisión completa. El límite natural elaborado se compara con las normativas que regulan la calidad del agua en Chile, así como con las concentraciones observadas en los pozos, con el fin de determinar el grado de intervención humana en el acuífero y sus posibles consecuencias.

4.3.1. Normativas

La norma que regula la calidad de las aguas según sus usos en Chile es la Norma Chilena Oficial N°1.333, la cual ha sido aprobada mediante Decreto Supremo del Ministerio de Obras Públicas. Esta norma establece los límites máximos permitidos para diversos parámetros que son considerados requisitos de calidad del agua. La Norma Chilena Oficial N°1.333 abarca tanto la normativa que regula el agua potable como los límites establecidos para las aguas destinadas a riego. A continuación, se detallarán los límites establecidos para cada uno de estos usos.

4.3.1.1. Normativa chilena de Agua Potable

El agua potable se rige según la Norma de Calidad de Agua para Uso Potable, N.Ch 409/1.Of 2005. En ella se establecen los criterios y límites aceptables en especies química y microbiológica entre otros, para que se cumplan los requisitos de calidad de agua potable que aseguran su inocuidad y su aptitud para el consumo humano según los estándares del MINSAL (Ministerio de Salud). Esto aplicable en todo el territorio nacional (INN et al., 2005).

Algunos de los parámetros que son requisitos dentro de esta normativa, se exponen en la Tabla 3. En ella se indica el contenido máximo de elementos o sustancias químicas, así como los límites de parámetros organolépticos de tipo inorgánico que debe cumplir como requisitos el agua potable.

Tabla 3. Límites establecidos en la NCh. 409/1, para elementos esenciales, no esenciales y características organolépticas

Parámetro	Elemento	Unidad	Límite máximo
Elementos esenciales	Cobre (Cu)	mg/L	2
	Cromo Total (Cr)	mg/L	0.05
	Fluoruro (F ⁻)	mg/L	1.5
	Hierro (Fe)	mg/L	0.3
	Manganeso (Mn)	mg/L	0.1
	Magnesio (Mg)	mg/L	125

	Selenio (Se)	mg/L	0.01
	Zinc (Zn)	mg/L	3
Elementos o sustancias no esenciales	Arsénico (As)	mg/L	0.01
	Cadmio (Cd)	mg/L	0.01
	Nitrato (NO ₃ ⁻)	mg/L	50
	Plomo (Pb)	mg/L	0.05
Características organolépticas	Cloruro (Cl ⁻)	mg/L	400
	pH	-	6.5<pH<8.5
	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg/L	500

4.3.1.2. Normativa chilena de Agua para Riego

El límite máximo de concentración de elementos y especies químicas y microbiológicas para el agua destinada a regadío se encuentran establecido en la NCh. 1333/78. En ella se indican los estándares nacionales de calidad ambiental según el uso dado al recurso, de acuerdo con criterios científicos referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos (INN et al., 2005). Entre los requisitos que se deben cumplir para el agua destinada a riego, se tienen valores de pH comprendidos entre 5.5 y 9.0 y valores de elementos químicos indicados en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentraciones máximas de elementos químicos para el agua destinada a riego

Elemento	Unidad	Límite máximo
Aluminio (Al)	mg/L	5.0
Arsénico (As)	mg/L	0.10
Bario (Ba)	mg/L	4.00
Berilio (Be)	mg/L	0.10
Boro (B)	mg/L	0.75
Cadmio (Cd)	mg/L	0.010
Cianuro (CN ⁻)	mg/L	0.20
Cloruro (Cl ⁻)	mg/L	200
Cobalto (Co)	mg/L	0.05
Cobre (Cu)	mg/L	0.20
Cromo (Cr)	mg/L	0.10
Fluoruro (F ⁻)	mg/L	1.00
Hierro (Fe)	mg/L	5.00
Litio (Li)	mg/L	2.50
Manganeso (Mn)	mg/L	0.20
Mercurio (Hg)	mg/L	0.001
Molibdeno (Mo)	mg/L	0.010
Níquel (Ni)	mg/L	0.20
Plata (Ag)	mg/L	0.20
Plomo (Pb)	mg/L	5.00
Selenio (Se)	mg/L	0.020

Sodio porcentual (Na)	%	35.00
Vanadio (V)	mg/L	0.10
Zinc (Zn)	mg/L	2.00

4.3.2. Comparación de las normativas con límites naturales

La siguiente figura ilustra el percentil 90 (bigote superior de la caja) de los datos relacionados con el Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, Mg²⁺, As, Zn y pH. Estas concentraciones son las que definen aproximadamente el background de las aguas subterráneas del acuífero aluvial de San Felipe.

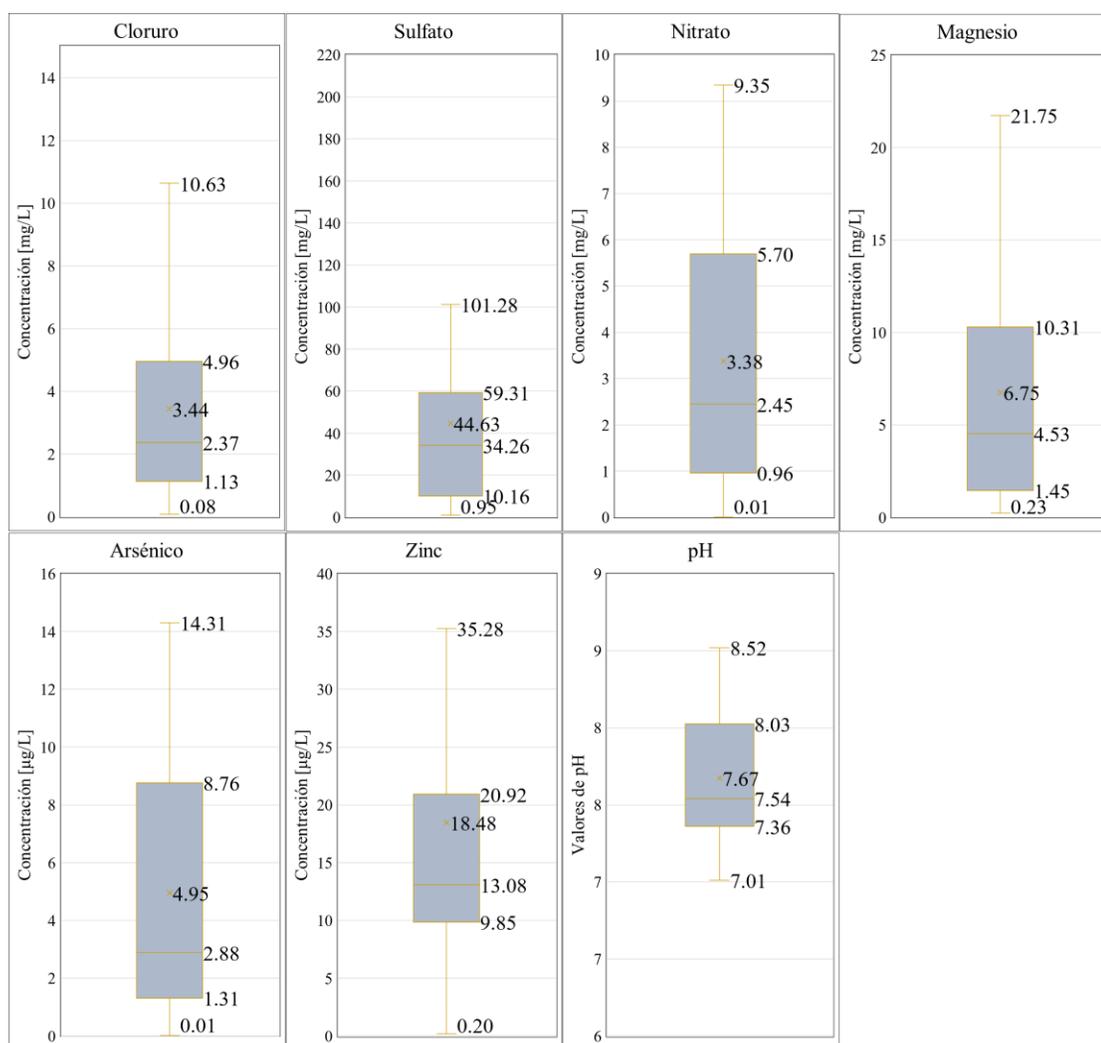


Figura 19. Diagrama caja de las muestras de manantiales con los elementos principales para el estudio de las concentraciones natural dentro del acuífero aluvial de San Felipe.

Respecto a lo anterior, los resultados comparativos de los elementos químicos y parámetros en relación con las normativas y los límites naturales de los manantiales quedan expuestos a continuación.

4.3.2.1. pH

La Figura 20 muestra tanto el límite mínimo como el máximo de las normativas de agua potable y uso de agua para riego aplicables al parámetro de pH. Se observa como el total de las muestras se encuentra dentro de rangos aceptables. Análogamente, el comportamiento de las muestras está dentro del límite de 8.52 de pH propuesto como condición natural dentro del acuífero (Figura 21).

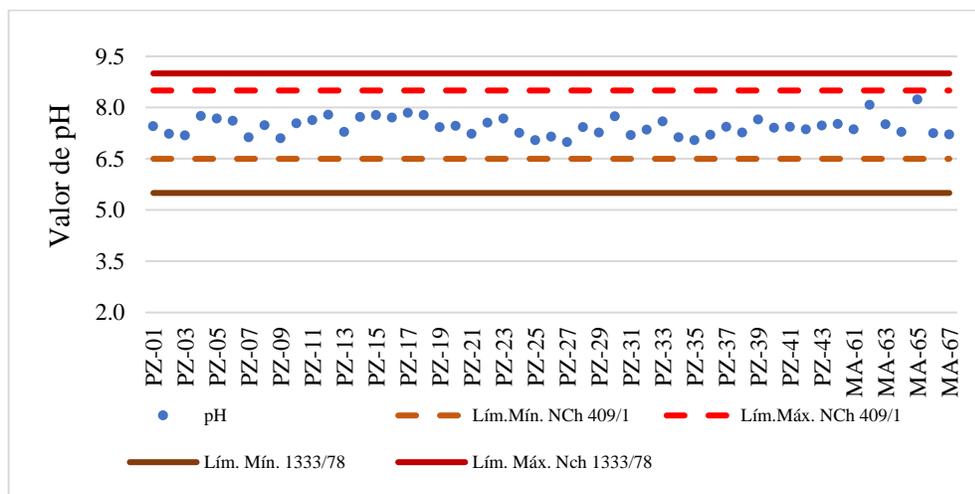


Figura 20. Gráfico con los valores de pH de pozos, junto con los límites máximos y mínimos de las normativas NCh 409/1 y NCh 1333/78

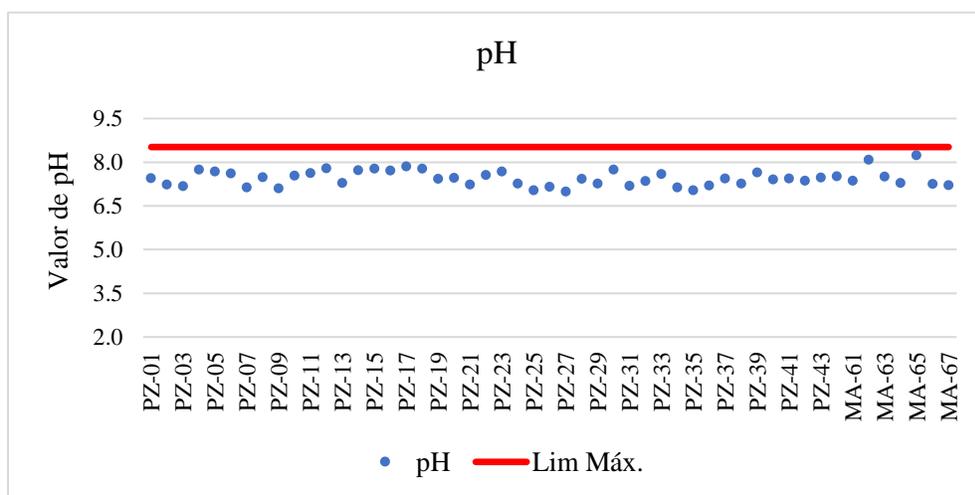


Figura 21. Gráfico con los valores de pH de pozos y el límite definido por el background geológico

4.3.2.2. Cloruro

En la Figura 22, se observa que todas las muestras se mantienen bajo los límites máximos de ambas normativas, incluso el valor máximo en concentración es de 64.69 [mg/L], un valor bastante menor en comparación a lo regulado. No obstante, si se consideran los límites obtenidos de acuerdo con las concentraciones que poseen los manantiales (Figura 23), se puede ver como gran parte de las muestras de pozos (un total de 33 muestras) superan el límite de 10.63 [mg/L] propuesto. En particular, las muestras PZ-01, PZ-02, PZ-03, PZ-30, PZ-33, PZ-34, PZ-38, PZ-39, PZ-40, PZ-41 y todos los manantiales, cumplen con los límites impuestos.

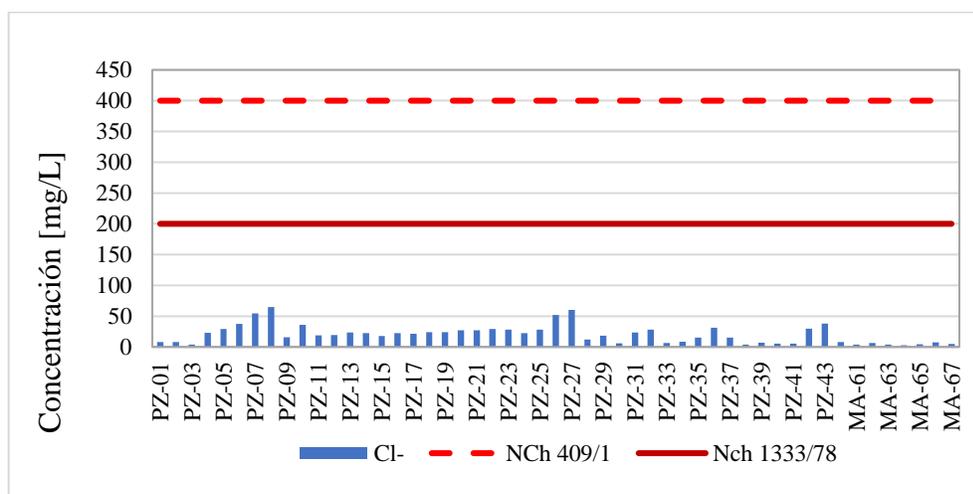


Figura 22. Concentración del cloruro en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite de las normas NCh 409/1 y NCh 1333/78.

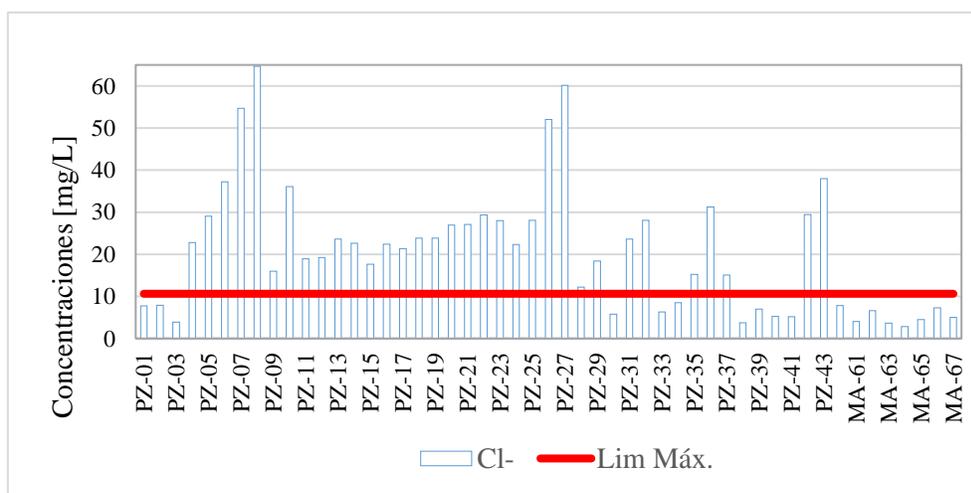


Figura 23. Concentración del cloruro en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite natural del acuífero.

4.3.2.3. Sulfato

En la Figura 24, se observa que todas las muestras se mantienen bajo los límites máximos de ambas normativas, siendo el dato PZ-07 el único que supera los 200 [mg/L]. Considerando el límite máximo de 101.28 [mg/L] propuesto en el background e ilustrado en la Figura 25, se distingue que las muestras PZ-01, PZ-02, PZ-28, PZ-30, PZ-33 y desde la muestra PZ-38 hasta la PZ-41, y los manantiales MA-61, MA-63, MA-64 y MA-65 poseen una concentración bajo los límites marcados, mientras que el resto de las muestras supera este límite.

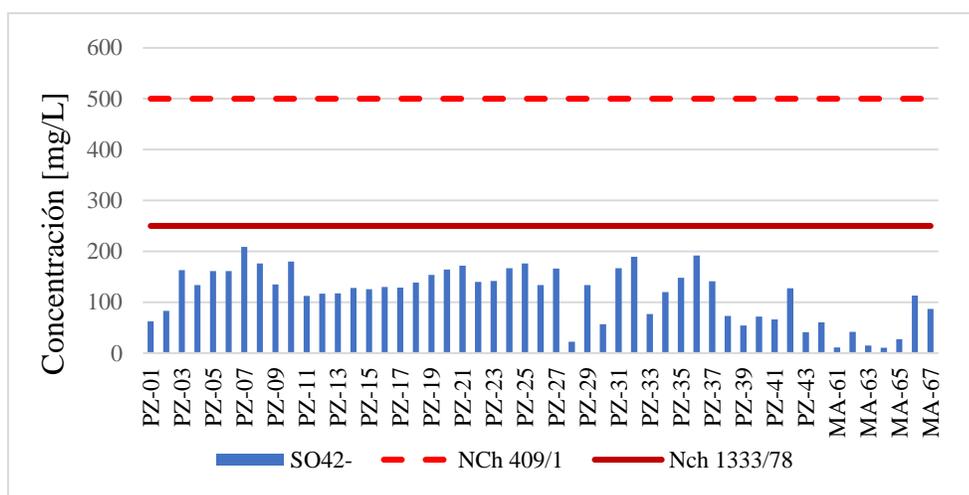


Figura 24. Concentración del sulfato en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite de las normas NCh 409/1 y NCh 1333/78

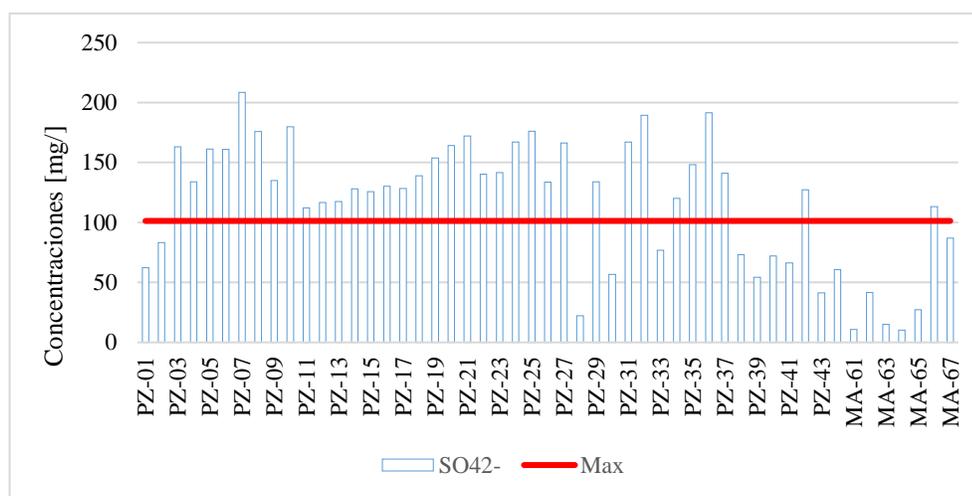


Figura 25. Concentración del sulfato en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite natural del acuífero

4.3.2.4. Nitrato

Las concentraciones nitrato en todas las muestras se encuentra por debajo de la normativa de agua potable. La muestra de manantial MA-66 posee la mayor concentración correspondiente a 43 [mg/L] aproximadamente. Otros datos como el pozo PZ-01, PZ-10, PZ-39 y el manantial MA-62 poseen concentraciones sobre los 30 [mg/L]. En cuanto a la Figura 27, a modo general se tiene que gran parte de las muestras supera el límite máximo de 9.35 [mg/L], los pozos PZ-05, PZ-08, PZ-16, PZ-17, PZ-22, PZ-23, PZ-24, PZ-38, PZ-40, PZ-42, se encuentra bajo este límite y las muestras PZ-02 y Pz-03 tienen concentraciones incluso bajo el límite mínimo establecido.

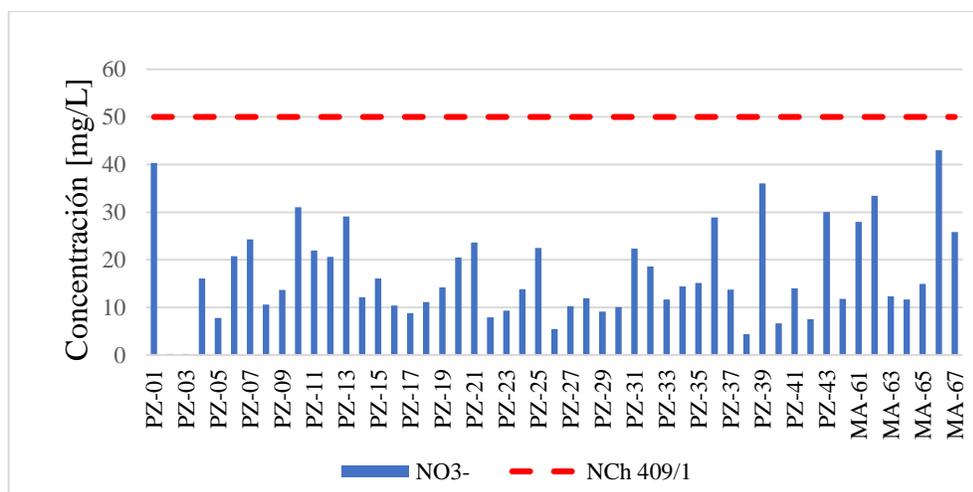


Figura 26. Concentración del nitrato en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite de las normas NCh 409/1.

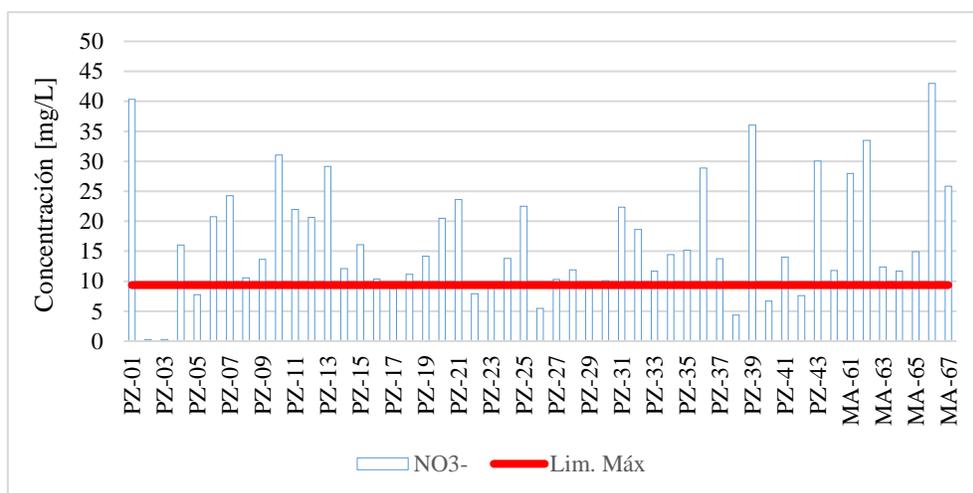


Figura 27. Concentración del nitrato en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite del background geológico

4.3.2.5. Magnesio

En la Figura 28, se observa que todas las muestras se mantienen bajo los límites máximos de ambas normativas, siendo el dato PZ-32 el que posee la mayor concentración superando los 20 [mg/L]. Considerando el límite máximo de los manantiales ilustrados en la Figura 29, se distingue que la muestra PZ-32 supera el límite máximo de 21.75 [mg/L], mientras que el resto de las muestras se mantiene por debajo de este rango. Finalmente, el pozo PZ-30 y los manantiales intervenidos MA-61, MA-63, MA-64 y MA-65 poseen concentraciones muy por debajo del límite mencionado anteriormente.

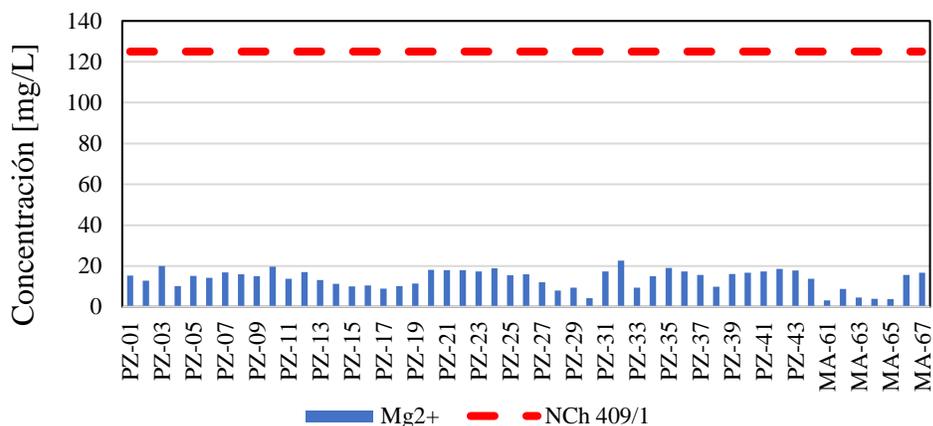


Figura 28. Concentración del magnesio en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite de la norma NCh 409/1.

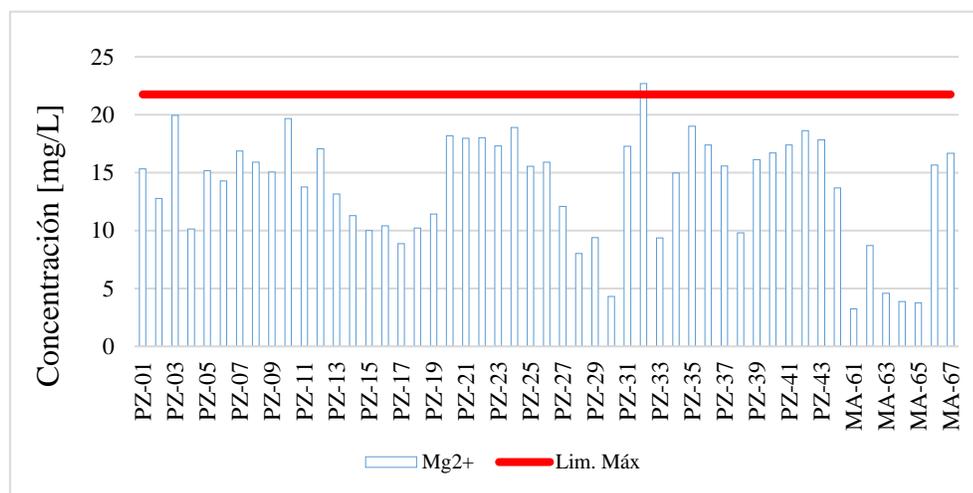


Figura 29. Concentración del magnesio en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite del background geológico

4.3.2.6. Zinc

La Figura 30 muestra las concentraciones de zinc en $\mu\text{g/L}$ y las concentraciones de ambas normativas, de la cual se desprende que todos los pozos y manantiales intervenidos cumplen con lo reglamentado. El pozo PZ-03 destaca por mostrar un alto contenido de Zinc sobre los 900 $[\mu\text{g/L}]$. Considerando el límite máximo de los manantiales ilustrados en la Figura 31, se observa que un total de 22 muestras de pozos y una muestra de manantial superan el límite máximo de 35.28 $[\mu\text{g/L}]$, desde PZ-02 a PZ-14, PZ-16, PZ-17, PZ-19, PZ-20, PZ-21, PZ-24, PZ-31, PZ-34 y PZ-43, además del pozo MA-61. En cuanto al límite mínimo sugerido, se observa que un total de 14 muestras tienen concentraciones menores de entre 9 $[\mu\text{g/L}]$ a 11 $[\mu\text{g/L}]$.

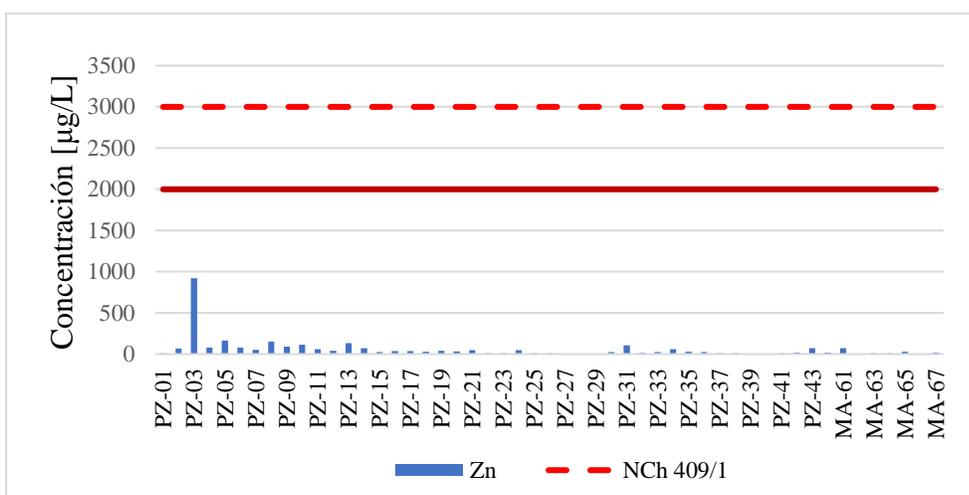


Figura 30. Concentración del zinc en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite de las normas NCh 409/1 y NCh 1333/78.

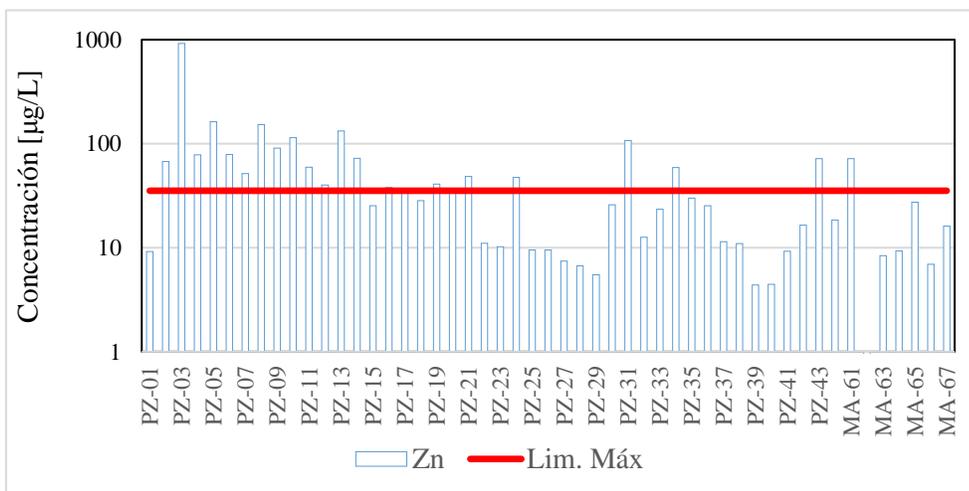


Figura 31. Concentración del zinc en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite natural del acuífero. Valores en escala logarítmica

4.3.2.7. Arsénico

La Figura 32 muestra las concentraciones de arsénico en $\mu\text{g/L}$ y las concentraciones de ambas normativas. Se puede observar que todas las muestras cumplen con la normativa aplicada para el uso de agua de riego, sin embargo, tres datos superan la concentración máxima legislada para el agua potable relacionada al arsénico. Estas muestras son PZ-19, PZ-27 y el manantial MA-67, las cuales se ubican cercanas al piedemonte. En cuanto al límite del background geológico ilustrados en la Figura 33, se observa que un total de dos muestras correspondientes a PZ-19 y PZ-27 superan el límite máximo de $14.31 \mu\text{g/L}$.

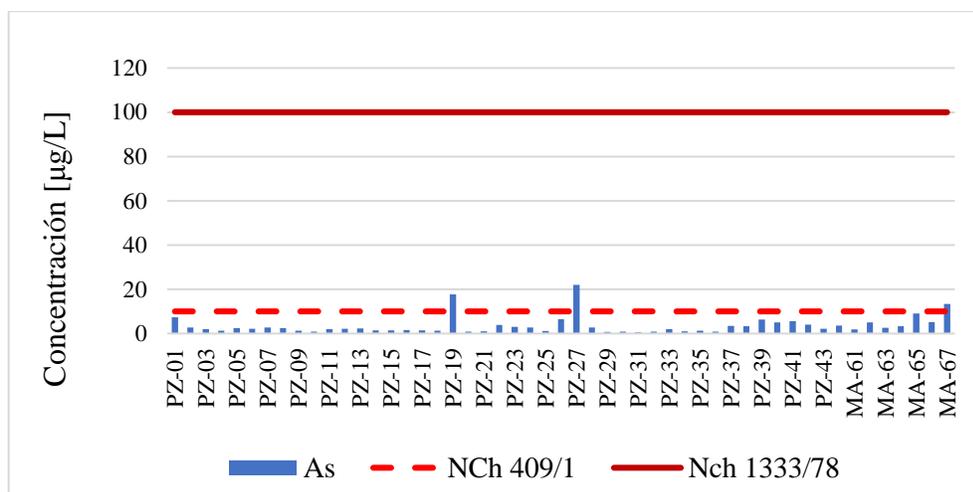


Figura 32. Concentración del arsénico en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite de las normas NCh 409/1 y NCh 1333/78.

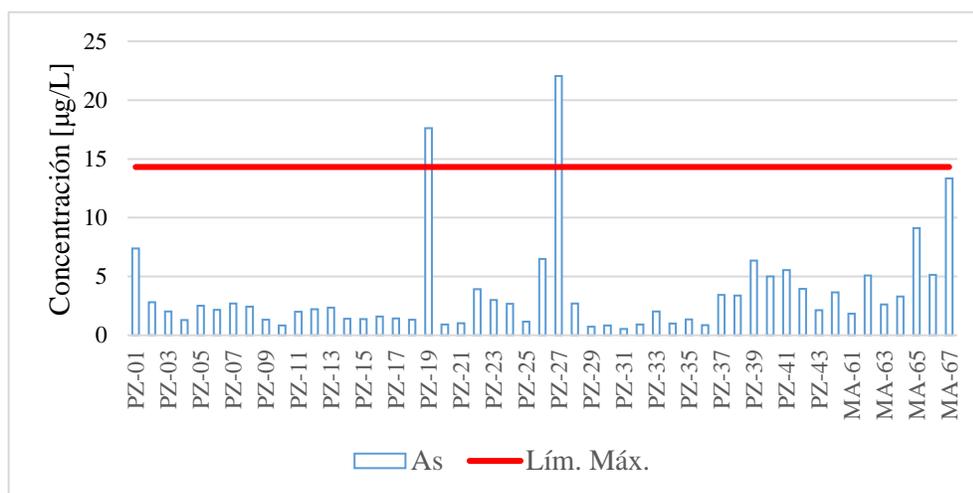


Figura 33. Concentración del arsénico en las muestras de pozos y manantiales alterados, junto con el límite natural del acuífero.

En resumen, los elementos que superan las condiciones naturales establecida principalmente son el Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- . En menor medida se observa algunas muestras que exceden los límites en el arsénico y en el zinc. Esto implica que los pozos cuentan con ciertos factores que causan una mayor concentración en los elementos mencionados en comparación a las condiciones que se proponen como naturales. Se puede mencionar que gran parte de los pozos se encuentra ubicado en áreas agrícola lo que puede estar ligado a que gran parte de ellos muestre un aumento en sus concentraciones de Cl^- y NO_3^- , siendo estos elementos fuertemente relacionados a fertilizantes ocupados para la agricultura. No obstante, y a pesar de que se observa una diferencia con respecto al background, no hay implicancias en efectos negativos de estas aguas alteradas al ser usada para agua potable o agua de riego ya que se encuentra bajo los límites ya mencionados, exceptuando las dos muestras de pozos que superan los límites de arsénico. Estas muestras se encuentran alejadas una de la otra, por lo cual no guardan una relación espacial, y no se encuentran en las áreas mayormente influenciadas por la agricultura, lo cual implicaría algún otro origen respecto de los niveles elevados de arsénicos de esas muestras en específico.

4.4. Hidrogeoquímica

En esta sección se presentan los resultados geoquímicos del análisis de agua, los cuales se obtuvieron a partir de un total de 67 muestras de manantiales tomadas en diferentes ubicaciones y/o en distintas temporadas o años. Además, se incluyen 44 muestras obtenidas de pozos, 28 muestras de agua de río y 3 datos provenientes de canales. Los códigos identificadores de las muestras, su ubicación geográfica y la fecha en que fueron obtenidas se detallan en Tabla 8 en el Anexo C.

A continuación, se presenta la ubicación del inventario de datos con su respectiva simbología.

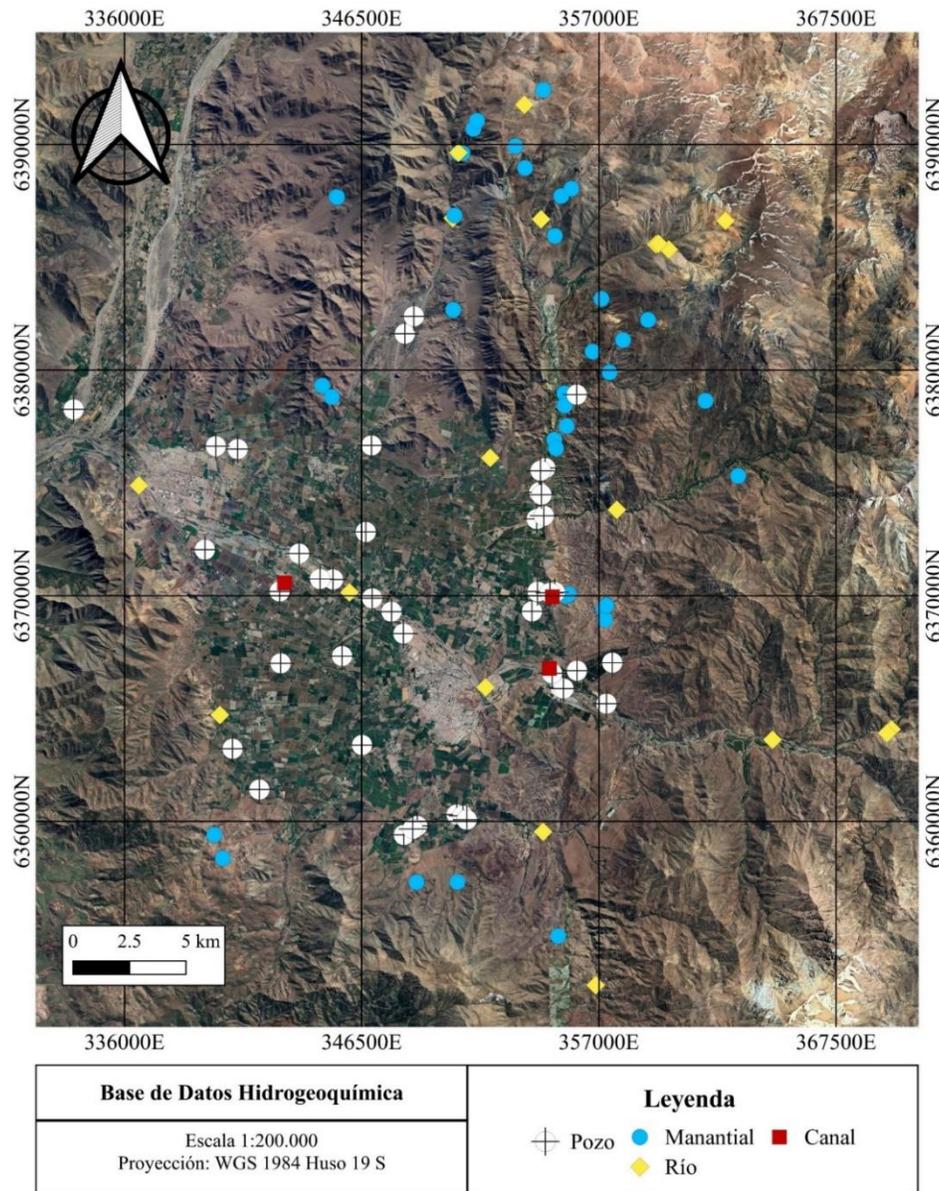


Figura 34. Mapa de la Base de Datos Hidrogeoquímicos. Ubicación de los puntos muestreados en las distintas campañas de terrenos. Incluye muestras de pozos, manantiales, ríos y canales

4.4.1. Parámetros Fisicoquímicos

A continuación, se presentan los parámetros fisicoquímicos de pozos y manantiales.

La conductividad eléctrica (CE) se define como la capacidad que tiene el agua para conducir la electricidad. Se caracteriza por aumentar junto con la temperatura y con el contenido y tipo de iones disueltos. La temperatura es una medida del potencial calorífico en este caso del agua, su medida se expresa en °C. Finalmente, el pH se determina mediante la concentración de iones de hidrógeno (H⁺) presentes en solución. Cuanto mayor es la concentración de iones de hidrógeno, más ácida es la solución, y cuanto menor es la concentración de iones de hidrógeno, más alcalina es la solución.

Tabla 5. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de pozos

Id	mE	mN	Cota [m.s.n.m]	Fuente	CE [μS/cm]	T [°C]	pH
PZ-01	354358	6374583	924	pozo	569	22.6	7.45
PZ-02	354248	6373397	904	pozo	462	19.4	7.23
PZ-03	354567	6373542	917	pozo	564	23.4	7.18
PZ-04	342872	6370188	725	pozo	467	21.7	7.75
PZ-05	354925	6366560	895	pozo	561	22.3	7.68
PZ-06	354040	6369307	863	pozo	768	20.2	7.61
PZ-07	355306	6365936	898	pozo	918	25.6	7.13
PZ-08	355436	6365885	899	pozo	569	22.2	7.48
PZ-09	350706	6360301	857	pozo	479	21.6	7.10
PZ-10	341012	6376499	684	pozo	669	17.9	7.54
PZ-11	346936	6376660	738	pozo	571	19.9	7.63
PZ-12	333751	6378255	608	pozo	507	17.6	7.79
PZ-13	340786	6363216	731	pozo	464	19.7	7.29
PZ-14	345233	6370720	745	pozo	420	20.9	7.72
PZ-15	344660	6370740	736	pozo	396	20.1	7.78
PZ-16	343734	6371868	723	pozo	447	18.9	7.71
PZ-17	346966	6369885	771	pozo	452	20.2	7.85
PZ-18	347822	6369292	779	pozo	456	17.9	7.78
PZ-19	341974	6361410	745	pozo	497	26.1	7.43
PZ-20	342913	6367002	732	pozo	560	21.8	7.46
PZ-21	345635	6367324	761	pozo	591	19.5	7.23
PZ-22	355054	6370154	926	pozo	993	16.4	7.56
PZ-23	354289	6370182	889	pozo	1026	-	7.68
PZ-24	354932	6366557	885	pozo	1213	15.9	7.26
PZ-25	340046	6376625	644	pozo	1154	17.4	7.04
PZ-26	357335	6365213	896	pozo	998	16.3	7.15
PZ-27	356032	6366676	919	pozo	1188	18.9	6.99
PZ-28	357593	6367031	1146	pozo	570	20.8	7.43
PZ-29	348348	6368318	816	pozo	745	18.2	7.27
PZ-30	348367	6359399	835	pozo	562	20.5	7.74
PZ-31	346683	6372822	749	pozo	1078	17.3	7.19
PZ-32	346517	6363383	751	pozo	1209	19.8	7.35
PZ-33	350986	6360249	882	pozo	733	15.4	7.59
PZ-34	351155	6360072	876	pozo	998	17.4	7.13

PZ-35	348966	6359795	821	pozo	1099	17.8	7.04
PZ-36	339562	6372042	670	pozo	1246	17.0	7.20
PZ-37	348760	6359664	816	pozo	1050	18.4	7.44
PZ-38	356021	6378910	1283	pozo	454	15.3	7.27
PZ-39	354461	6374474	939	pozo	544	24.1	7.65
PZ-40	354627	6375657	980	pozo	640	20.3	7.41
PZ-41	354420	6375537	973	pozo	631	20.1	7.44
PZ-42	354833	6370128	918	pozo	759	17.0	7.36
PZ-43	348415	6381606	895	pozo	755	19.5	7.47
PZ-44	348812	6382381	938	pozo	531	17.3	7.52

La CE de las aguas subterráneas en las muestras de pozos oscila entre 396 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] y 1246 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], correspondientes a la muestra PZ-15 y PZ-36 respectivamente. En cuanto a la temperatura, oscila entre 15.3°C a 26.1°C de las muestras PZ-38 y PZ-19. Ambos parámetros mencionados no muestran una relación clara. Finalmente, los valores de pH se encuentran en un rango de 6.99 a 7.85 relacionados a los pozos PZ- 27 y PZ-17 respectivamente, considerándose como pH neutros a alcalinos. Este parámetro no posee una variación significativa ni una correlación respecto de la conductividad eléctrica y la temperatura.

Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos de las muestras de manantiales

Id	mE	mN	Cota [m.s.n.m]	Fuente	CE [$\mu\text{S}/\text{cm}$]	T [°C]	pH
MA-01	350555	6382668	1128	manantial	648	21	7.15
MA-02	350612	6386855	1246	manantial	268	15.6	8.43
MA-03	350785	6389613	1515	manantial	-	12	7.74
MA-04	350964	6389610	1565	manantial	256	8.3	8.11
MA-05	351448	6390689	1899	manantial	83.30	10.3	7.59
MA-06	353303	6389921	2301	manantial	95.60	12.5	7.95
MA-07	353734	6388952	2146	manantial	61.80	6.5	8.26
MA-08	355027	6376911	1088	manantial	594	15.8	7.33
MA-09	355104	6376532	1077	manantial	590	16.9	7.4
MA-10	355331	6387711	2380	manantial	253	4	6.93
MA-11	355488	6378429	1239	manantial	477	17.5	7.16
MA-12	355519	6369994	902	manantial	528	15.1	6.8
MA-13	355574	6369980	993	manantial	409	17.7	7.88
MA-14	355670	6370061	939	manantial	410	19	7.37
MA-15	355792	6388033	2085	manantial	152.60	14	8.17
MA-16	357343	6369566	1088	manantial	301	17.2	7.61
MA-17	359178	6382221	2179	manantial	192.90	11.9	7.59
MA-18	350555	6382668	1128	manantial	624	22.2	7.55
MA-19	350612	6386855	1246	manantial	263	20.8	7.6
MA-20	355028	6376911	1081	manantial	578	21.2	7.5
MA-21	355104	6376532	1077	manantial	585	22.8	7.54
MA-22	355331	6387711	2380	manantial	168.20	21	7.09
MA-23	355471	6378970	1219	manantial	504	22.2	7.35
MA-24	355576	6369989	969	manantial	376	21.4	7.83
MA-25	355577	6377517	1157	manantial	484	25.7	8.19
MA-26	355640	6370021	965	manantial	392	22.1	7.66

MA-27	355792	6388033	2085	manantial	143.60	13.3	7.9
MA-28	356723	6380815	1535	manantial	556	19.2	8.36
MA-29	357475	6379896	1490	manantial	272	21	8.52
MA-30	357202	6369397	1082	manantial	436	15.7	7.2
MA-31	357276	6368932	1102	manantial	381	8.2	7.28
MA-32	357344	6369583	1086	manantial	382	17.28	7.25
MA-33	357347	6369572	1085	manantial	394	18	7.43
MA-34	339974	6359403	926	manantial	697	25.2	7.12
MA-35	345186	6378814	800	manantial	538	23.5	7.21
MA-36	345381	6387675	1105	manantial	316	21.6	7.54
MA-37	348930	6357303	903	manantial	505	26.7	7.53
MA-38	350738	6357309	1056	manantial	445	25.8	8.01
MA-39	350782	6389610	1562	manantial	190.30	20.4	8.4
MA-40	351612	6391045	1933	manantial	83.90	13.5	7.38
MA-41	354541	6392408	2465	manantial	31	27.7	8.17
MA-42	355198	6354911	1220	manantial	311	20.1	8.19
MA-43	355488	6378429	1239	manantial	461	22.8	7.14
MA-44	355519	6369994	902	manantial	579	24.1	7.95
MA-45	355574	6369980	993	manantial	402	19.8	7.37
MA-46	355670	6370061	939	manantial	390	20.6	7.66
MA-47	357115	6383154	1784	manantial	185.60	21.9	7.13
MA-48	357343	6369566	1088	manantial	275	23.7	7.45
MA-49	358070	6381330	1783	manantial	330	18.9	7.41
MA-50	359178	6382221	2179	manantial	204.40	23.4	6.97
MA-51	361720	6378636	1701	manantial	83	11.5	7.96
MA-52	344755	6379308	877	manantial	136.80	8.7	7.25
MA-53	348930	6357303	903	manantial	505	20.1	7.49
MA-54	355053	6385945	1844	manantial	183.80	13	7.38
MA-55	355488	6378429	1239	manantial	602	15.7	7.86
MA-56	355519	6369994	902	manantial	606	14.6	7.22
MA-57	355670	6370061	939	manantial	385	18.8	7.84
MA-58	357115	6383154	1784	manantial	210.10	12.7	7.61
MA-59	357343	6369566	1088	manantial	297	15.8	7.55
MA-60	363164	6375307	1456	manantial	341	18	7.72
MA-61	340357	6358361	1269	manantial	140.2	13.2	7.36
MA-62	345181	6378800	800	manantial	360	13.2	8.08
MA-63	345381	6387675	1105	manantial	355	10.3	7.51
MA-64	345416	6387660	1120	manantial	314	17.3	7.29
MA-65	350612	6386855	1246	manantial	284	16.4	8.24
MA-66	355027	6376911	1088	manantial	700	16.5	7.25
MA-67	355104	6376532	1077	manantial	640	19.5	7.21

La CE de las aguas subterráneas en las muestras de manantiales oscila entre 31 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] y 700 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], correspondientes a la muestra MA-66 (campana invierno) y MA-41 (campana verano) respectivamente. En cuanto a la temperatura, oscila entre 4°C a 27.7°C de las muestras MA-10 obtenida en temporada en invierno y MA-41 muestreada durante la estación de verano. Los valores de pH se encuentran en un rango de 6.8 a 8.52 relacionados a los manantiales MA-12 y MA-29, siendo el primero una muestra obtenida en temporada invierno y el segundo correspondiente a la

campana de verano. Estos rangos indican un pH con características levemente ácidas a alcalinas. Finalmente, este parámetro no posee una variación significativa ni una correlación con los otros parámetros.

La Figura 35 muestra los diagramas cajas de los parámetros físicos de manantiales clasificados de acuerdo con su temporada, invierno o verano. La CE, no muestra una variabilidad significativa en los datos entre temporadas, sin embargo, existe una asimetría positiva hacia valores de conductividad eléctrica más elevadas y una mayor dispersión de los datos en la temporada verano. En cuanto a la temperatura, los manantiales estudiados durante la temporada de verano muestran valores más elevados en comparación con lo temporada de invierno, lo cual guarda relación con las características climáticas de la zona. El pH posee valores similares entre ambas temporadas sin valores atípicos y con una asimetría negativa en la temporada seca.

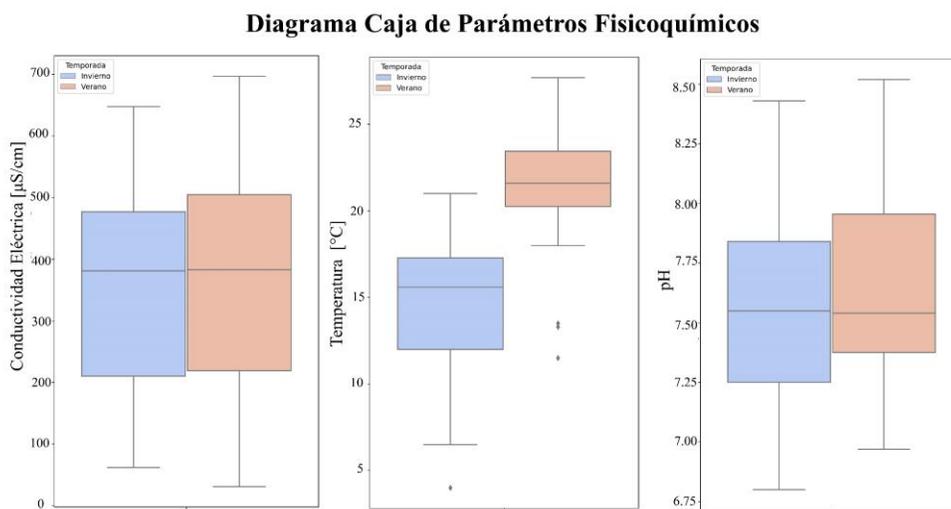


Figura 35. Diagrama cajas de Parámetros Físicoquímicos de Manantiales.

En cuanto a los parámetros fisicoquímicos de los pozos (Figura 36), se observa una mayor dispersión de los datos y una mediana desplazada con respecto al centro de la caja indicando una asimetría positiva en los valores de conductividad. La temperatura muestra tres valores atípicos u outliers, dos sobre los 25 °C y otro con un valor por debajo de los 11°C. Por otro lado, no se registran valores atípicos en el pH, aunque se observa una asimetría positiva en los datos, con una tendencia hacia valores más alcalinos.

Diagrama Caja de Parámetros Fisicoquímicos

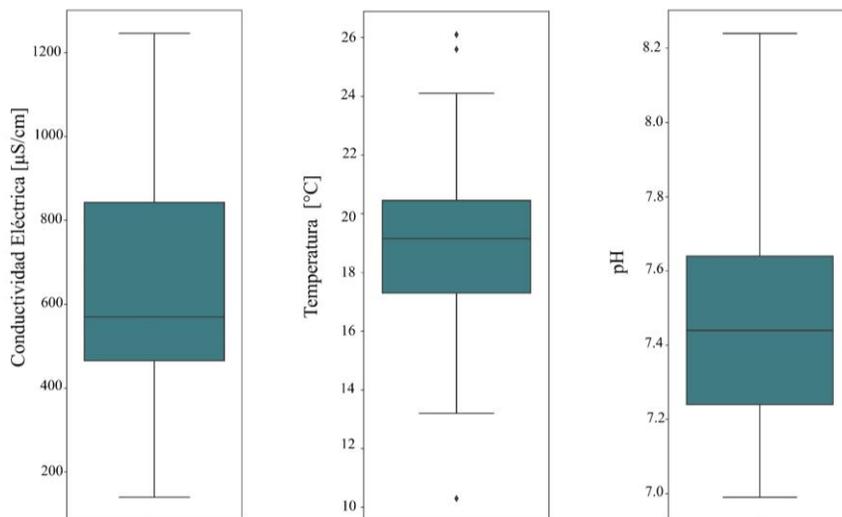


Figura 36. Diagrama cajas de Parámetros Fisicoquímicos de Pozos

4.4.2. Elementos mayoritarios

En el agua subterránea natural, gran parte de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Siendo algunos de estos iones encontrados prácticamente siempre y cuya suma representa casi la totalidad de los iones disueltos. Estos son los llamados elementos mayoritarios, los cuales de acuerdo con su carga eléctrica pueden categorizarse como cationes; sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), incluyendo en ciertos casos el potasio (K^+), o aniones; Cloruro (Cl^-), Sulfato (SO_4^{2-}), y Bicarbonato (HCO_3^-). Para este estudio también se incluye el nitrato (NO_3^-), debido a su relevancia para el objetivo de la investigación. A continuación, se presentan los resultados del análisis exploratorio de los elementos mayoritarios.

La Figura 37 muestra los diagramas de caja de los cationes, incluyendo el sílice, utilizando los datos obtenidos de los manantiales. Se observa que no hay una variabilidad significativa entre los registros de invierno y verano. En el caso del sodio, se aprecia una asimetría negativa y se identifican valores atípicos tanto en invierno como en verano. El potasio muestra concentraciones bajas en comparación con los otros cationes, por lo que su relevancia en el estudio es limitada. Por otro lado, el calcio muestra mayores concentraciones con una mediana desplazada, lo que indica una asimetría positiva hacia concentraciones más altas. El magnesio presenta concentraciones por debajo de los 25 ppm, con una asimetría positiva y sin valores atípicos. En cuanto al sílice, se observa una ligera variación entre las temporadas, con una mayor dispersión de los datos en la temporada de verano y una concentración más elevada. Sin embargo, tanto en invierno como en verano se presentan valores atípicos.

Diagrama Caja de Cationes y SiO₂

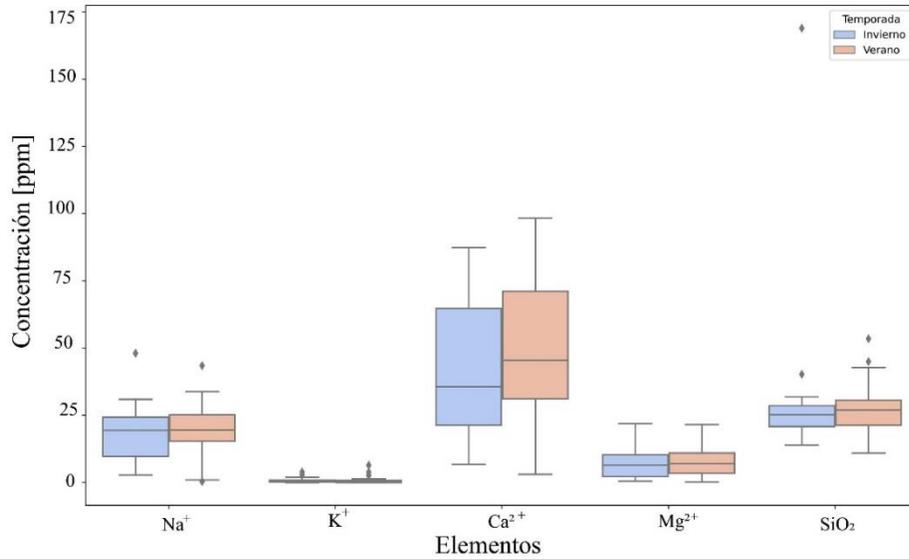


Figura 37. Diagrama cajas de Cationes y Sílice. Se muestra la concentración en ppm por temporada de los datos relacionados a manantiales

Los resultados obtenidos para los pozos se presentan en la siguiente figura. En primer lugar, el sodio muestra dos outliers y una asimetría positiva. Al igual que lo observado en los manantiales, el potasio muestra bajas concentraciones y el calcio presenta altas concentraciones, de hasta 140 ppm aproximadamente, con una asimetría negativa y un valor atípico bajo los 20 ppm. Por otro lado, el magnesio posee concentraciones de hasta 23 ppm sin valores atípicos. Así mismo el sílice no posee outliers, muestra una asimetría levemente negativa y una concentración máxima por sobre los 40 ppm.

Diagrama Caja de Cationes y SiO₂

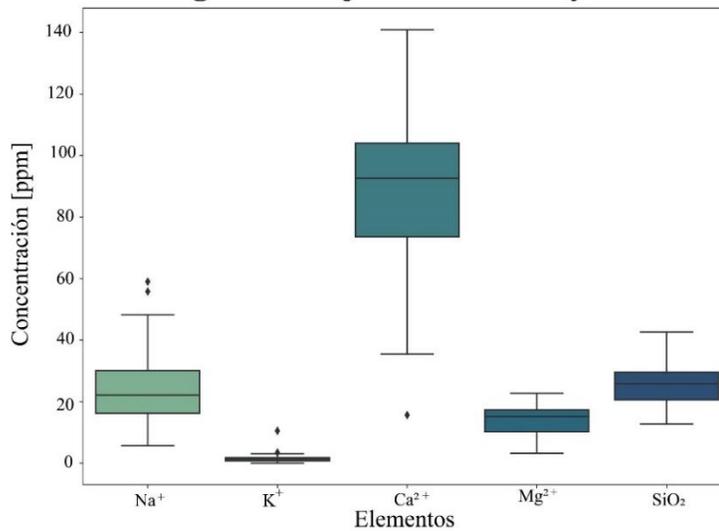


Figura 38. Diagrama cajas de Cationes y Sílice. Concentración en ppm de los datos de pozos

Al comparar los resultados entre los manantiales y los pozos, se puede observar que en ambos casos el calcio es el catión principal con mayor concentración, aunque se destaca con valores mayores en los pozos. Por otro lado, el potasio muestra una menor relevancia en ambos tipos de muestras.

A continuación, se presenta la variación espacial de los cationes más relevantes de los datos de pozos.

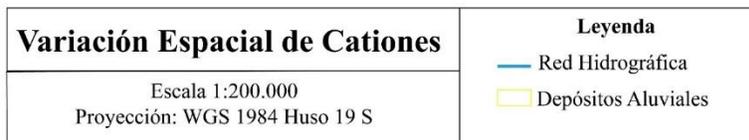
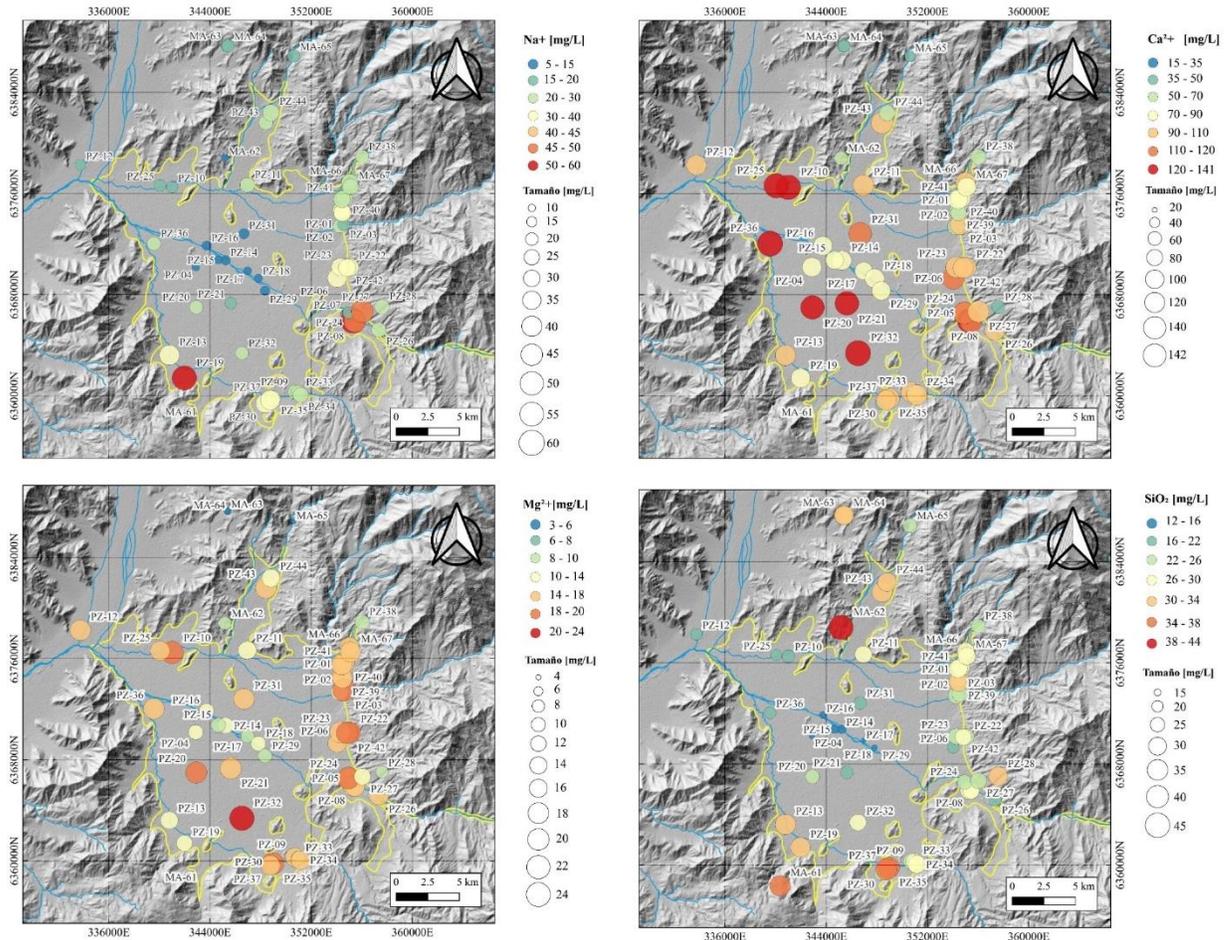


Figura 39. Mapa de variación espacial de cationes y sílice. La escala de colores va desde azul, indicando menor concentración al rojo el cual indica una concentración máxima.

En el área cercana al río Aconcagua, se observa una baja concentración de sodio y sílice, pero estas concentraciones aumentan hacia el límite del depósito aluvial. En el caso del sodio, la muestra MA-61 es la que presenta la mayor concentración de este elemento, a su vez se observa que existe una mayor densidad de puntos con alto contenido de sodio aguas arriba del curso del río

Aconcagua. El sílice también posee una elevada concentración en manantiales, destacando la muestra MA-62 ubicada hacia la zona norte del área de estudio. El calcio y el magnesio tiene valores de concentración más elevadas en los pozos ubicados cercanos al río principal, no obstante, el calcio presenta sus mayores concentraciones en las zonas del valle, mientras que el mayor contenido de magnesio se observa en los pozos cercanos a las zonas montañosas.

Los aniones de manantiales con relación a su temporada se muestran en la siguiente figura:

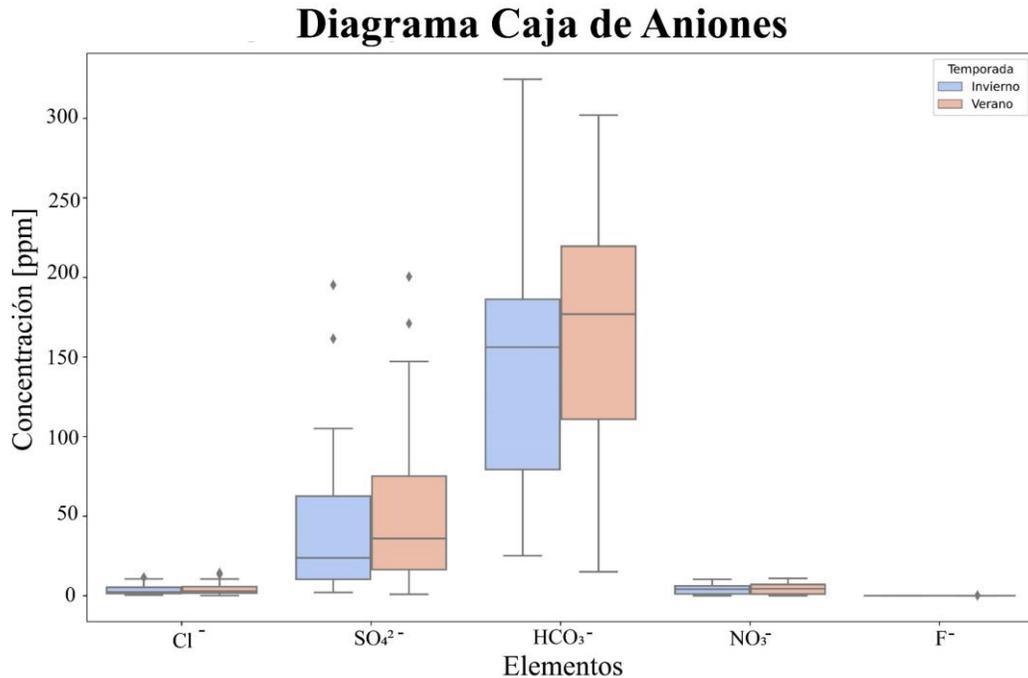


Figura 40. Diagrama cajas de Aniones. Se muestra la concentración en ppm por temporada de los datos relacionados a manantiales

Donde se observa que las concentraciones de cloro son menores en comparación al sulfato y bicarbonato, alcanzando un máximo de aproximadamente 14 ppm. Análogamente el fluoruro y el nitrato también muestran concentraciones menores, siendo el primero un elemento insignificante para el análisis en este estudio. El sulfato muestra dos valores atípicos por sobre los 150 ppm por temporada, y un desplazamiento de su mediana lo que implica una asimetría positiva de los datos, a su vez existe una leve variación entre temporada, alcanzándose concentraciones mayores en el verano. Por otro lado, el bicarbonato muestra concentraciones por sobre los 300 ppm durante la temporada de invierno y una mediana desplazada formando una asimetría negativa en los datos.

La Figura 41 ilustra los resultados de los aniones para los datos obtenidos de las muestras de pozos. En primer lugar, el cloruro muestra dos outliers por sobre los 50 ppm y una asimetría positiva. Al igual que en el caso de los manantiales, se encontraron bajas concentraciones de fluoruro en el contexto de este estudio, por lo que este elemento se descartó del análisis. El nitrato posee un valor atípico bajo los 50 ppm, se logra observar un desplazamiento de la mediana formando una asimetría positiva. En cuanto al sulfato se observa una asimetría negativa de los datos, un valor máximo por sobre los 200 ppm y ningún valor atípico. Finalmente, el bicarbonato también muestra

una asimetría negativa con un valor atípico por bajo los 50 ppm y concentraciones que llegan por sobre los 300 ppm.

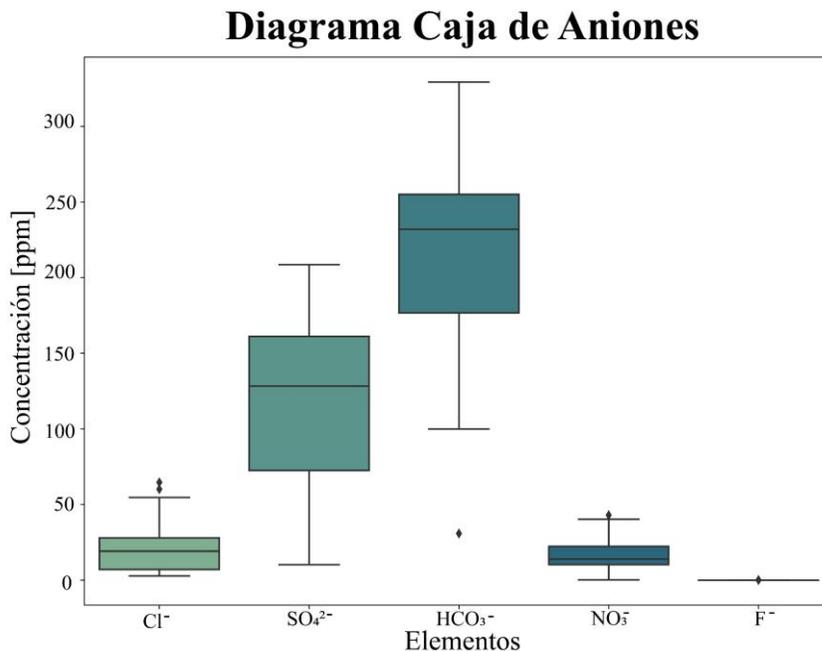


Figura 41. Diagrama cajas de Aniones. Concentración en ppm de los datos de pozos.

Al comparar los resultados entre los manantiales y los pozos, se puede observar que en ambos casos el HCO₃⁻ es el anión principal con mayor concentración, aunque se destaca con valores mayores en los pozos. Por otro lado, el F⁻ muestra una menor relevancia en ambos tipos de muestras.

La Figura 42 muestra la variación espacial del anión cloruro, sulfato, bicarbonato y nitrato de los resultados obtenidos para los pozos. En primer lugar, se observa que el cloruro posee una concentración de hasta 13 ppm en la zona norte y noreste del área de estudio, incluyendo entre estos valores los manantiales “alterados”. En la zona media del río Aconcagua se observan concentraciones de hasta 33 ppm y más hacia el este, aguas arriba se observa una mayor concentración de cloruro desde 43 a 73 ppm aproximadamente. El sulfato muestra tener concentraciones por sobre los 130 ppm en gran parte de los depósitos aluviales. Destaca el pozo PZ-07, hacia el oeste del área de estudio, y PZ-36 ubicada cercana al curso del río Aconcagua por su zona más este, ambos pozos con una concentración por sobre los 190 ppm aproximadamente. El bicarbonato se presenta concentrado principalmente en el borde del depósito aluvial, destacando la muestra PZ-32 y PZ-43 las cuales superan los 300 ppm. Se observan que, en la parte media del río principal, las concentraciones son menores a 120 ppm aproximadamente. Finalmente, el nitrato se observa mayormente concentrado en la zona norte y noreste de los depósitos. Sobresale la muestra de manantial MA-66 y los pozos PZ-01 y PZ-39, con concentraciones que van por sobre los 40 ppm. En las zonas circundantes al río Aconcagua y en la zona sur del área de estudio existe una baja concentración de nitrato que llega a valores de 30 ppm aproximadamente. Por último, no se observa que en los aniones exista una variación en dirección al flujo subterráneo descrito anteriormente.

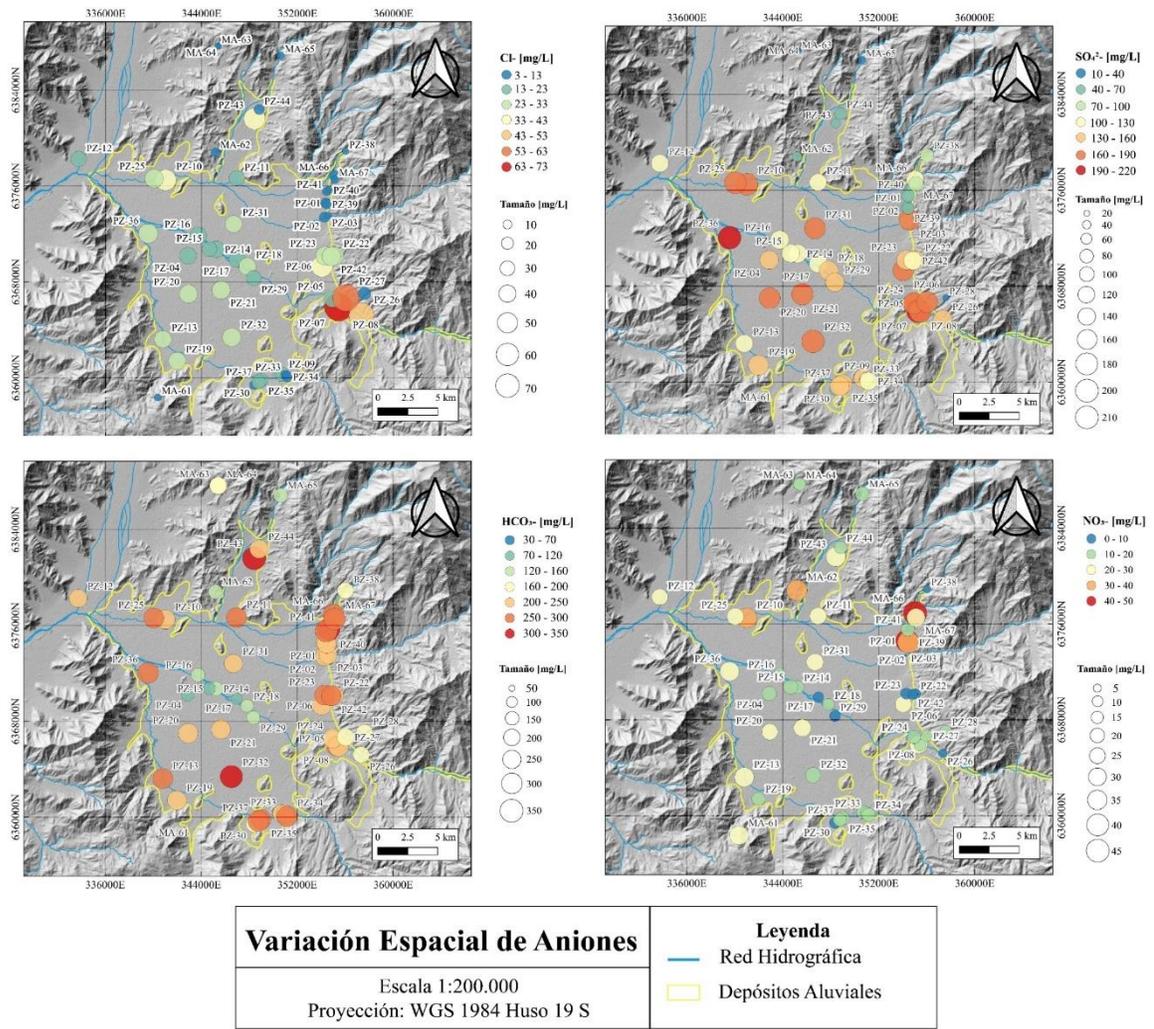


Figura 42. Mapa de variación espacial de aniones. La escala de colores va desde azul, indicando menor concentración al rojo el cual indica una concentración máxima.

4.4.3. Elementos Trazas

La Figura 43, muestra los diagramas cajas de los elementos trazas de los datos obtenidos en manantiales. En general se observa que existe una variabilidad por temporada en elementos como el litio, hierro, manganeso, cobre, selenio y cadmio principalmente. A modo general existe una mayor variabilidad en los datos en comparación a lo visto en los elementos mayoritarios y se observan medianas desplazadas en gran parte de los elementos lo que implica que estén más sesgados. Así mismo gran parte de los elementos, excluyendo el berilio, boro y estroncio, poseen valores atípicos, destacando el outlier del hierro, el cual posee una orden de magnitud mayor en comparación al resto de sus datos. Esto también ocurre con el cromo, manganeso y la plata. Destaca la dispersión de los datos en elementos como el litio, el arsénico, el manganeso, el circonio, el cesio y el uranio.

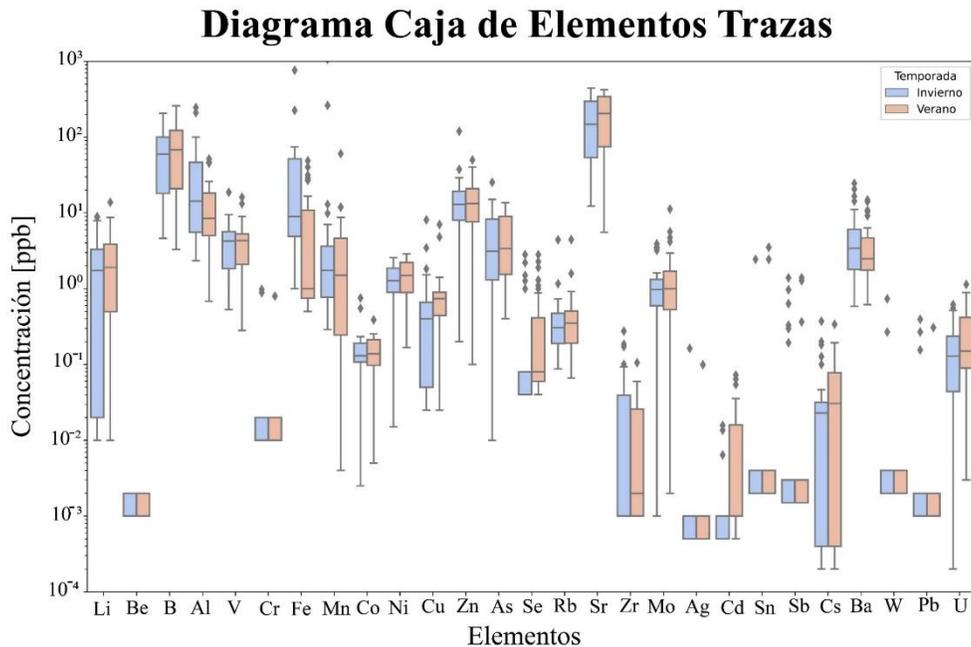


Figura 43. Diagrama cajas de Elementos Trazas. Se muestra la concentración en ppb por temporada de los datos relacionados a manantiales

La Figura 44, muestra los diagramas cajas de los elementos trazas de los datos obtenidos en pozos. A modo general existe una mayor variabilidad en los datos en comparación a lo visto en los elementos mayoritarios y se observan medianas desplazadas en gran parte de los elementos lo que implica que estén más sesgados. Así mismo se observa que gran parte de los elementos, excluyendo el berilio, cobalto, níquel, rubidio y estroncio, poseen valores atípicos. Destaca la gran dispersión del litio, aluminio, zinc y cesio. Finalmente se observan bajas concentraciones de berilio, cromo, circonio, plata, cadmio, estaño y antimonio.

Por otro lado, la Figura 45 muestra la variación espacial de los elementos trazas que muestran concentraciones de interés para el análisis posterior. En primer lugar, el cobalto se encuentra concentrado mayoritariamente en la zona sur del área de estudio. El níquel muestra menor concentración hacia los bordes de la Depresión Central, y muestra un punto destacado hacia el lado este de la zona de estudio, cercano al río Aconcagua. Finalmente, el estroncio se concentra en el punto más extremo del acuífero aluvial, aguas arriba del río Aconcagua.

Diagrama Caja de Elementos Trazas

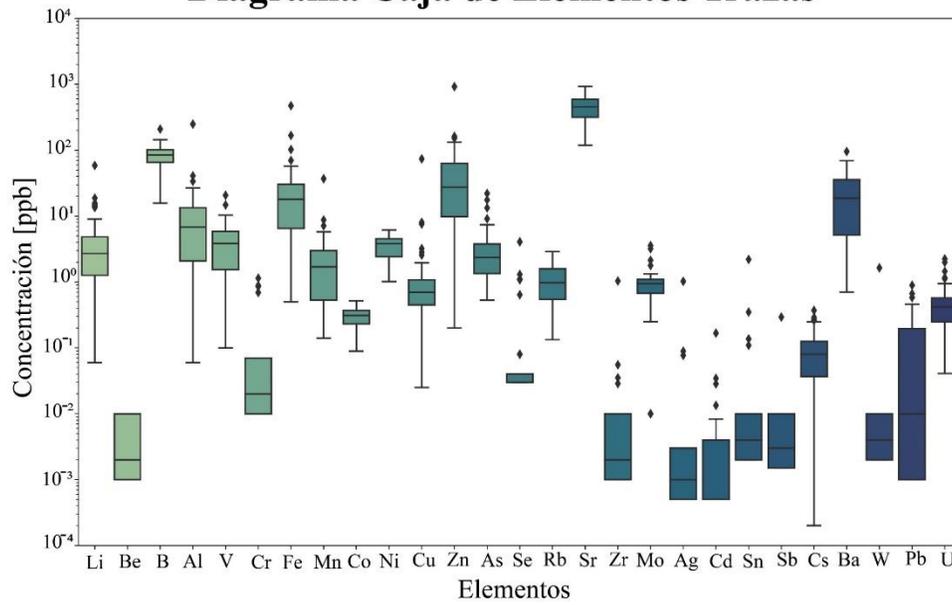


Figura 44. Diagrama cajas de Elementos Trazas. Se muestra la concentración en ppb de los datos relacionados a pozos

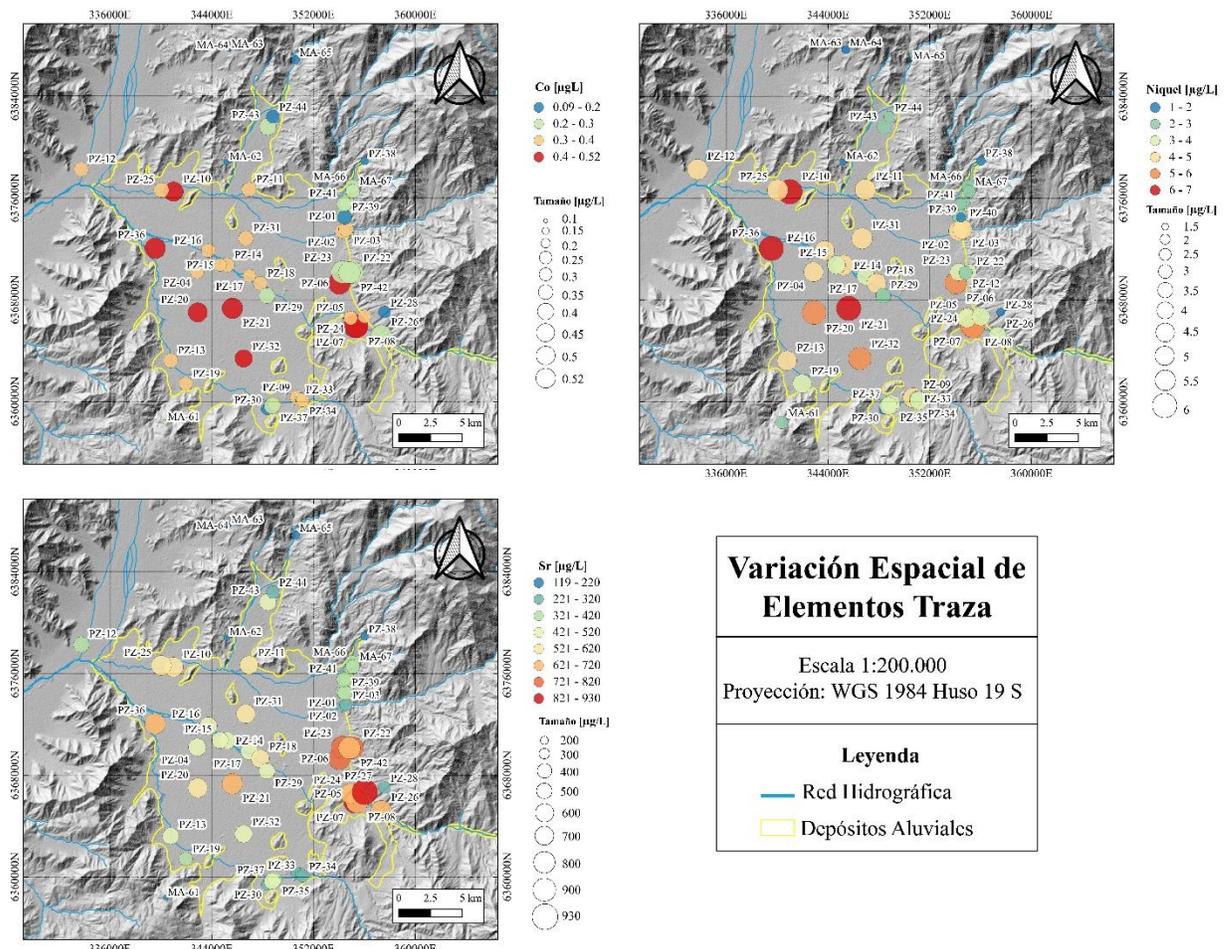


Figura 45. Mapa de Variación espacial de elementos traza.

4.4.4. Clasificación de aguas y su distribución espacial

La clasificación química de aguas subterráneas y superficiales incluyendo las muestras de ríos y canales, se efectuó mediante diagramas de Piper. Por otra parte, la distribución espacial de los mismo se realizó mediante la construcción de diagramas Stiff y su ubicación respectiva dentro del área de estudio.

4.4.4.1. Diagramas Piper

El diagrama Piper es una de las técnicas de visualización más utilizadas para la exploración gráfica de los datos químicos de agua subterránea. La combinación de un diagrama ternario de la composición catiónica principal (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ y Mg^{2+}) y un diagrama ternario de la composición aniónica principal (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) en un diamante central, lo convierten en una herramienta invaluable para identificar grupos o facies hidroquímicas e interpretar algunos procesos químicos que representa el conjunto de datos por analizar (Piper, 1944)

En la Figura 46 puede observarse el diagrama Piper construido para las muestras de pozos. De manera general, en los cationes predomina el contenido de Ca^{2+} mayor al 60%, en el caso de los aniones se observa que gran parte de las muestras presentan un contenido sobre el 50% una composición del tipo bicarbontada, también con cierto contenido de sulfatos y en menor contenido de cloruro. En resumen las muestras de pozos poseen una clasificación principal del tipo **bicarbonatada calcicas y sulfatada cálcicas**.

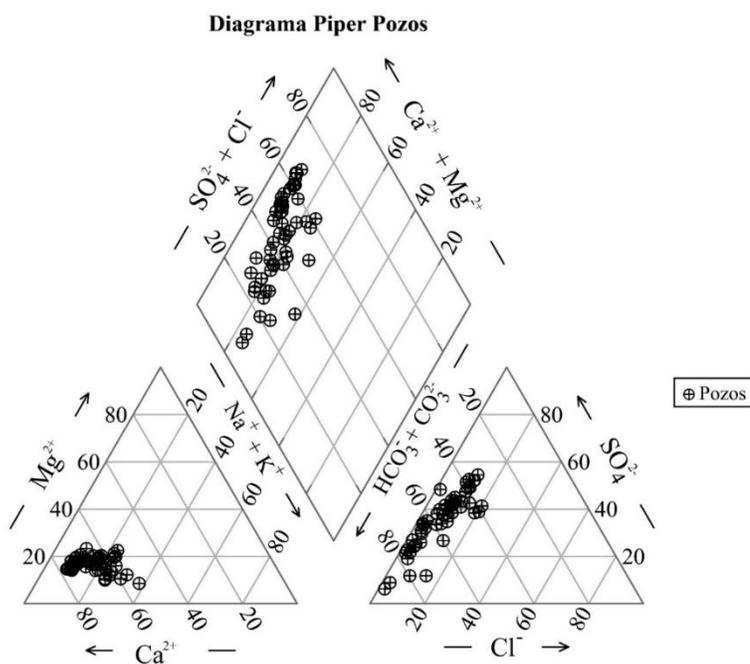


Figura 46. Diagrama Piper para la clasificación de agua correspondiente a las muestras de pozos. Datos en meq/L

En la Figura 47, se observa el diagrama Piper construido para las muestras de manantiales. En relación a los cationes predomina el contenido de Ca^{2+} mayor al 60%, no obstante, se distinguen dos muestras correspondientes a la MA-04 y MA-39 en las cuales destaca el contenido de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. En cuanto a las concentraciones de aniones, sobresale el HCO_3^- , sin embargo las muestras MA-01 y MA-18 poseen una mayor concentración del anión SO_4^{2-} . Por consiguiente existen dos familias de agua, siendo la **bicarbonatada cálcica** la que claramente refleja la clasificación del mayor porcentaje de muestras de manantiales, mientras que las muestras MA-04 y MA-39 reflejan una clasificación **bicarbonatada sódica**.

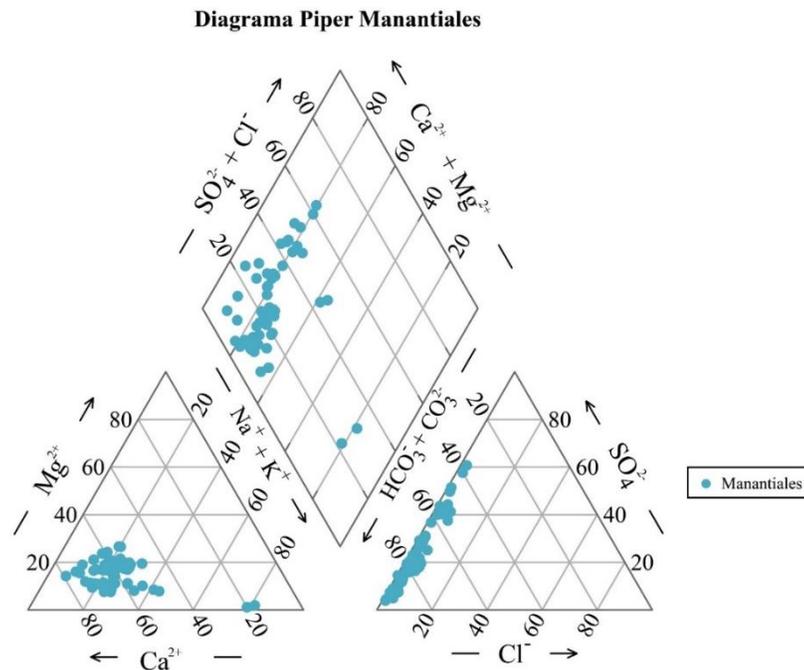


Figura 47. Diagrama Piper para la clasificación de agua correspondiente a las muestras de manantiales. Datos en meq/L

En relación a las muestras de aguas superficiales, la Figura 48 representa la clasificación para los datos de ríos. Referente a los cationes predomina el contenido Ca^{2+} mayor al 60% en gran parte de los datos. En el caso de los aniones se nota una mayor dispersión donde existen datos que muestran concentraciones relevantes de Cl^- , las muestras R-07, R-23 y R-26 poseen más del 58% de HCO_3^- , mientras que las muestras R-03, R-24 y R-25 presentan un contenido de SO_4^{2-} mayor al 70% aproximadamente. El resto de datos no presenta un dominio en cuanto a su concentración de aniones. A diferencia de lo observado en la clasificación de pozos y manantiales, los ríos presentan un tipo de agua **sulfatada cálcica**, **clorurada cálcica** y en menor proporción, **bicarbonatada cálcica**.

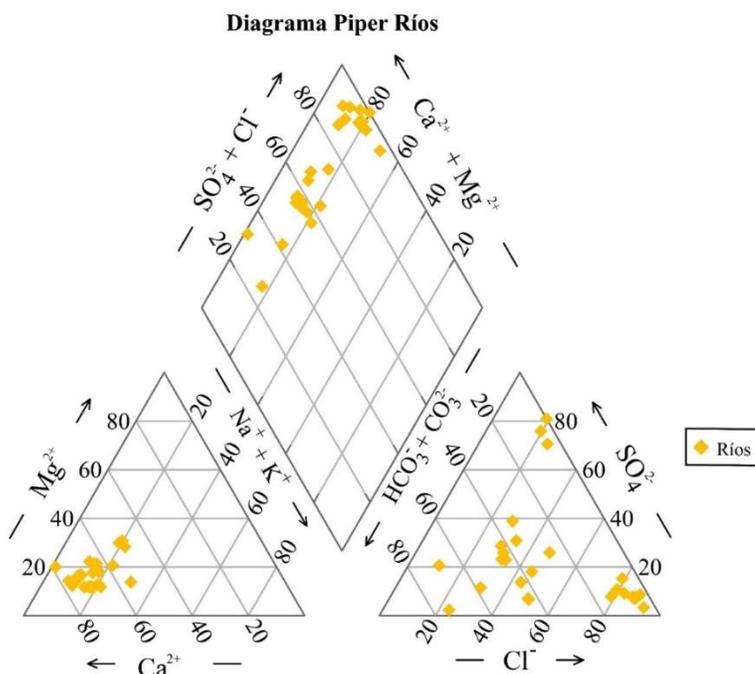


Figura 48. Diagrama Piper para la clasificación de agua correspondiente a las muestras de ríos. Datos en meq/L

La Figura 49 presenta los resultados de las muestras de canal. En general se observa que la composición de cationes al igual que los casos anteriores muestra un predominio del contenido de Ca^{2+} con valores superiores al 74%. En el caso de los aniones, se distingue un contenido mayor al 50% de SO_4^{2-} . En consecuencia, la clasificación de las muestras de canal es **sulfatada cálcica**.

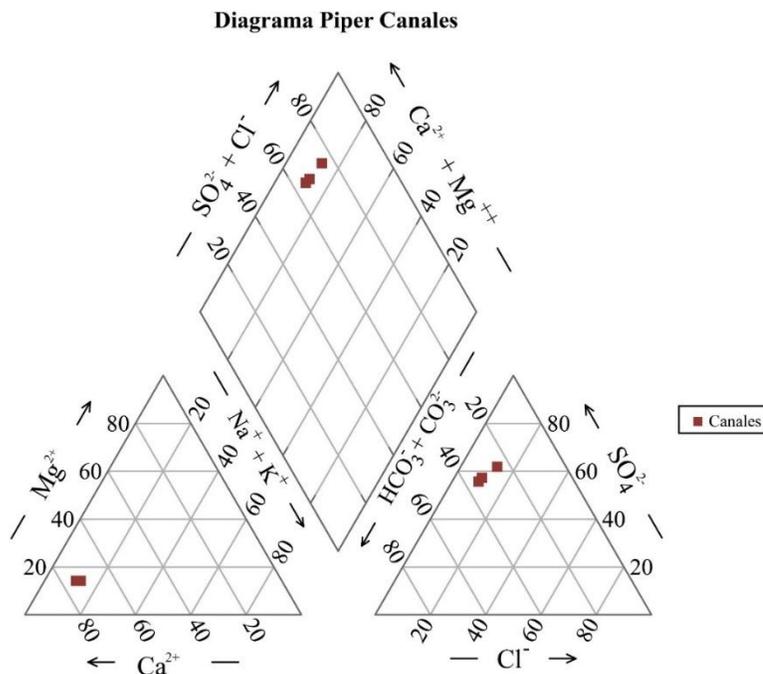


Figura 49. Diagrama Piper para la clasificación de agua correspondientes a las muestras de canales. Datos en meq/L

A modo general se puede mencionar que la composición bicarbonatada cálcica de gran parte de las muestras de pozos, manantiales y en menor medida de río, es característica de aguas poco evolucionadas con corto tiempo de residencia. Por otro lado, la presencia de aguas sulfatadas cálcicas y cloruradas cálcicas se relacionarían a un tiempo de residencia mayor.

4.4.4.2. Diagramas Stiff

En el diagrama de (Stiff, 1951) la concentración de iones es presentado por un polígono cuyo lado izquierdo describe el contenido de cationes mayores (Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$), y el lado derecho, los aniones mayores (Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^-). La distancia desde el eje central es proporcional a las concentraciones en (meq/L) de iones individuales, mientras que la distancia vertical entre los ejes horizontales es arbitraria. La ventaja de este patrón es que el agua de composición química similar tiene geometría y forma semejantes.

La distribución de estos diagramas asociados a las muestras de pozos del área de estudio se ilustra en la Figura 50.

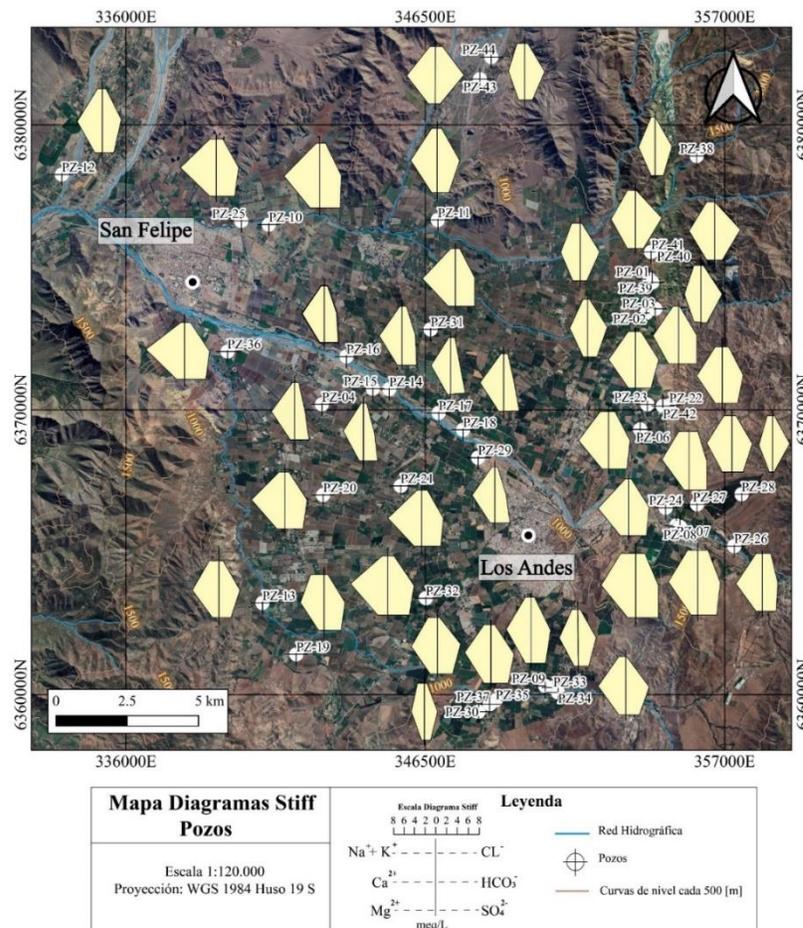


Figura 50. Mapa de la distribución de los diagramas Stiff de las aguas de pozo

En el mapa se muestran los diagramas Stiff de los pozos, si bien se observa el predominio del tipo de agua bicarbonatada cálcica existe una diferencia en las concentraciones de los elementos mayoritarios de acuerdo con la distribución espacial. En general hacia la zona sur del área de estudio se visualiza una mayor concentración del catión Ca^{2+} , además de una mayor concentración del anión HCO_3^- . Los pozos PZ-04, PZ-14, PZ-15, PZ-16, PZ-17, PZ-18, PZ-19 y PZ-29, los cuales se ubican cercano al flujo del río Aconcagua, muestran una composición más bien sulfatada cálcica, con concentraciones menores de iones mayoritarios en comparación al resto de muestras ubicadas en otras zonas. Hacia el norte se observa diagramas similares con pequeñas variaciones de concentración. Finalmente, no se observa una tendencia en el aumento de las concentraciones que siga la dirección principal del flujo subterráneo y/o superficial.

En la Figura 51 se presentan los diagramas Stiff de las muestras de manantiales en temporada verano.

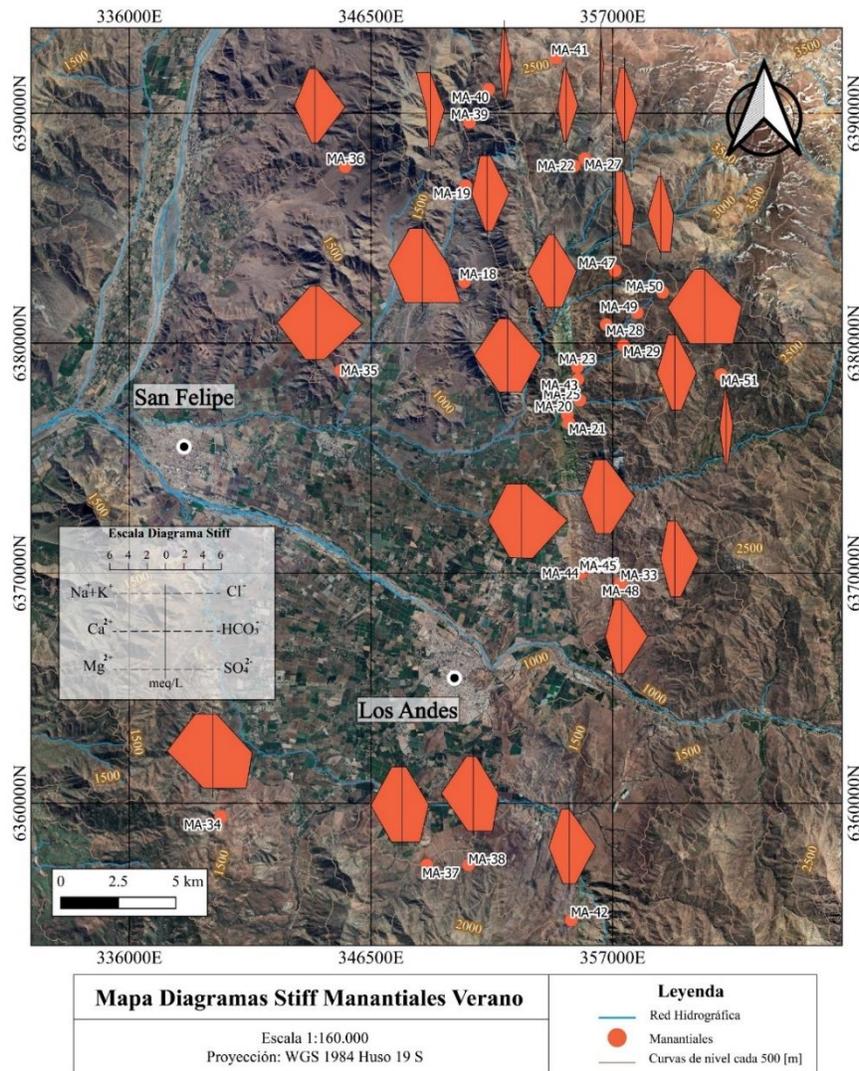


Figura 51. Mapa de la distribución de los diagramas Stiff de las aguas de manantial en la temporada de verano.

A modo general, se observa que predomina el tipo de agua bicarbonatada cálcica con una mayor concentración iónica hacia las zonas más cercanas a los depósitos aluviales con una tendencia en dirección sur, mientras que los manantiales hacia la zona noreste presentan una concentración menor. La muestra MA-39 presenta una composición atípica dentro del área de estudio teniendo una clasificación sulfatada sódica y ubicándose sobre la cota 1500 [m.s.n.m]. Igualmente, la muestra MA-18 difiere del resto por mostrar una composición sulfatada cálcica, ubicándose a los 1100 [m.s.n.m] aproximadamente.

Los diagramas Stiff de los manantiales obtenidos durante la temporada de invierno, se ilustran en la Figura 52.

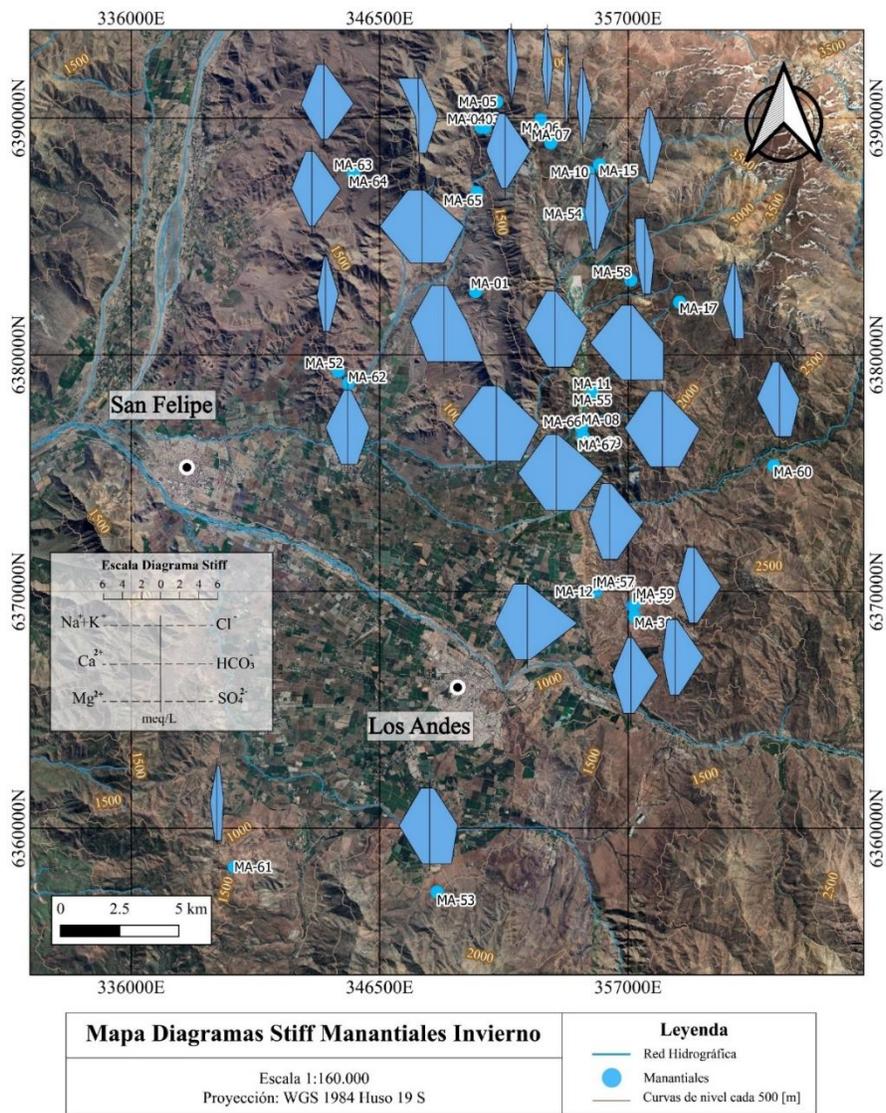


Figura 52. Mapa de la distribución de los diagramas Stiff de las aguas de manantial en la temporada de invierno.

Al igual que los datos obtenidos durante la temporada verano, se puede observar el predominio del tipo de agua bicarbonatada cálcica con una mayor concentración iónica en dirección sur, siendo los manantiales de la zona noreste los que nuevamente muestran una menor concentración. Los manantiales análogos a la temporada de verano muestran un comportamiento similar en cuanto a su composición en temporada invierno, no obstante, en el manantial MA-61 existe un cambio importante en la concentración iónica viéndose disminuida a concentraciones menores a 2 [meq/L]. A su vez, el manantial MA-60, presenta un aumento en la concentración iónica en comparación a su análogo en temporada de verano (manantial MA-51). La muestra MA-04 (equivalente al manantial MA-39) sigue exhibiendo una composición atípica al general de los manantiales, teniendo una clasificación sulfatada sódica. Esto también ocurre en el caso del manantial MA-01 (equivalente a la muestra MA-18), al conservar su clasificación sulfatada cálcica.

4.4.5. Correlación de iones

El coeficiente de correlación lineal mide el grado de proporcionalidad o relación que existe entre dos variables y posee un valor entre -1 y 1, siendo estos límites los casos en el cual las variables son exactamente proporcionales. Con la existencia de más de dos variables se puede construir una matriz de correlación la cual permite determinar si es adecuado realizar análisis factorial de componentes y clúster, para de ese modo guiar las variables a escoger.

Los resultados exhiben que los elementos que presentan una excelente correlación es decir $> 0,70$) son: $[\text{Cl}^-, \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^-, \text{Ca}^{2+}, \text{SiO}_2, \text{Co}, \text{Ni}, \text{Be}, \text{Sr}, \text{B}, \text{W}, \text{Sb}]$. Las variables que presentan una buena correlación entre 0.50-0.70 son: $[\text{Rb}, \text{Sr}, \text{Ni}, \text{Ba} \text{ y } \text{U}]$. Estos valores se podrían considerar para análisis posteriores.

Como se puede observar en la Figura 53, el anión mayoritario en las muestras es el sulfato, en segundo lugar, el cloruro y, por último, el bicarbonato. Por su parte, el catión mayoritario es el calcio, en segundo lugar, el magnesio y, por último, el sodio. Al comparar los cationes versus los aniones se observa que el calcio presenta una correlación significativa con el cloruro y el sulfato, a su vez se relaciona bien con el bicarbonato. El sodio posee una buena correlación con el bicarbonato, y el magnesio muestra proporcionalidad con el sulfato y una excelente correlación con el bicarbonato. En cuanto a los elementos trazas, se puede observar que el cobalto, níquel y estroncio poseen valores sobre los 0.7 con el cloruro, el sulfato y el calcio. Finalmente, el zinc posee una relación con elementos como el berilio, aluminio, hierro, manganeso, cobalto y níquel.

El cálculo de las relaciones iónicas de los elementos mayoritarios del agua, son importantes para evaluar los procesos que modifican la hidrogeoquímica del agua subterránea y diferenciar los distintos tipos acorde a su tránsito por una unidad hidrogeológica (López Velandia, 2018). Es por esto que, con los resultados de las relaciones vistas anteriormente en la matriz de correlación, se realizan los siguientes diagramas binarios considerando los elementos mayoritarios y elementos trazas que mostraron una correlación relevante.

En primera instancia se tienen las relaciones iónicas del Cl^- , con respecto a los iones mayoritarios. Como se observa en la Figura 54, las muestras no presentan una correlación muy clara y los valores de R^2 (el cual indica que tan bien se ajusta la línea de tendencia propuesta a los datos observados) son mucho menos a 1. Con respecto a las relaciones entre el sulfato y los iones mayoritarios (Figura 55) se destaca el buen ajuste con el Ca^{2+} y el Mg^{2+} . A su vez se observa que el sulfato posee una buena correlación con elementos trazas como el cobalto, níquel y estroncio con valores de R^2 sobre 0.7 para los dos primeros y sobre 0.5 para el estroncio (Figura 57). Finalmente, las relaciones iónicas de HCO_3^- con respecto a cationes que se observan en la Figura 56, muestran una buena correlación, siendo la relación entre el Ca^{2+} y HCO_3^- la que más destaca.

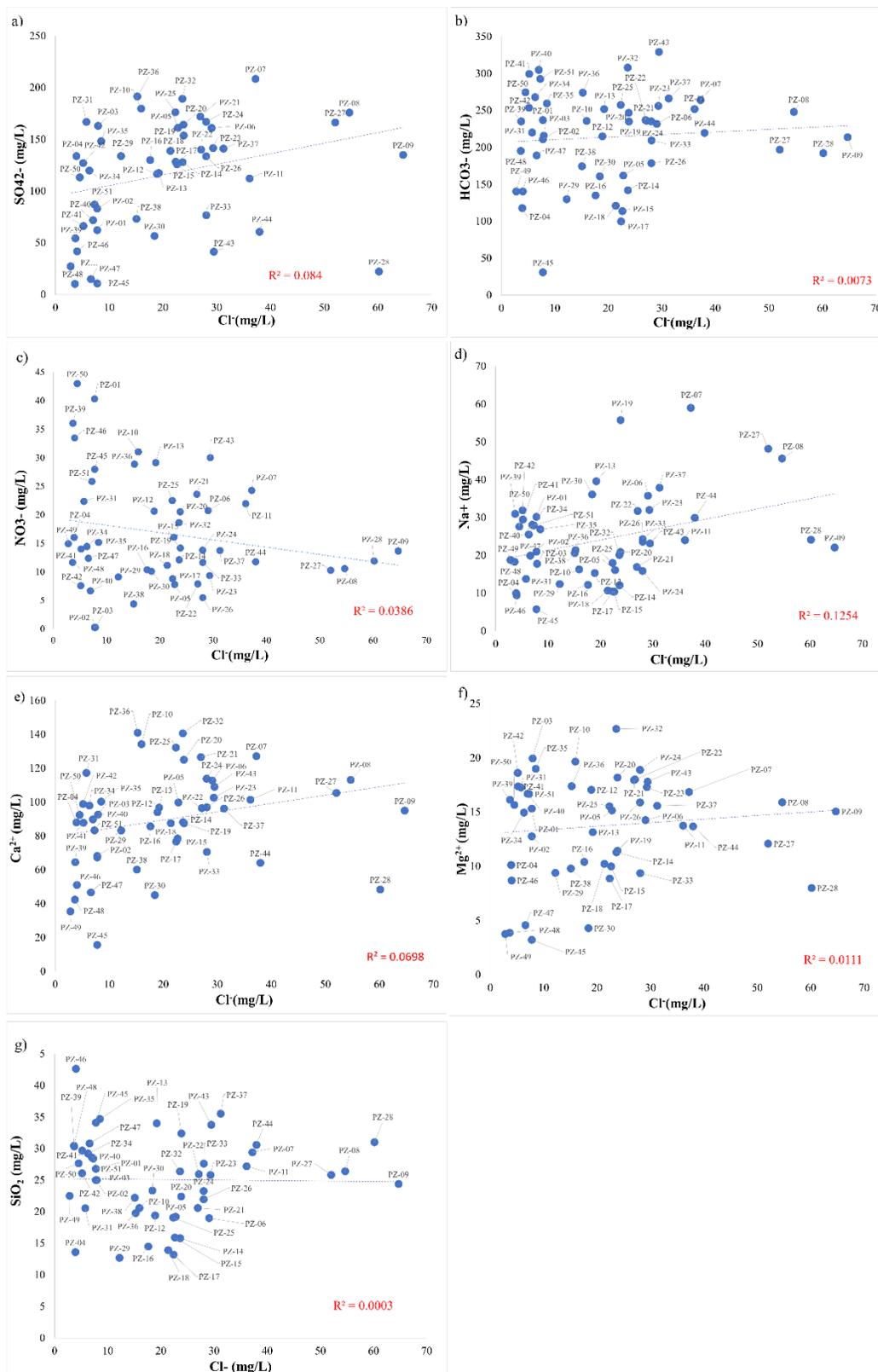


Figura 54. Relaciones iónicas en mg/L de Cl⁻ con respecto a los iones mayoritarios

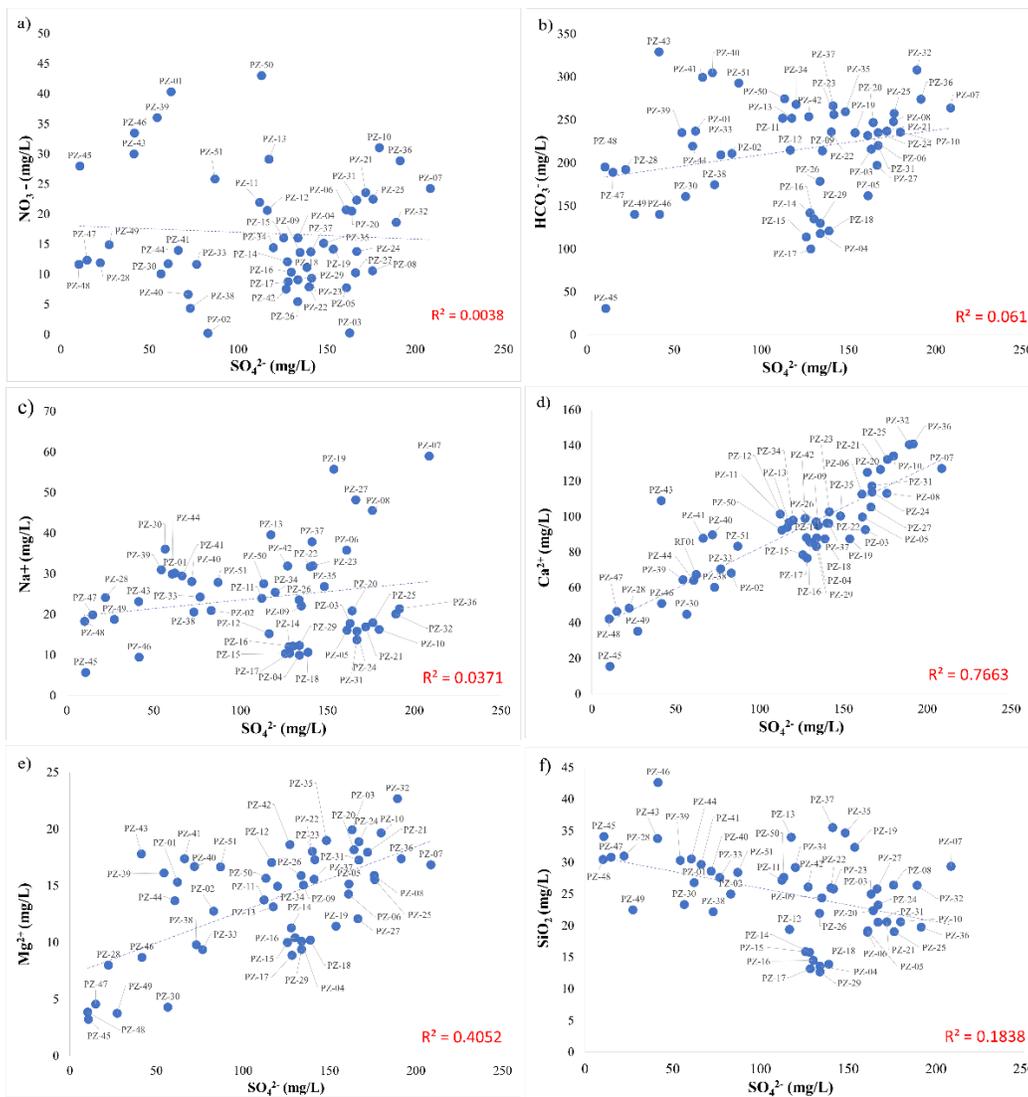


Figura 55. Relaciones iónicas en mg/L de SO_4^{2-} con respecto a los iones mayoritarios.

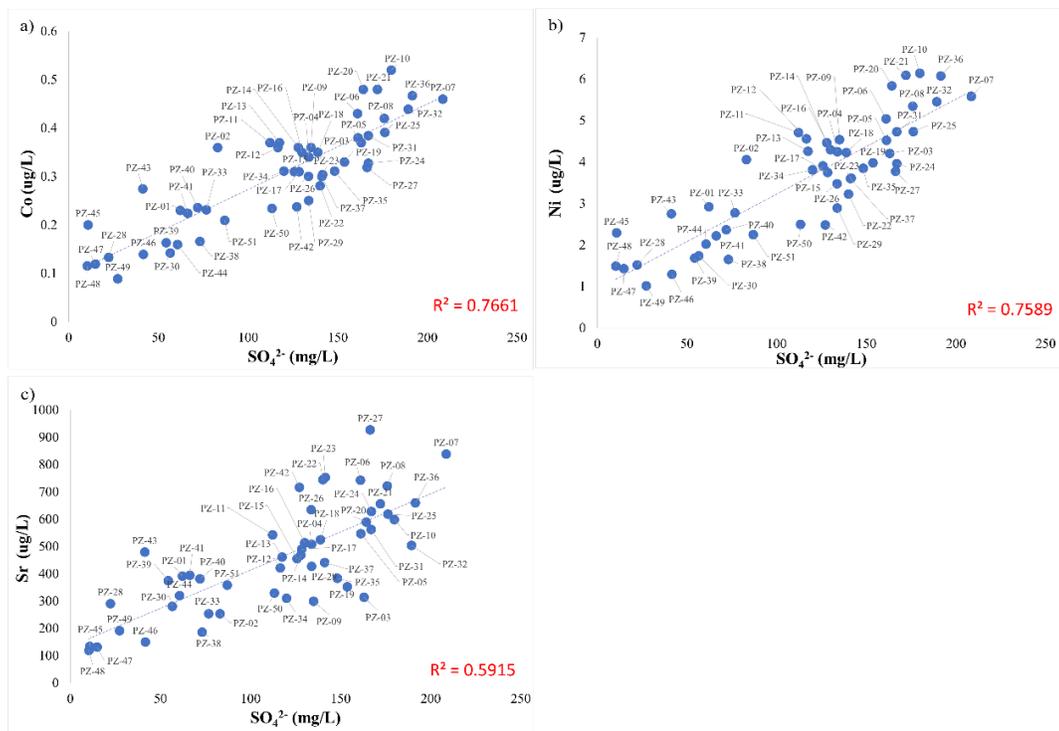


Figura 57. Relaciones iónicas en mg/L de SO_4^{2-} con respecto a elementos trazas

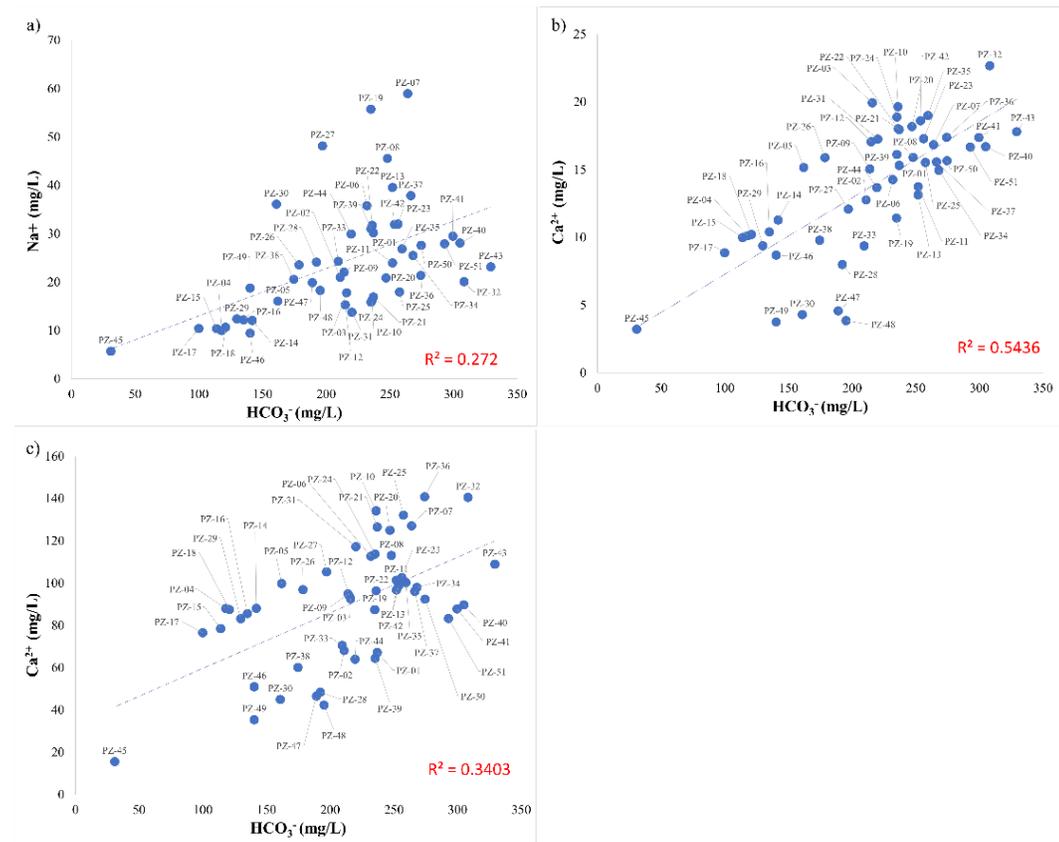


Figura 56. Relaciones iónicas en mg/L de HCO_3^- con respecto a cationes

4.5. Análisis Estadístico Multivariante

El análisis estadístico multivariado es un enfoque cuantitativo que se utiliza de manera independiente para clasificar las aguas subterráneas. Este enfoque permite agrupar las muestras de aguas subterráneas y establecer correlaciones entre los diferentes parámetros químicos presentes en ellas (Cloutier et al., 2008). Al combinar el análisis de factores (AF) y el análisis de conglomerados (HCA), se logra clasificar las muestras de agua en diferentes grupos en función de sus características hidrogeoquímicas.

4.5.1. Análisis de Conglomerados Jerárquicos (HCA)

Se realizó HCA para determinar las relaciones entre las muestras usando la distancia euclidiana como regla de ligamiento (Moeck et al., 2016). El uso de HCA permite resaltar los clústeres geoquímicos más distintivos (Güler et al., 2002). La similitud entre grupos se expresa mediante la distancia de enlace euclidiana en un dendrograma, el cual es la representación gráfica que ayuda a interpretar el resultado de un análisis de conglomerados (Güler et al., 2002). A continuación, se presenta los resultados del análisis aplicado a la totalidad de los datos de pozos en conjunto con la muestra R-28 y CA-03, de río y canal respectivamente.

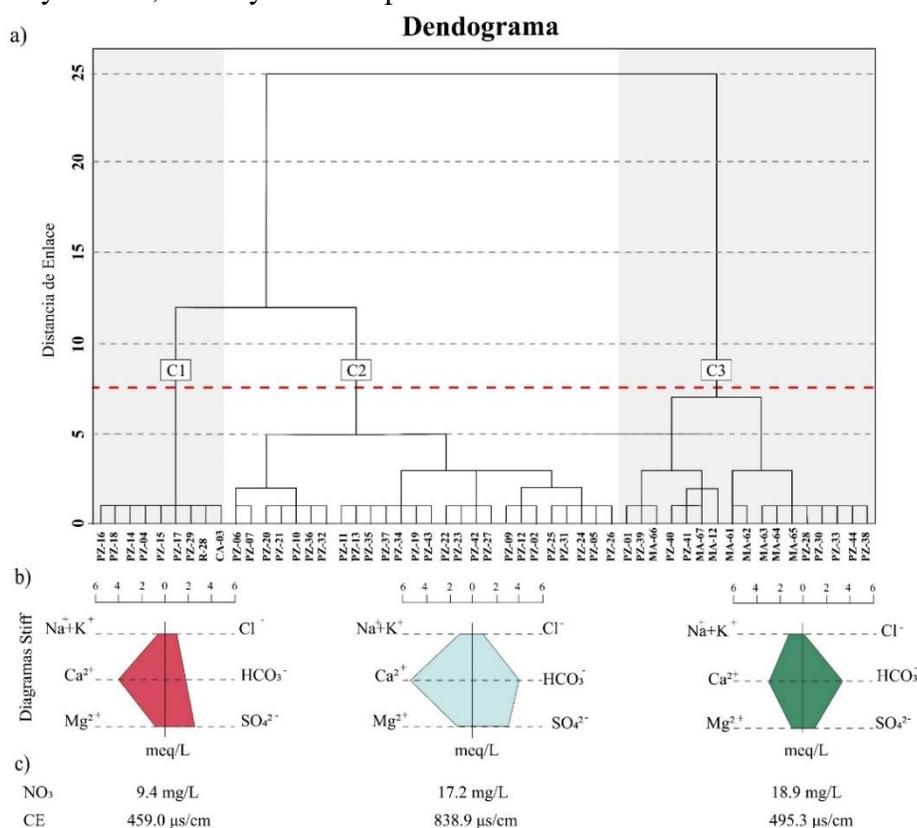


Figura 58. Dendrograma con línea horizontal imaginaria (línea fenónica en rojo) para definir tres grupos de muestras de agua en función del análisis de conglomerados jerárquicos de las variables utilizando un conjunto de datos normalizados.

La línea fenónica utilizada se traza en una distancia de enlace de alrededor de 8, construyéndose un total de tres grupos. Como se logra observar en la Figura 58, el primer grupo incluye tanto a la muestra de río como la muestra de canal mencionadas anteriormente, además de 7 muestras de pozos. El segundo grupo reúne un total de 26 muestras de pozos y finalmente el grupo 3 aglomera el resto de los datos de pozos incluyendo manantiales, específicamente la MA-66, MA-67, MA-12, MA-61, MA-62, MA-63, MA-64 y MA-65. La Figura 58.b) muestra los diagramas Stiff realizados de acuerdo con el promedio de los elementos mayoritarios por cada clúster. Con respecto a ello, el clúster 1 (C1), posee una facie de agua sulfata cálcica, mostrando además un bajo contenido de nitrato y de conductividad eléctrica en comparación a los demás clústers (Figura 58.c). Por otro lado, el clúster 2 (C2), posee una familia de agua bicarbonatada cálcica con una mayor carga iónica, teniendo una conductividad eléctrica promedio de 838.9 [$\mu\text{S}/\text{cm}$], la mayor entre los grupos, y una concentración de nitrato de 17.2 [mg/L]. Por último, el clúster 3 (C3) presenta un tipo de agua bicarbonatada cálcica, con una conductividad eléctrica promedio de 495.3 [$\mu\text{S}/\text{cm}$] y la mayor concentración de nitrato entre los clúster, con 18.9 [mg/L].

A continuación, se presenta la distribución de los distintos componentes del análisis jerárquico obtenido.

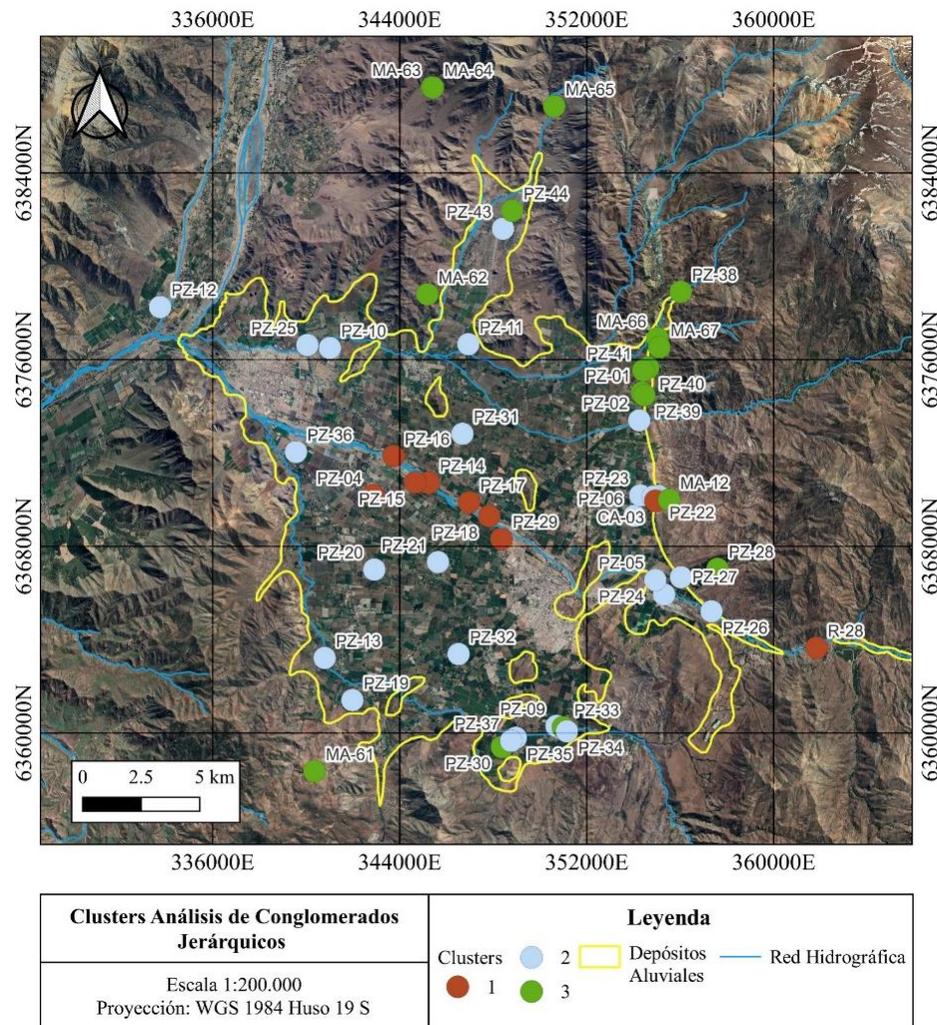


Figura 59. Distribución de los clústers obtenidos del análisis de conglomerados jerárquicos

En cuanto al componente 1 representado en color rojo, se distingue por seguir una distribución cercana al flujo del drenaje principal de la cuenca, mientras que la muestra de río se ubica en el mismo curso de agua en cuestión, pero hacia el este acercándose a cotas más altas y al nacimiento del río Aconcagua. La muestra de canal se aleja de la influencia del río Aconcagua ubicándose cercana a las zonas de piedemonte del área de estudio. Las variables pertenecientes al componente 2 representando en color celeste en general se observan próximo a los límites del área asociada a los depósitos aluviales, no obstante, algunas muestras como los pozos PZ-20, PZ-21 y PZ-32 se encuentran hacia el centro del área estudio. El componente 3 que agrupa a los manantiales junto con el resto de los pozos, se observa distribuido en zonas de roca a cotas más elevadas rodeando el depósito aluvial y más bien concentrados en la zona norte.

4.5.2. Análisis de Factores (AF)

Uno de los métodos principales del proceso estadístico multivariante es el Análisis de Factores (AF). Esta herramienta es un método estadístico utilizado para valorar la interrelación entre los distintos parámetros dentro de un gran conjunto de datos y resumir la información en un conjunto más pequeño de factores (Subyani & Al Ahmadi, 2010).

Los resultados del análisis de factores para los datos hidrogeoquímicos de las muestras de pozos, manantiales, río y canal se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Matriz de componente rotado, análisis de factores con rotación Varimax. Valores en rojo representan las variables indicadas en cada factor.

Matriz de componentes rotado			
Variabes	Factor		
	1	2	3
Cl ⁻	0.906	-0.008	-0.094
SO ₄ ²⁻	0.943	-0.034	-0.024
HCO ₃ ⁻	0.199	0.894	0.233
NO ₃ ⁻	0.053	0.102	0.939
Na ⁺	0.067	0.885	-0.174
Ca ²⁺	0.907	0.299	0.189
Mg ²⁺	0.637	0.577	0.266
SiO ₂	-0.447	0.666	0.381
Ni	0.902	-0.112	0.163
Sr	0.866	0.208	-0.137
Varianza (%)	47.485	25.179	12.733
Varianza Acumulada (%)	47.485	72.665	85.398

La matriz de carga factorial (la carga factorial es la medida del grado de proximidad entre las variables y el facto) se rota mediante el método de Varimax, que da a lugar a la maximización de la varianza de la carga factorial de las variables. Este procedimiento da a lugar a una matriz factorial rotada (Tabla 7) en la que cada factor se describe sólo en términos de esas variables y permite una

mayor facilidad de interpretación (Jayakumar & Siraz, 1997). La mayor carga, positiva o negativa, sugiere el significado de la dimensión; la carga positiva indica que la contribución de las variables aumenta con el incremento de carga en una dimensión; y la carga negativa indica una disminución (Lawrence & Upchurch, 1982).

En este estudio se identificaron un total de tres factores que explican el 85.40 % de la varianza acumulada. Estos factores indicarían diferentes fuentes asociadas a las variables pertenecientes a cada uno. El Factor 1 explica el 47.49% de la varianza en los datos. Las variables presentes en este factor son Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Ni y Sr. El Factor 2 explica el 25.18% de la varianza de los datos, las variables que lo incluyen son HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} y SiO_2 . El Factor 3, con 12.73% de la varianza, está integrado únicamente por la variable NO_3^- .

La siguiente figura representa los factores mencionados con sus respectivas variables y muestras utilizadas dentro del análisis factorial.

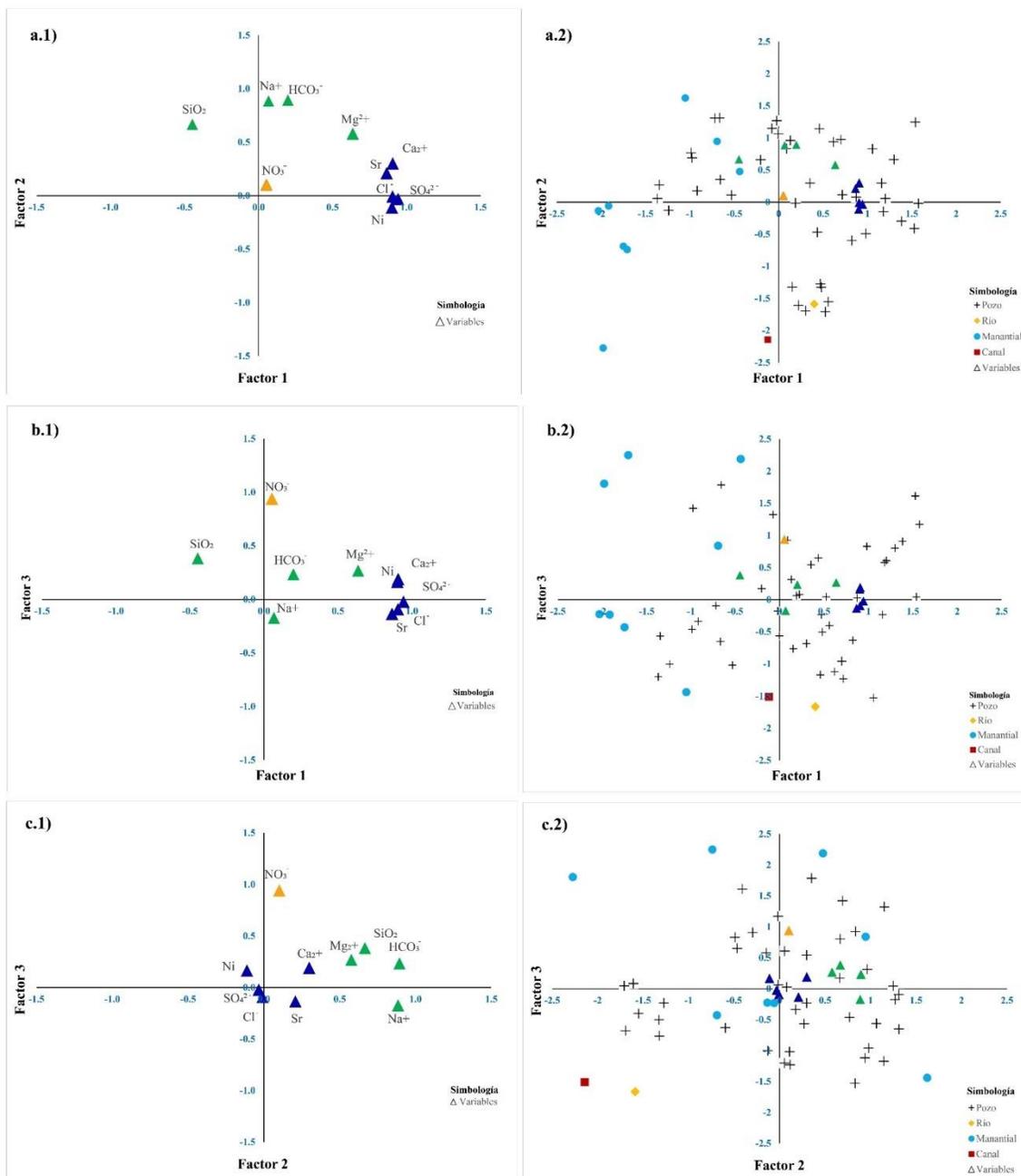


Figura 60. Gráfico de factores y la carga factorial asociada a cada variable y muestra analizada. a) representación gráfica del Factor 1 y 2, b) representación gráfica del Factor 1 y 3, c) representación gráfica del Factor 2 y 3

En la Figura 60a.1 y a.2 se representan las variables utilizadas para el análisis y su carga en el Factor 1 y Factor 2. Se puede observar gráficamente como los elementos Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Ni y Sr tienen una carga positiva con respecto al Factor 1. Particularmente al analizar los valores de estroncio y níquel en las muestras de río, se observa una alta concentración de ellos, estas concentraciones elevadas pueden ser indicativas de la relevancia de estos elementos químicos en el contexto del estudio realizado. La Figura 60b.1 y b.2 ilustra en su ordenada las cargas del Factor 3, en el cual se observa una relación positiva con respecto al NO₃⁻, siendo asociado a algunas de las

muestras de pozos, pero con una mayor relevancia en las muestras de manantiales. Finalmente, la Figura 60 c.1 y c.2 representa el Factor 2 en las abscisas, el cual es mayormente asociado a las variables ya descritas, concentrando mayormente muestras de pozo y teniendo una carga negativa en las muestras asociadas a las aguas superficiales.

Los mapas presentes en la Figura 61 indican el valor de los factores relacionados a cada muestra usada para el análisis. En ellos se representa mediante colores partiendo desde rojo hasta el azul los datos que posean desde una mayor a una menor relevancia respectivamente con dichos factores, además, desde un tamaño menor a uno mayor en la circunferencia que los representa.

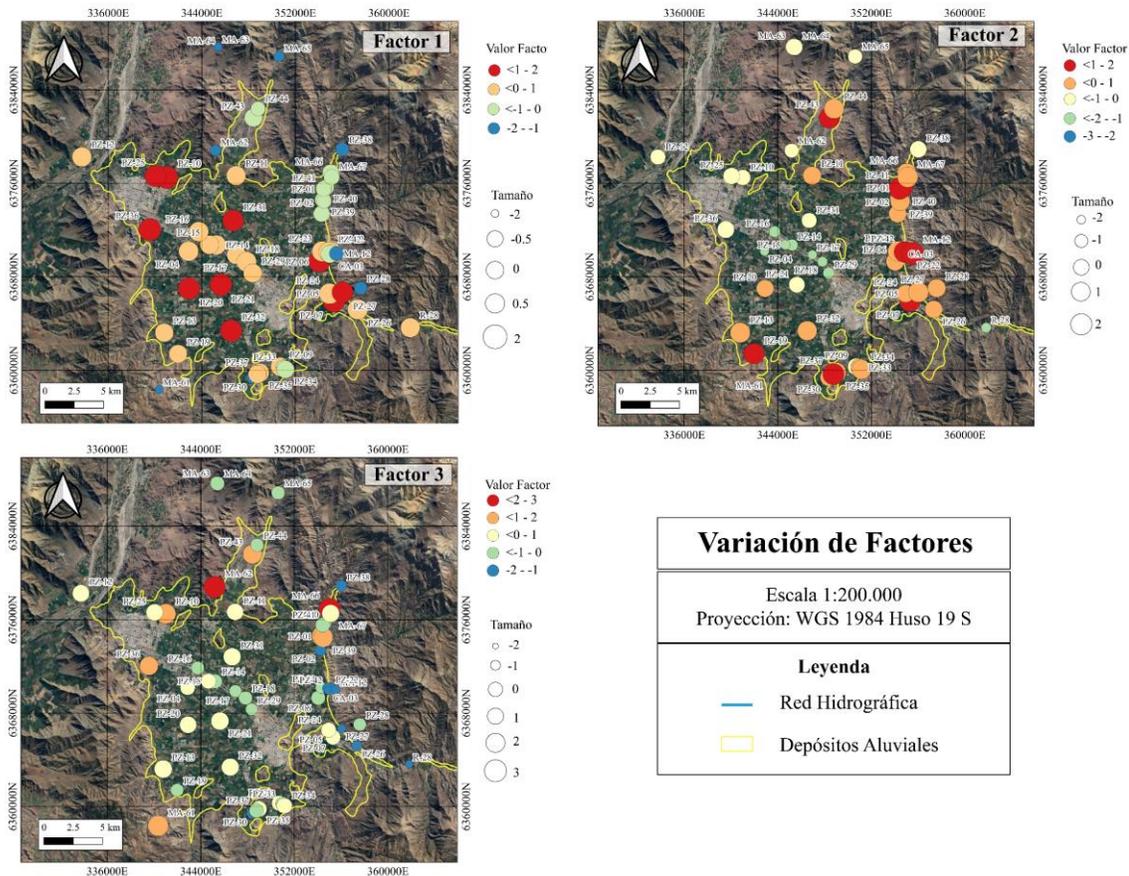


Figura 61. Variación espacial de los factores F1, F2 y F3.

El Factor 1 muestra mayor relevancia en los pozos cercanos a lugares poblados, como los alrededores de San Felipe, lugares que muestran una concentración importante de zonas de agricultura y principalmente en los pozos cercanos al caudal superficial principal con valores cercanos a 1. Se observa que este factor pierde relevancia en la zona noreste del área de estudio, siendo los pozos PZ-28 y PZ-38 los que muestran un valor mínimo entre -2 y -1. El Factor 2 posee rangos elevados entre 0.7 y 1.7 en sectores cercanos al piedemonte o en las zonas límites del depósito aluvial, destacando en el borde oriental donde se presenta una línea continua de variables con un rango entre 0.3 a 1.7 de este factor. A su vez las muestras de manantiales poseen un valor mayor en el Factor 2 en comparación a los otros. A diferencia del Factor 1, los pozos cercanos al río Aconcagua muestran rangos entre -2,3 y -1.3 siendo menos significantes. Finalmente, se observa que para el Factor 3, las muestras ubicadas en la zona sureste tienen valores menores para este factor, llegando a 0,3, al igual que los pozos cercanos al río. No se observa una distribución con

algún comportamiento en específico, sin embargo, se destacan algunas muestras de manantiales como MA-61, MA-62 y MA-63 con valores que van desde 1.3 a 2.3.

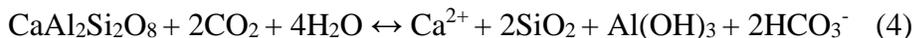
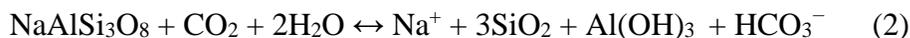
La interpretación geoquímica de los tres factores ya mencionados proporciona una visión de los procesos dominantes que pueden controlar la distribución de las variables hidrogeoquímicas (Huang et al., 2005) y que se complementan con los análisis anteriores.

El Factor 1 incluye dentro de sus variables mayoritarias al Cl^- , SO_4^{2-} y al Ca^{2+} , y como se observó en los diagramas Piper de la sección 4.4.4.1, las aguas superficiales, particularmente las muestras de ríos presentan facies cloruradas cálcicas y sulfatadas cálcicas. Sumado a lo observado en la Figura 61 se puede interpretar que este factor está asociado completamente a la química del río y los pozos cercanos a este. Cabe destacar que tanto el estroncio como el sulfato presentaron una correlación positiva y ambos forman parte de algunos tipos de fertilizantes. Considerando que la fuente de Na^+ y HCO_3^- es la disolución de plagioclasas, y que además se observa como las muestras pertenecientes al clúster 3 (ubicadas principalmente en roca) poseen el mayor peso (Figura 61), se puede afirmar que el Factor 2 destaca los procesos de interacción agua-roca. Por otro lado, el Factor 3 agrupa únicamente al NO_3^- , el cual se asocia principalmente a un origen antropogénico, debido que se ha estudiado en variadas investigaciones el efecto de los fertilizantes, cuyo compuesto principal es el nitrato, en acuíferos ligados a altas actividades agrícola (Arumi et al., 2020; Fernández et al., 2017) como es el caso estudio de la presente investigación.

Diversos estudios han revelado que la hidrogeoquímica de los sistemas de agua subterránea está influenciada por el entorno hidrogeológico, la geología, la meteorización química, el intercambio iónico, los insumos agrícolas entre otros factores (Arumi et al., 2020; S. Foster et al., 2018; Taucare et al., 2020). En la meteorización química, la hidrólisis es un cambio químico muy importante. Los iones de hidrógeno en el agua reaccionan con los minerales y hacen que se desintegren en varios iones. Esta reacción a menudo se acelera por la presencia de CO_2 disuelto que también puede derivarse de la respiración y la descomposición de los organismos en el suelo, para producir ácido carbónico, H_2CO_3 .

Como se mencionó anteriormente el análisis de los Diagramas Piper, las facies que destacan en la zona de estudio son bicarbonatada cálcica y sulfatada cálcica. De acuerdo con la geología del área de estudio las rocas volcánico-sedimentarias son composicionalmente andesíticas (Taucare et al., 2020a), cuyos principales minerales son las plagioclasas. En los Andes de Chile Central existe una variedad de plagioclasas, que van desde composición más sódicas a cálcicas; Na-plagioclasa (albita), Ca-plagioclasa (anortita), labradorita como plagioclasa de composición intermedia (Fuentes et al., 2004).

Las reacciones químicas de meteorización entre los minerales de origen y el agua dan lugar a la disolución y formación de nuevos minerales, a continuación, se presentan los más relevantes en relación con el contexto geológico ya mencionado.



La ecuación (2) muestra la disolución de la albita que reacciona con CO_2 produciendo un mol de Na^+ , HCO_3^- y $\text{Al}(\text{OH})_3$ que equilibran la reacción como especies disueltas y/o sólidas. La ecuación (3) es la reacción química de la labradorita que muestra una relación estequiométrica de 1:3 de Na^+ con respecto del HCO_3^- o del Ca^+ con respecto a este último. La ecuación (4) representa la disolución de la anortita, donde se evidencia una relación estequiométrica de 1:2 de Ca^{2+} con respecto al HCO_3^- .

En la Figura 62 y Figura 63 se muestran las relaciones molares entre el Na^+ y Ca^{2+} con el HCO_3^- , distinguiendo los datos de acuerdo con el clúster al que pertenecen. Se observa una correlación positiva entre estos elementos. La Figura 62 muestra que parte de los datos pertenecientes al clúster 1 tienden a ajustarse con la relación 1:3. Análogamente parte de las muestras del clúster 3 también se ajustan a la relación ya mencionada, sin embargo, a modo general se observa que existe un exceso del HCO_3^- . Esto implica que parte de los datos evidencia la disolución de labradorita. Por otro lado, en la Figura 63 se observa que gran parte de las muestras pertenecientes al clúster 3 tienden a ajustarse a la línea estequiométrica 1:2. Esto también ocurre en menor proporción con algunas de las muestras pertenecientes al clúster 2, vale decir que estas tendencias indican la disolución de anortita.

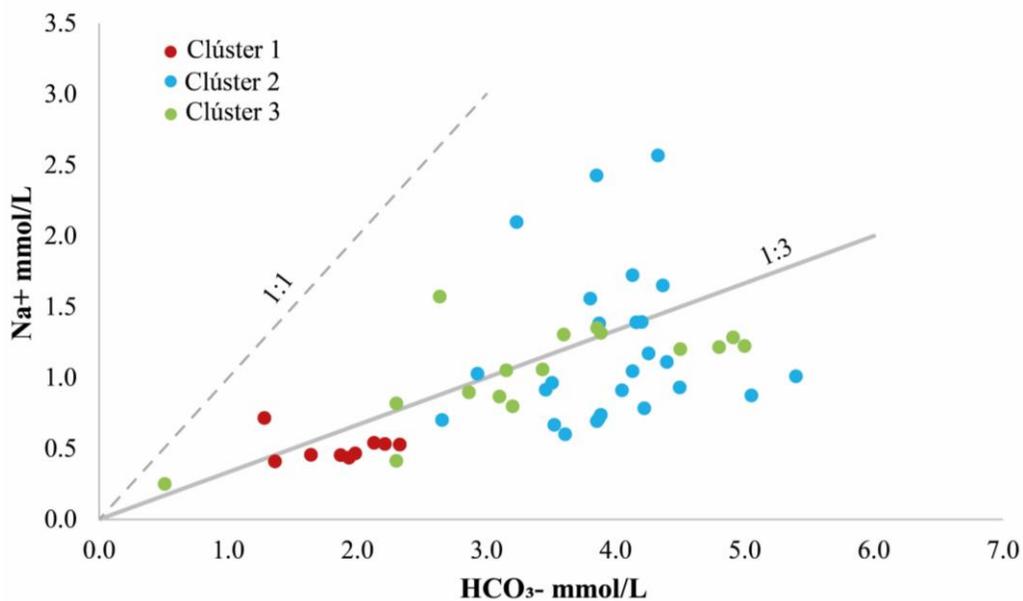


Figura 62. Relación molar de Na^+ vs HCO_3^-

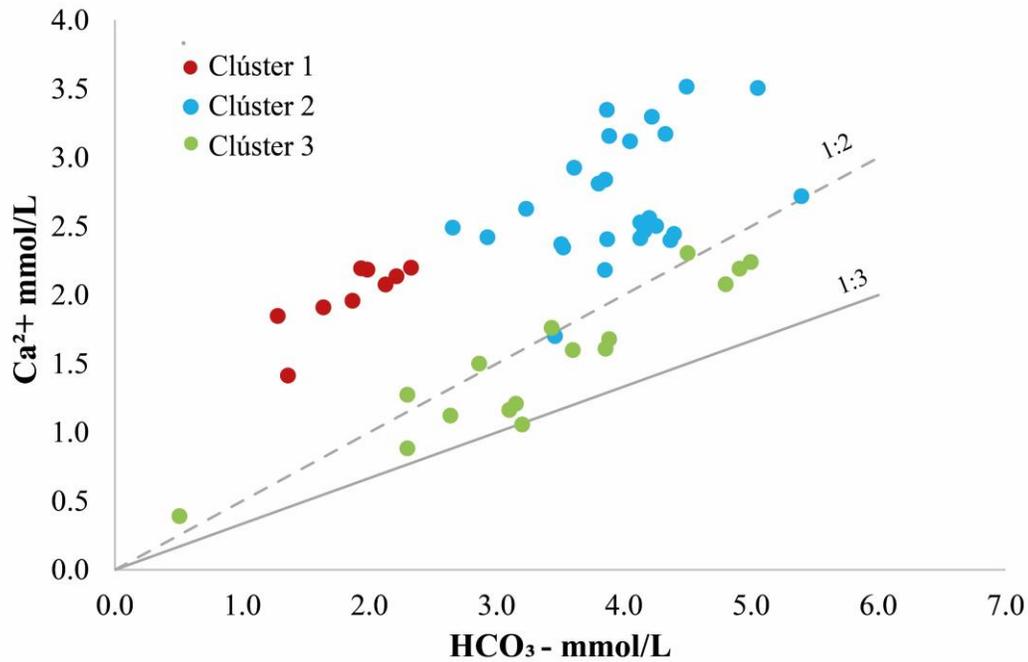
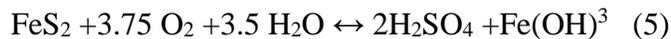


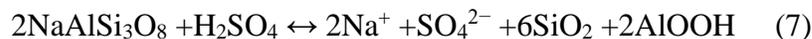
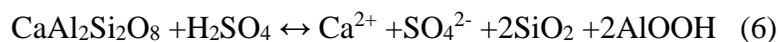
Figura 63. Relación molar de Ca^{2+} vs HCO_3^-

A pesar de que existe un ajuste de los datos con las relaciones estequiométricas ya mencionadas, indicando un papel principal de la disolución de anortita en la composición del agua subterránea junto a una disolución en menor medida de labradorita, se distingue un exceso de Ca^{2+} y la presencia de SO_4^{2-} en las facies ya descritas. Esto indica otro proceso sujeto a la meteorización química que afecta la composición química del agua subterránea.

Considerando que, el CO_2 como ácido natural reacciona con minerales de carbonato y silicato en sedimentos y corteza cristalina continental, también se puede complementar con otros ácidos, como el ácido sulfúrico que se forma en la oxidación de minerales de azufre reducidos (principalmente pirita, FeS_2) (Brantley et al., 2008). Considerando que parte del área de estudio posee pirita y otros sulfuros (esto reflejado en la actividad minera que se da en la región) a continuación se incorpora al análisis la disolución de la pirita (ecuación (5))



Si todo el azufre ligado a pirita en los sedimentos se oxida a H_2SO_4 que reacciona con minerales de silicato en las proporciones de su abundancia en un sedimento promedio, las siguientes ecuaciones (6) y (7) evidencia como se agrega SO_4^{2-} y cationes al agua. Estas reacciones estequiométricas de plagioclasas muestran una relación catión/sulfato de 1:1 y 2:1 respectivamente.



La Figura 64 muestra la relación estequiométrica de los productos obtenidos en la disolución de anortita por ácido sulfúrico. En ella se observa una correlación positiva entre el calcio y el sulfato, además de la existencia de una tendencia de los datos a seguir una pendiente similar a la relación estequiométrica 1:1 pero con un exceso de calcio.

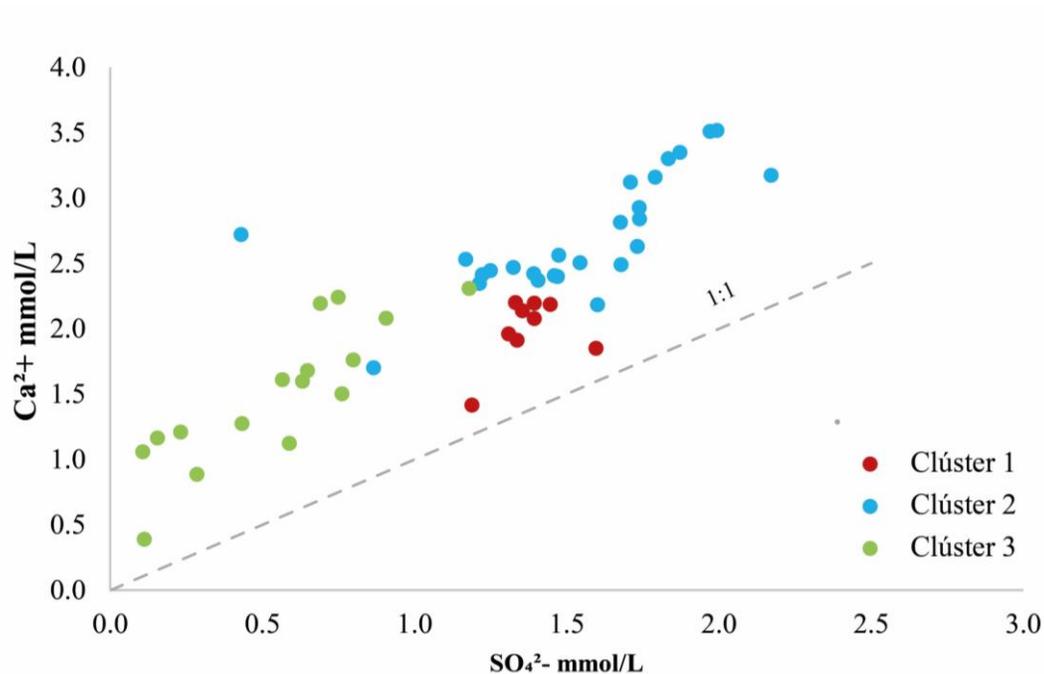


Figura 64. Relación molar de Ca^{2+} vs SO_4^{2-}

El exceso de calcio se relaciona con la disolución de labradorita, lo cual se puede comprobar restando $Ca^{2+} - (HCO_3^-/3)$ y graficando con respecto al sulfato, observándose que las muestras tienden a coincidir con la línea que representa la relación estequiométrica de la disolución de plagioclasa debido a la acción del ácido sulfúrico (Figura 65).

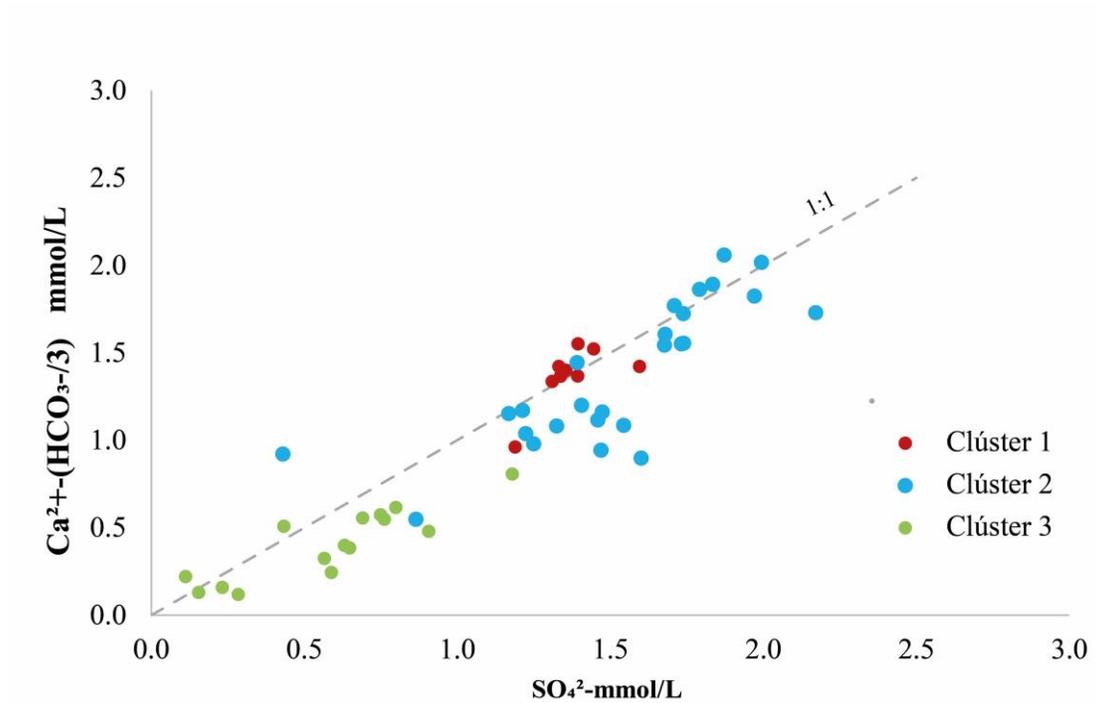


Figura 65. Relación molar de $Ca^{2+}-(HCO_3^-/3)$ vs SO_4^{2-}

En consecuencia, se tiene que en la zona de estudio existe una disolución de silicatos debido a ácido carbónico y al ácido sulfúrico. Esto controla parte de la composición química de las aguas subterráneas y superficiales analizadas que muestran las facies bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas.

4.5.3. Geoestadística

A continuación, se presenta el resultado de la aplicación del Kriging Ordinario a las puntuaciones factoriales obtenidas mediante el análisis factorial previamente comentado.

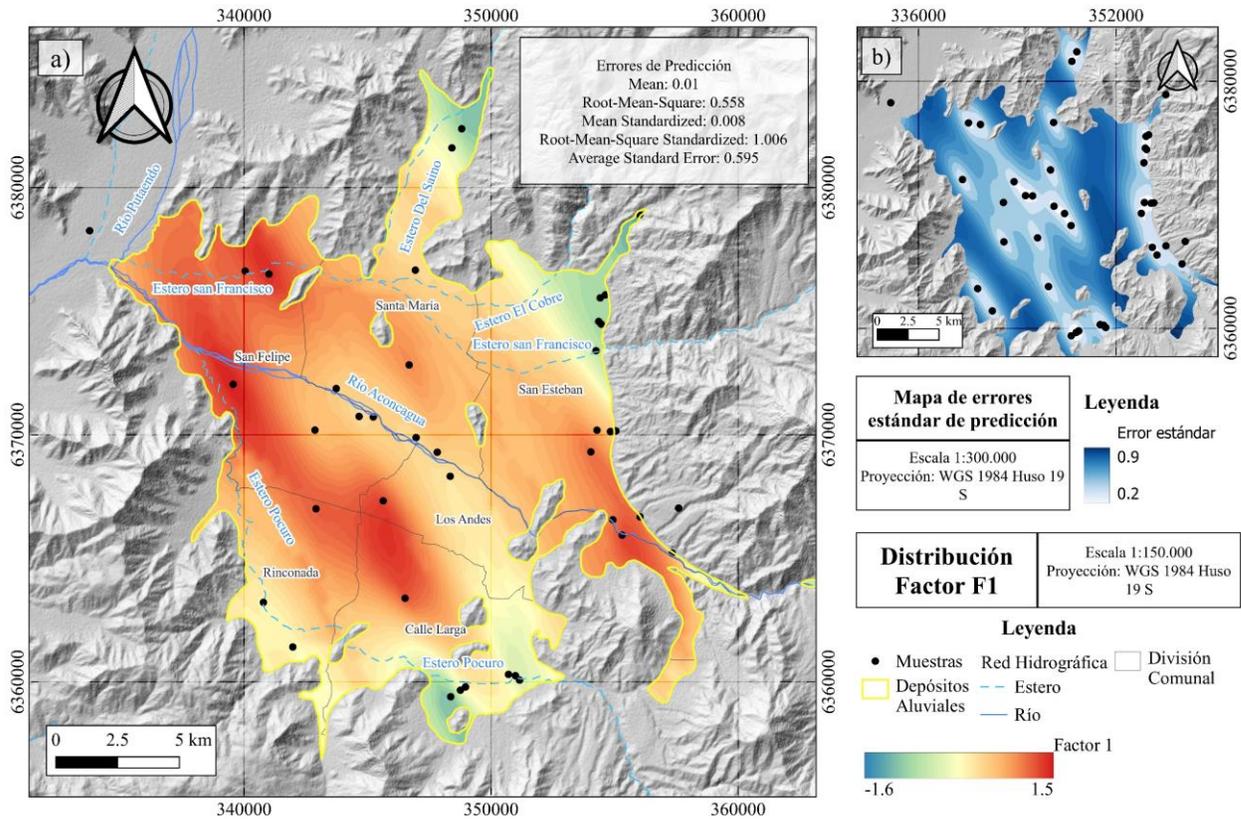


Figura 66. Distribución espacial del Factor 1, compuesto por Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Ni y Sr .

En la Figura 66.a) se aprecia la distribución de los valores de F1. Examinando el mapa se observa que presenta las máximas puntuaciones alrededor del río Aconcagua, siguiendo una distribución paralela al sentido del flujo, disminuyendo hacia los bordes más lejanos a este cuerpo de agua. Se observa una saturación máxima de este factor en el sector de la comuna de San Felipe y en zonas donde convergen las comunas de Los Andes, Rinconada y Calle Larga. Por otro lado, las puntuaciones negativas (áreas donde no se dan las variables que saturan el F1), se encuentran en las proximidades del límite de los depósitos aluviales en las zonas de piedemonte. Por otro lado, la Figura 66.b) muestra el mapa de error estándar, observándose que las tonalidades más claras presentan menor error, debido a su cercanía con los datos, mientras que las zonas interpoladas con menos cantidad de datos cercanos tienden a tener más error.

El factor F2 (Figura 67) representa las variables HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , SiO_2 . La distribución de este factor presenta sus máximas puntuaciones en el extremo noreste y sur del área de estudio. Estos valores disminuyen hacia el centro de la unidad de depósito aluvial, cercanas al río Aconcagua donde se encuentra los valores mínimos negativos asociados a este factor. Esto contrasta con lo visto en el factor anterior siendo entonces posible asociarlos a procesos distintos. La Figura 67.b) muestra el mapa de error estandar, observandose una menor tendencia a tener errores altos, en comparación a la interpolación anterior.

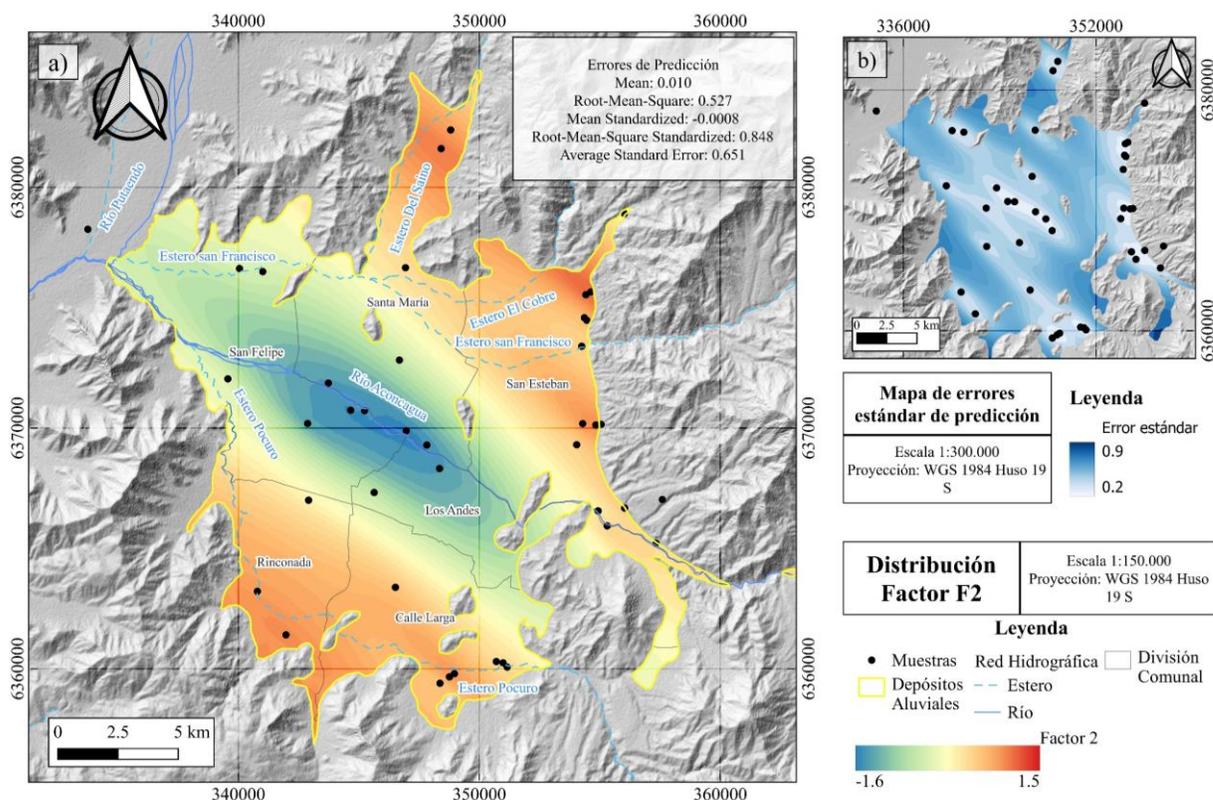


Figura 67. Distribución espacial del Factor 2, compuesto por HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , SiO_2 .

Finalmente, el mapa del factor F3 (Figura 68) puede considerarse como un mapa de distribución del NO_3^- , única variable que se asocia saturar el factor. Los valores de este factor presentan una dirección que aumenta desde el sureste al noroeste, teniendo su mayor puntuación en el sector de la comuna de San Felipe. La comuna de Rinconada también presenta un valor importante de este factor, junto con las zonas más occidentales de la comuna Santa María. Por otro lado, las puntuaciones negativas, se encuentran en las proximidades más occidentales del depósito aluvial, aguas arriba del río Aconcagua. Al igual que en los casos anteriores, el mapa de error estandar muestra las zonas centrales con menor error, siendo las zonas más alejadas a los datos lo que tienden a mostrar mayor error, por lo tanto una mayor incertidumbre en la interpretación de la interpolación en esa zona.

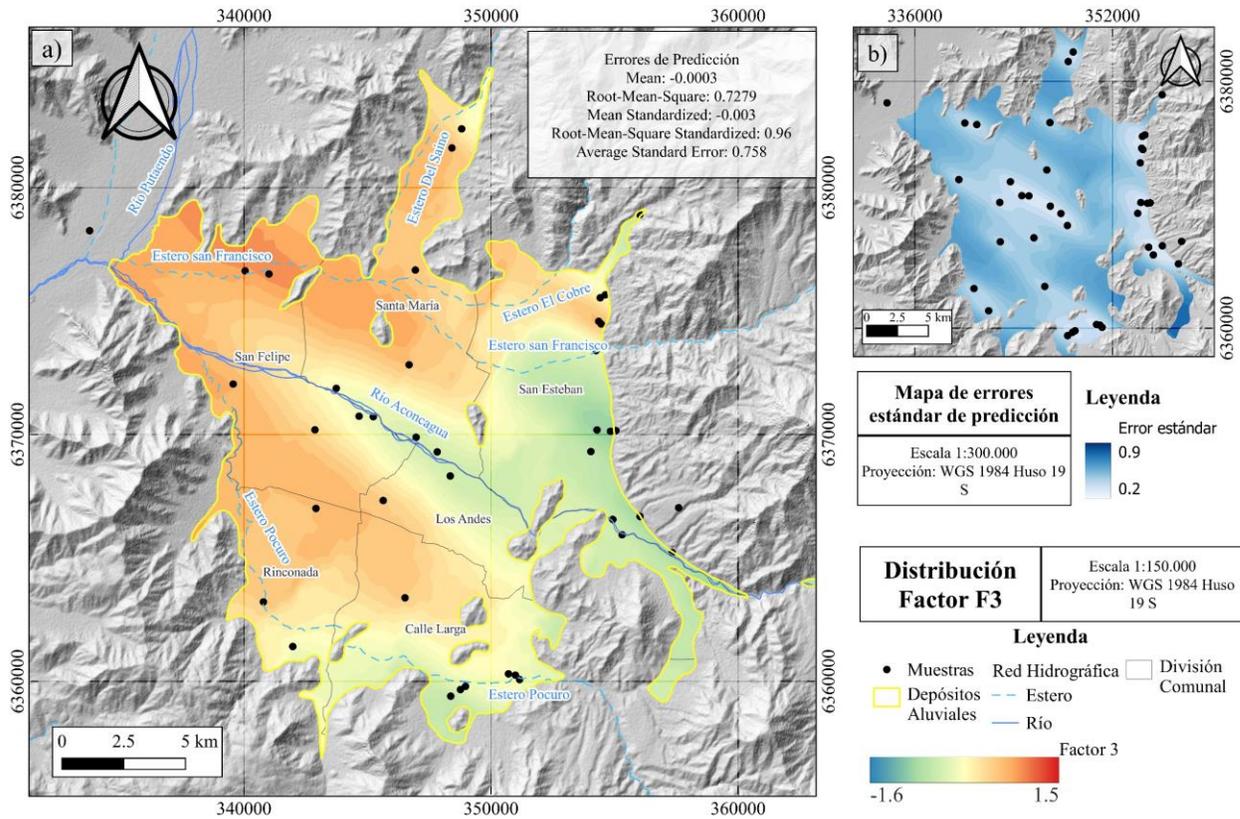


Figura 68. Distribución espacial del Factor 3, compuesto por el NO_3^-

Cabe señalar que el análisis geoestadístico tiene mayor o menor medida de confiabilidad de acuerdo con la calidad de los datos y el ajuste que se puede lograr con el semivariograma teórico. El RMSE (Root Mean Square Error) en una validación cruzada es una medida de la precisión o calidad de un modelo predictivo. Es una métrica utilizada para evaluar la discrepancia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo. El RMSE se calcula como la raíz cuadrada del promedio de los errores al cuadrado entre los valores observados y los valores predichos. Cuanto menor sea el valor del RMSE, mejor será la capacidad del modelo para ajustarse a los datos y realizar predicciones precisas (Cruz et al., 2023; Tong et al., 2015).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [Z^{\wedge}(xi) - Z(xi)]^2}$$

Con respecto a lo anterior, los resultados de la validación cruzada, muestra que el ajuste logrado para el caso del Factor 1 y 2 es aceptable y se logra un buen modelo predictivo ya que poseen un RMSE bajo de 0.56 y 0.53. Por otro lado, el ajuste logrado para el Factor 3 se muestra más deficiente con un RMSE de 0.73. Esto implica que el modelo tiene dificultades para explicar la variabilidad en los datos en relación con este factor en particular, sin embargo, puede seguir siendo ajustado.

4.6. Isótopos

Los contenidos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en el agua subterránea asociada a los pozos oscilan entre -16.28 ‰ y -6.31 ‰ y entre -120.50 ‰ y -69.52 ‰ respectivamente, sin embargo, la concentración de estos datos se da hasta los -11.31 ‰ $\delta^{18}\text{O}$ y -79.30 ‰ $\delta^2\text{H}$. En cuanto a los resultados relacionados a los manantiales, en general, se observa que los datos obtenidos en la campaña invierno siguen una tendencia similar a la distribución de los pozos, con valores que oscilan entre -13.90 ‰ y -9.98 ‰ en contenido de $\delta^{18}\text{O}$, mientras que su contenido de $\delta^2\text{H}$, va entre -102.08 ‰ y -73.95 ‰. Las muestras de manantiales obtenidas en verano presentan valores isotópicos cuya línea de tendencia posee la ecuación $\delta\text{D} = 4.1968\delta^{18}\text{O} - 39.052$, y su contenido de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ oscilan entre -12.73 ‰ y -5.33 ‰ y entre -98.64 ‰ y -64.23 ‰ respectivamente. En el agua superficial de río oscilan entre -15.33 ‰ y -10.53 ‰ $\delta^{18}\text{O}$, y entre -110.16 ‰ y -80.51 ‰ $\delta^2\text{H}$ en el contenido isotópico, mientras que las muestras de canal presentan valores de entre -16.28 ‰ y 15.6 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -120.50 ‰ y -115.1 ‰ $\delta^2\text{H}$.

La Figura 69, muestra la comparación entre el $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de los datos de agua tanto subterránea como superficial, con la línea de agua meteórica local (33°S Chile MWL), definida por (Taucare et al., 2020a). Se logra observar que la mayoría de las muestras ríos, manantiales de invierno y canales se alinean con la línea meteórica local y con la línea meteórica global definida por Craig en 1961. En cuanto a las muestras de pozos se puede decir que se encuentran ligeramente por debajo de las líneas mencionadas. La posición de estos puntos en relación con la línea meteórica local muestra que el agua subterránea proviene principalmente de precipitaciones, evidenciándose en algunas muestras de pozos una leve evaporación del agua lluvia antes de la infiltración. Por su parte los manantiales en temporada verano muestran un enriquecimiento isotópico descrito por la ecuación mencionada anteriormente. Este enriquecimiento afecta en mayor medida a $\delta^{18}\text{O}$ lo que se evidencia en la desviación de las muestras de manantiales con respecto a la línea meteórica local y que se debe a procesos de evaporación en condiciones secas (Clark, 2015), lo que concuerda con las condiciones semiáridas de la Cuenca del Aconcagua.

En cuanto a la relación entre las aguas superficiales (río y canales) con respecto a las aguas subterráneas, principalmente de pozos, se puede decir que este conjunto de datos evidencia un empobrecimiento isotópico en comparación a las demás muestras (Figura 69). Esto implica que el origen de las aguas que recargan tanto pozos como canales y ríos proviene de mayor altitud y que existe una relación entre estas al tener un origen similar, por lo tanto, se infiere una infiltración del agua superficial que recarga los pozos.

La Figura 70, muestra la línea media de precipitaciones para el área de estudio definida por (Taucare et al., 2020a), junto con los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y la altitud a la cual se obtuvieron las muestras de pozos manantiales, ríos y canales. La relación entre estas dos variables y la intercepción con la línea que muestra la variación vertical del contenido isotópico a los 33°S, representada por la ecuación $\nabla_z \delta^{18}\text{O} = -328.55\delta^{18}\text{O} - 1949.5$, define la elevación a la que fueron precipitadas las aguas muestreadas. De esto se desprende que gran parte de los datos de aguas superficiales obtenidos entre los 600 a 1600 [m.s.n.m], y pozos adquiridos entre los 684 y 980 [m.s.n.m] fueron precipitados a una elevación mayor, es decir el agua que originó la recarga precipitó sobre los 2000 a 3000 [m.s.n.m]. La muestra de pozo PZ-38 se encuentra por sobre los 1200 [m.s.n.m], se ubica lejana al río principal y de acuerdo con lo observado el agua que la origina precipita bajo los 2000 [m.s.n.m].

En cuanto a los manantiales de invierno, que fueron muestreados entre los 900 a 1200 [m.s.n.m] aproximadamente, presentan una precipitación que va desde valores cercanos a los 1500 [m.s.n.m], hasta valores más extremos como los 2500 [m.s.n.m] aproximadamente. Por lo tanto, el agua que recarga de los manantiales durante la temporada de invierno se origina a altitudes menores en comparación a lo visto anteriormente, lo cual implica tener un menor recorrido en la componente vertical. Para las muestras de manantiales adquiridos durante el verano, debido a la posición en la línea de tendencia que muestra procesos de evaporación, no se puede relacionar directamente con el gradiente orográfico. Debido a esto se considera la intersección entre la línea evaporación y la línea meteórica local, cuyo valor de $\delta^{18}\text{O}$ es de -12.55%, estimándose una elevación de precipitación de la recarga de estas aguas alrededor de los 2200 [m.s.n.m] (Taucare et al., 2020).

De acuerdo con los resultados anteriores, se puede mencionar que el acuífero exhibe tanto mecanismos de recarga local o directa (Allison, 1987; Simmers, 1997) como procesos de recarga focalizada. La recarga local se produce mediante la infiltración de la precipitación en la superficie del suelo hasta alcanzar el nivel freático, mientras que la recarga focalizada, es influenciada por la distribución del agua proveniente de la precipitación en altitudes a través de cuerpos de agua superficiales, como ríos de forma natural o canales creados de manera artificial. De acuerdo con Richard W, 2010 los sistemas de aguas subterráneas reciben tanto recarga difusa como recarga focalizada, pero la importancia de cada mecanismo varía de una región a otra e incluso de un sitio a otro dentro de una misma región. Generalmente, a medida que aumenta el grado de aridez, la importancia de la recarga focalizada en términos de reposición total del acuífero también tiende a aumentar, lo cual ocurre en este caso de estudio, donde la distribución del agua mediante el río y los canales cobra mayor importancia.

Finalmente, la distribución de las muestras de pozos clasificadas de acuerdo con los clústers jerárquicos, revelan que pozos pertenecientes al clúster 1 y 2 presentan una composición isotópica similar al de aguas superficiales, mientras que los pozos pertenecientes al clúster 3 muestran una relación con las aguas subterráneas de manantiales.

Isótopos Estables de Agua

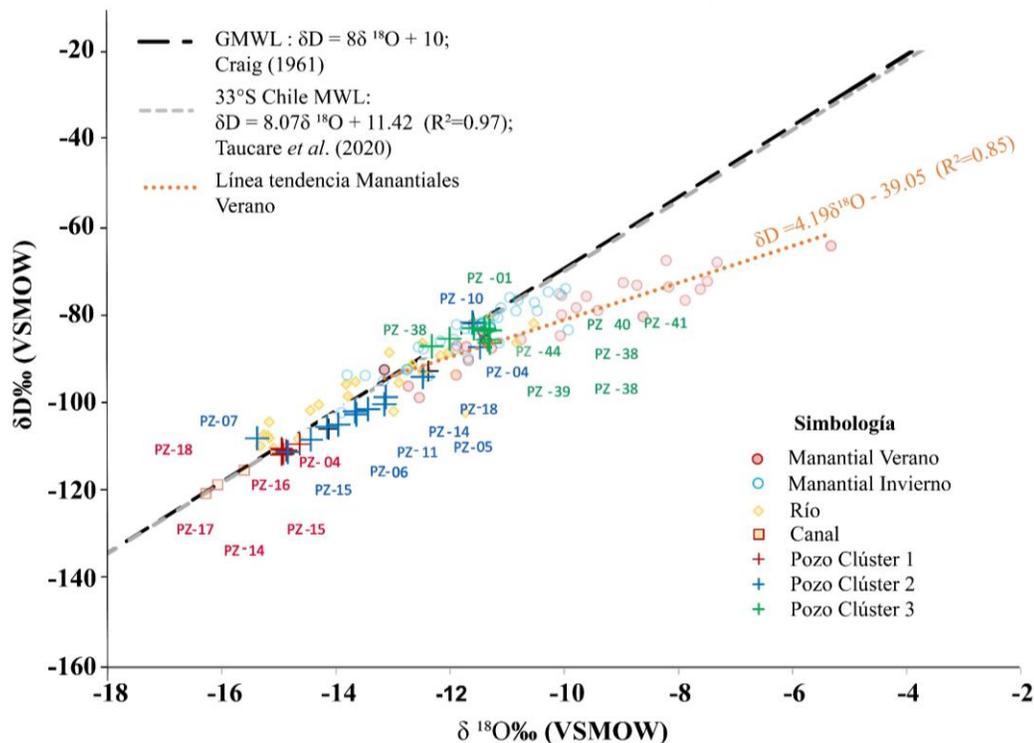


Figura 69. Relación entre el $\delta^{18}O$ y δ^2H de los datos de agua tanto subterránea como superficial, con la línea de agua meteórica local (33°S Chile MWL), definida por (Taucare *et al.*, 2020)

Gradiente Orográfico

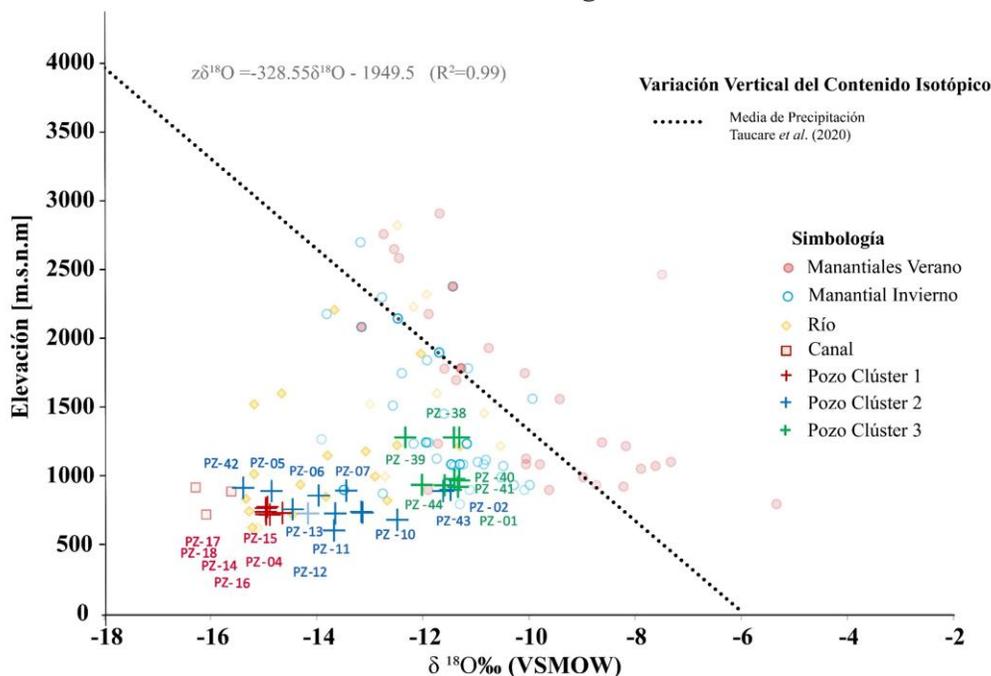


Figura 70. Relación entre la elevación (metro sobre el nivel medio del mar) y $\delta^{18}O$ (‰) para el agua de pozos, manantiales, río y canales

4.7. Modelo hidrogeológico conceptual

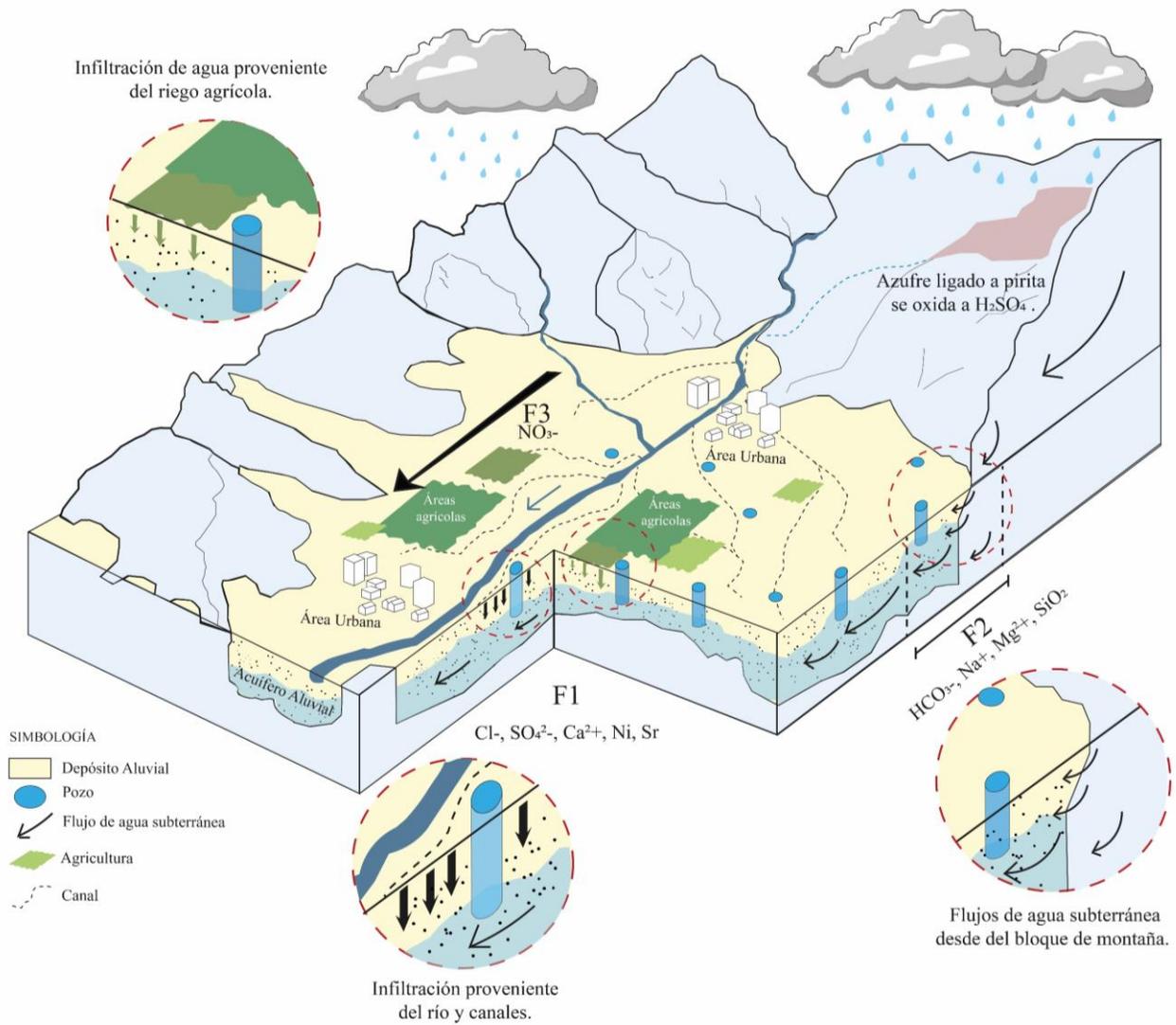


Figura 71. Modelo hidrogeológico conceptual: representación de los procesos e interacciones principales en el acuífero, no está escalado.

Las precipitaciones en altura son la principal fuente de recarga del acuífero aluvial de San Felipe. El proceso predominante es la recarga focalizada que se produce a través del cuerpo principal de agua superficial, el río Aconcgua. Este distribuye el agua proveniente de altitudes por sobre los 2000 [m.s.n.m] hacia la depresión central. Por otro lado, el agua que se origina en zonas altas también es rápidamente transferida a los canales de riego presentes en la Depresión Central, donde la ausencia de una capa impermeable en el fondo de los canales promueve una infiltración permanente y focalizada (Barberá et al., 2018). Todo este proceso queda reflejado mediante el Factor 1, el cual se atribuye principalmente a la química del río Aconcgua y su contenido de sulfato debido tanto a disolución de silicatos por ácido carbónico y ácido sulfúrico proveniente del azufre ligado a pirita y la oxidación de la misma. Este factor se distribuye en todo el valle, donde

la infiltración de las aguas superficiales provenientes tanto del río como de los canales se distingue en la similitud entre la química de estos respecto a los pozos circundantes.

Al borde de la Depresión Central y al lado poniente del Frente Andino Occidental, el contenido iónico del agua subterránea queda representando mayoritariamente por HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} y SiO_2 . Parte de este contenido se explica debido a los procesos de interacción agua-roca, en donde la disolución de silicatos por el ácido carbónico predomina, en particular por la disolución de CaNa-plagioclasa (labradorita), Ca-plagioclasa (anortita). Esto concuerda con los estudios realizados por Taucare et al., 2020 sobre la química del agua y su influencia por la geología del Frente Andino Occidental.

En la Depresión Central, la infiltración proveniente de prácticas agrícolas (fertilizantes) impactó la calidad del agua subterránea por un aumento de la concentración de NO_3^- con respecto al background geológico propuesto. Sin embargo, todas las muestras poseen concentraciones por debajo de los límites chilenos establecidos en la Norma Chilena Oficial N°1.333. El proceso de interacción entre las zonas agrícolas y el nivel freático aumenta en dirección noroeste. Esto de acuerdo con el modelo geoestadístico propuesto y reflejado en el Factor 3 del análisis multivariante.

Capítulo 5: Conclusiones

En el presente estudio se investigó el impacto que tiene las principales actividades antrópicas sobre la calidad del agua subterránea en el acuífero aluvial de San Felipe en la cuenca del río Aconcagua. Para lograr esto, se llevó a cabo un análisis integral que incluyó la evaluación de los niveles piezométricos, un análisis hidrogeoquímico y multivariante, modelamiento geoestadístico, análisis isotópico del agua y la propuesta de un nivel de base que representa la composición natural del acuífero.

Los niveles freáticos presentan un flujo principal con dirección SE-NO. No obstante, la extracción de agua subterránea, principalmente destinada al uso agrícola, ha tenido un impacto significativo en los niveles freáticos, alterando su comportamiento natural. La demanda de agua para riego ha llevado a una disminución en los niveles freáticos, lo cual puede tener consecuencias negativas para la disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas, sobre todo considerando las condiciones hidroclimáticas actuales.

La hidrogeoquímica de las aguas subterráneas está controlada principalmente por las interacciones agua-roca más que por las actividades antropogénicas. La química se ve influida tanto por las características químicas del caudal adquirido en las montañas como por los procesos locales que tienen lugar durante la infiltración hacia el acuífero aluvial. Las aguas subterráneas se benefician de una importante recarga procedente de los canales de riego, los cuales conducen el agua desde áreas alta elevación al acuífero. Esto impacta en la química del agua y se ve reflejado en la composición isotópica del agua subterránea.

Particularmente las concentraciones químicas en la mayoría de los pozos supera el límite definido mediante el background geológico del agua subterránea en este estudio. Particularmente el nitrato muestra valores por sobre esta base natural, pero se encuentra por debajo de los límites permitidos para el agua potable. Casi todas las muestras de aguas subterránea cumplen con la normativa chilena que regula el uso de agua. No obstante, se observa que gran parte de las muestras superan los límites del background, lo que sugiere una alteración significativa de las condiciones naturales.

Finalmente, comprender las interacciones y procesos del acuífero aluvial de San Felipe es crucial para evaluar la calidad del agua subterránea y desarrollar estrategias de gestión adecuadas para su preservación. Se recomienda realizar un monitoreo continuo de la calidad del agua subterránea del valle Aconcagua, mejorar los modelos geoestadísticos propuestos e implementar estudios de isótopos ligados al contenido de nitrato. Todo esto con la finalidad obtener medidas de protección sobre el acuífero, especialmente considerando el estado actual de los recursos hídricos en Chile Central.

Bibliografía

- Allison, G. B. (1988). *A Review of some of the physical, chemical and isotopic techniques available for estimating groundwater recharge*.
- Appelo, C. A. J., & Postma, Dieke. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema.
- Arumi, J., Escudero, M., Aguirre, E., Salgado, J. C., & Aravena, R. (2020). Use of environmental isotopes to assess groundwater pollution caused by agricultural activities. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 56(5–6), 673–683. <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1813124>
- Aschmann, H. (1984). A restrictive definition of mediterranean climates. *Bulletin de La Societe Botanique de France. Actualites Botaniques*, 131(2–4), 21–30. <https://doi.org/10.1080/01811789.1984.10826643>
- Barberá, J. A., Jódar, J., Custodio, E., González-Ramón, A., Jiménez-Gavilán, P., Vadillo, I., Pedrera, A., & Martos-Rosillo, S. (2018). Groundwater dynamics in a hydrologically-modified alpine watershed from an ancient managed recharge system (Sierra Nevada National Park, Southern Spain): Insights from hydrogeochemical and isotopic information. *Science of the Total Environment*, 640–641, 874–893. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.305>
- Boyce, D., Charrier, R., & Farías, M. (2020). The First Andean Compressive Tectonic Phase: Sedimentologic and Structural Analysis of Mid-Cretaceous Deposits in the Coastal Cordillera, Central Chile (32°50'S). *Tectonics*, 39(2). <https://doi.org/10.1029/2019TC005825>
- Brantley, Susan L., Kubicki, James D., & White, Art. F. (2008). *Kinetics of Water-Rock Interaction*.
- Carretier, S., Tolorza, V., Rodríguez, M. P., Pepin, E., Aguilar, G., Regard, V., Martinod, J., Riquelme, R., Bonnet, S., Brichau, S., Hérial, G., Pinto, L., Farías, M., Charrier, R., & Guyot, J. L. (2015). Erosion in the Chilean Andes between 27°S and 39°S: Tectonic, climatic and geomorphic control. *Geological Society Special Publication*, 399, 401–418. <https://doi.org/10.1144/SP399.16>
- Castro Heredia, Lina M., Díaz, Á. J. Á., & Escobar, Y. C. (2012). *Análisis clúster como técnica de análisis exploratorio de registros múltiples en datos meteorológicos*.
- Clark, I. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes*.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., & Savard, M. M. (2008). Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353(3–4), 294–313. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.015>

- Coetsiers, M., Blaser, P., Martens, K., & Walraevens, K. (2009). Natural background levels and threshold values for groundwater in fluvial Pleistocene and Tertiary marine aquifers in Flanders, Belgium. *Environmental Geology*, 57(5), 1155–1168. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1412-z>
- Cruz, A. C., Navarro, R. G. O., Aguirre, J. J. C., Magno, R. N. T., & Derecho, J. J. M. (2023). Geostatistical modeling of SPT data to determine the minimum number and depth of future borehole investigations. *International Journal of GEOMATE*, 25(107), 77–85. <https://doi.org/10.21660/2023.107.3769>
- Custodio, E., & Jódar, J. (2016). Simple solutions for steady-state diffuse recharge evaluation in sloping homogeneous unconfined aquifers by means of atmospheric tracers. *Journal of Hydrology*, 540, 287–305. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.035>
- Daniele, L., Taucare, M., Viguier, B., Arancibia, G., Aravena, D., Roquer, T., Sepúlveda, J., Molina, E., Delgado, A., Muñoz, M., & Morata, D. (2020). Exploring the shallow geothermal resources in the Chilean Southern Volcanic Zone: Insight from the Liquiñe thermal springs. *Journal of Geochemical Exploration*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106611>
- Decelles, P. G., Ducea, M. N., Kapp, P., & Zandt, G. (2009). Cyclicity in Cordilleran orogenic systems. In *Nature Geoscience* (Vol. 2, Issue 4, pp. 251–257). <https://doi.org/10.1038/ngeo469>
- Dirección General de Aguas. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del río Aconcagua*.
- Farías, M., Charrier, R., Carretier, S., Martinod, J., Fock, A., Campbell, D., Cáceres, J., & Comte, D. (2008). Late Miocene high and rapid surface uplift and its erosional response in the Andes of central Chile (33° - 35°S). *Tectonics*, 27(1). <https://doi.org/10.1029/2006TC002046>
- Farnham, I. M., Singh, A. K., Stetzenbach, K. J., & Johannesson, K. H. (2002). *Treatment of non-detects in multivariate analysis of groundwater geochemistry data*. www.elsevier.com/locate/chemometrics
- Fernández, E., Grilli, A., Alvarez, D., & Aravena, R. (2017). Evaluation of nitrate levels in groundwater under agricultural fields in two pilot areas in central Chile: A hydrogeological and geochemical approach. *Hydrological Processes*, 31(6), 1206–1224. <https://doi.org/10.1002/hyp.11103>
- Figueroa, R., Viguier, B., Taucare, M., Yáñez, G., Arancibia, G., Sanhueza, J., & Daniele, L. (2021). Deciphering groundwater flow-paths in fault-controlled semiarid mountain front zones (Central Chile). *Science of the Total Environment*, 771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145456>
- Filzmoser, P., Hron, K., & Reimann, C. (2009). Univariate statistical analysis of environmental (compositional) data: Problems and possibilities. *Science of the Total Environment*, 407(23), 6100–6108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.08.008>
- Foster, S., & Natwarlal Shah, T. (2012). *Groundwater resources and irrigated agriculture-making a beneficial relation more sustainable (also in Spanish version) Sustainable Groundwater*

Management: Concepts and Tools View project Solar Power as Remunerative Crop (SPaRC)
View project. www.gwptoolbox.org

- Foster, S., Pulido-Bosch, A., Vallejos, Á., Molina, L., Llop, A., & MacDonald, A. M. (2018). Impact of irrigated agriculture on groundwater-recharge salinity: a major sustainability concern in semi-arid regions. *Hydrogeology Journal*, 26(8), 2781–2791. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1830-2>
- Foster, S. S. D., & Chilton, P. J. (2003). Groundwater: The processes and global significance of aquifer degradation. In *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* (Vol. 358, Issue 1440, pp. 1957–1972). Royal Society. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1380>
- Fuentes, F., Aguirre, L., Vergara, M., Valdebenito, L., & Fonseca, E. (2004). *Miocene fossil hydrothermal system associated with a volcanic complex in the Andes of Central Chile*. 41(1), 174–209. <https://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a>
- Fuentes, F., Vergara, M., Aguirre, L., & Féraud, G. (2002). *Relaciones de contacto de unidades terciarias de los Andes de Chile central (33°S): una reinterpretación sobre la base de dataciones ⁴⁰Ar/³⁹Ar*.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Pablo Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Gleeson, T., & Richter, B. (2018). How much groundwater can we pump and protect environmental flows through time? Presumptive standards for conjunctive management of aquifers and rivers. *River Research and Applications*, 34(1), 83–92. <https://doi.org/10.1002/rra.3185>
- Güler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E., & Turner, A. K. (2002). Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10(4), 455–474. <https://doi.org/10.1007/s10040-002-0196-6>
- Hinsby, K., Condesso de Melo, M. T., & Dahl, M. (2008). European case studies supporting the derivation of natural background levels and groundwater threshold values for the protection of dependent ecosystems and human health. *Science of the Total Environment*, 401(1–3), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.03.018>
- Instituto Nacional de Normalización (INN), Salazar, C., Etcheberrigaray, M., Cáceres, A., Echeverría, E., Pizarro, J., Bruna, A., & Lisboa, E. (2005). *NCH409/1: Norma Chilena de Calidad de Agua Potable*.

- Jara, P., & Charrier, R. (2014). Nuevos antecedentes estratigráficos y geocronológicos para el Meso-Cenozoico de la cordillera Principal de Chile entre 32° y 32°30'S: implicancias estructurales y paleogeográficas. *Andean Geology*, 41(1), 174–209. <https://doi.org/10.5027/andgeoV40n2-a>
- Jayakumar, R., & Siraz, L. (1997). Factor analysis in hydrogeochemistry of coastal aquifers-a preliminary study. In *Environmental Geology* (Vol. 31). Springer-Verlag.
- Jódar, J., Zakaluk, T., González-Ramón, A., Ruiz-Constán, A., Lechado, C. M., Martín-Civantos, J. M., Custodio, E., Urrutia, J., Herrera, C., Lambán, L. J., Durán, J. J., & Martos-Rosillo, S. (2022). Artificial recharge by means of careo channels versus natural aquifer recharge in a semi-arid, high-mountain watershed (Sierra Nevada, Spain). *Science of the Total Environment*, 825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153937>
- Jorquera, C. O., Oates, C. J., Plant, J. A., Kyser, K., Ihlenfeld, C., & Voulvoulis, N. (2015). Regional hydrogeochemical mapping in central Chile: Natural and anthropogenic sources of elements and compounds. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 15(1), 72–96. <https://doi.org/10.1144/geochem2013-220>
- Kay, S. M., Godoy, E., & Kurtz, A. (2005). Episodic arc migration, crustal thickening, subduction erosion, and magmatism in the south-central Andes. *Bulletin of the Geological Society of America*, 117(1–2), 67–88. <https://doi.org/10.1130/B25431.1>
- Lawrence, Fred. W., & Upchurch, Sam. B. (1982). *Identification of Recharge Areas Usin Geochemical Factor Analysis*.
- López Velandia, C. C. (2018). Análisis de las características fisicoquímicas del agua subterránea de la cuenca del río Chicú, Colombia, usando indicadores hidroquímicos y estadística multivariante. *Ingeniería y Ciencia*, 14(28), 35–68. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.14.28.2>
- Luebert, F., & Plischoff, P. (2012). *Variabilidad climática y bioclimas de la Región de Valparaíso, Chile* (Vol. 44). <http://www>.
- Marandi, A., & Karro, E. (2008). Natural background levels and threshold values of monitored parameters in the Cambrian-Vendian groundwater body, Estonia. *Environmental Geology*, 54(6), 1217–1225. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0904-6>
- Masiokas, M. H., Christie, D. A., Le Quesne, C., Pitte, P., Ruiz, L., Villalba, R., Luckman, B. H., Berthier, E., Nussbaumer, S. U., González-Reyes, Á., McPhee, J., & Barcaza, G. (2016). Reconstructing the annual mass balance of the Echaurren Norte glacier (Central Andes, 33.5° S) using local and regional hydroclimatic data. *Cryosphere*, 10(2), 927–940. <https://doi.org/10.5194/tc-10-927-2016>
- Moeck, C., Radny, D., Borer, P., Rothardt, J., Auckenthaler, A., Berg, M., & Schirmer, M. (2016a). Multicomponent statistical analysis to identify flow and transport processes in a highly-complex environment. *Journal of Hydrology*, 542, 437–449. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.023>

- Moeck, C., Radny, D., Borer, P., Rothardt, J., Auckenthaler, A., Berg, M., & Schirmer, M. (2016b). Multicomponent statistical analysis to identify flow and transport processes in a highly-complex environment. *Journal of Hydrology*, *542*, 437–449. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.023>
- Montecinos, A., & Aceituno, P. (2003). *Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies*.
- Müller, D., Blum, A., Hookey, J., Kunkel, R., Scheidleder, A., Tomlin, C., & Wendland, F. (2006). *Background criteria for the Identification of Groundwater thresholds*. <https://cordis.europa.eu/project/id/6538/reporting>
- Nieto, P., Custodio, E., & Manzano, M. (2005). Baseline groundwater quality: A European approach. *Environmental Science and Policy*, *8*(4), 399–409. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.04.004>
- Parada, M. A., Rivano, S., Sepulveda, P., Herve, M., Herve, F., Puig, A., Munizaga, F., Brook, M., Pankhurst, R., & Snelling, N. (1988). Mesozoic and Cenozoic plutonic development in the Andes of central Chile (30°30'–32°30'S). In *Journal of South American Earth Sciences* (Vol. 1, Issue 3).
- Parrone, D., Ghergo, S., & Preziosi, E. (2019). A multi-method approach for the assessment of natural background levels in groundwater. *Science of the Total Environment*, *659*, 884–894. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.350>
- Piper, A. M. (1944). *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses*.
- Piquer, J., Berry, R. F., Scott, R. J., & Cooke, D. R. (2016). Arc-oblique fault systems: Their role in the Cenozoic structural evolution and metallogensis of the Andes of central Chile. *Journal of Structural Geology*, *89*, 101–117. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2016.05.008>
- Piquer, J., Hollings, P., Rivera, O., Cooke, D. R., Baker, M., & Testa, F. (2017). Along-strike segmentation of the Abanico Basin, central Chile: New chronological, geochemical and structural constraints. *Lithos*, *268–271*, 174–197. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.10.025>
- Preziosi, E., Giuliano, G., & Vivona, R. (2010). Natural background levels and threshold values derivation for naturally As, V and F rich groundwater bodies: A methodological case study in Central Italy. *Environmental Earth Sciences*, *61*(5), 885–897. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0404-y>
- Quintana, J. M., & Aceituno, P. (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30–43° S. In *Atmósfera* (Vol. 25, Issue 1).
- Richard W, H. (2010). *Estimating Groundwater Recharge*.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Boric, R., & Espineira, D. (1993). *Hojas Quillota y Portillo, escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería: Carta Geológica de Chile*, 73.
- Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, Ó. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, *13*(2), 66–73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>

- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation - A global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 1863–1880. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1863-2010>
- Simmers, I., Hendrickx, J. M. H., Kruseman, G. P., & Rushton, K. R. (1997). *Recharge of Phreatic Aquifers in (Semi-)Arid Areas*.
- Spalding, R. F., & Exner, M. E. (1993). *Occurrence of Nitrate in Groundwater-A Review*.
- Stiff, H. A. (1951). *The interpretation of chemical water analysis by means of patterns*.
- Taucare, M., Daniele, L., Viguier, B., Vallejos, A., & Arancibia, G. (2020). Groundwater resources and recharge processes in the Western Andean Front of Central Chile. *Science of the Total Environment*, 722. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137824>
- Taucare, M., Roquer, T., Heuser, G., Pérez-Estay, N., Arancibia, G., Yáñez, G., Viguier, B., Figueroa, R., Morata, D., & Daniele, L. (2022). Selective reactivation of inherited fault zones driven by stress field changes: Insights from structural and paleostress analysis of the Pocuro Fault Zone, Southern Central Andes (32.8°S). *Journal of South American Earth Sciences*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103914>
- Tong, Y., Yu, Y., & Hu, X. (2015). *Abstract Keywords-kriging interpolation method; interpolation models; Air Quality Index; cross-validation method*.
- Soto Bäuerle, M. Victoria., Arriagada González, Joselyn., Paz Castro Correa, Carmen., Maerker, Michael., & Rodolfi, Giuliano. (2011). *Relación entre el cambio de uso del suelo en la cuenca del Aconcagua y su litoral arenoso correlativo. Chile central*.
- Wendland, F., Berthold, G., Blum, A., Elsass, P., Fritsche, J. G., Kunkel, R., & Wolter, R. (2008). Derivation of natural background levels and threshold values for groundwater bodies in the Upper Rhine Valley (France, Switzerland and Germany). *Desalination*, 226(1–3), 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.240>
- Yáñez Carrizo, G., & Herrera, O. R. (2019). Crustal dense blocks in the fore-arc and arc region of Chilean ranges and their role in the magma ascent and composition: Breaking paradigms in the Andean metallogeny. *Journal of South American Earth Sciences*, 93, 51–66. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.04.006>
- Yáñez Carrizo, G., & Herrera, O. R. (2021). Deciphering groundwater flow-paths in fault-controlled semiarid mountain front zones (Central Chile). *Science of the Total Environment*, 771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145456>
- Yáñez, G., Muñoz, M., Flores-Aqueveque, V., & Bosch, A. (2015a). Profundidad del basamento derivado de la gravedad en la Cuenca de Santiago: Implicancias para la evolución geológica, hidrogeológica, geotermia de baja entalpía, caracterización de suelos y peligros geológicos. *Andean Geology*, 42(2), 147–172. <https://doi.org/10.5027/andgeoV42n2-a01>
- Yáñez, G., Muñoz, M., Flores-Aqueveque, V., & Bosch, A. (2015b). Profundidad del basamento derivado de la gravedad en la Cuenca de Santiago: Implicancias para la evolución geológica, hidrogeológica, geotermia de baja entalpía, caracterización de suelos y peligros geológicos. *Andean Geology*, 42(2), 147–172. <https://doi.org/10.5027/andgeoV42n2-a01>

- Yáñez, G., Perez-Estay, N., Araya-Vargas, J., Sanhueza, J., Figueroa, R., Maringue, J., & Rojas, T. (2020). Shallow Anatomy of the San Ramón Fault (Chile) Constrained by Geophysical Methods: Implications for its Role in the Andean Deformation. *Tectonics*, 39(8). <https://doi.org/10.1029/2020TC006294>
- Zabala, M. E., Martínez, S., Manzano, M., & Vives, L. (2016). Groundwater chemical baseline values to assess the Recovery Plan in the Matanza-Riachuelo River basin, Argentina. *Science of the Total Environment*, 541, 1516–1530. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.006>

Anexo A

A.1. Validación de los análisis químicos

Tabla 8. Balance iónico de los datos de pozos y manantiales. Datos destacados en celeste se consideran en el análisis junto con los pozos.

Pozos		Manantiales			
Id	Balance Iónico	Id	Balance Iónico	Id	Balance Iónico
PZ-01	1.6	MA-01	0.2	MA-45	3.0
PZ-02	0.5	MA-02	3.9	MA-46	1.2
PZ-03	0.0	MA-03	3.3	MA-47	12.1
PZ-04	1.3	MA-04	9.0	MA-48	5.8
PZ-05	0.2	MA-05	13.4	MA-49	2.9
PZ-06	1.6	MA-06	15.6	MA-50	14.7
PZ-07	2.4	MA-07	11.1	MA-51	20.7
PZ-08	7.9	MA-08	4.5	MA-52	26.1
PZ-09	0.5	MA-09	3.7	MA-53	3.2
PZ-10	0.6	MA-10	4.1	MA-54	0.4
PZ-11	1.2	MA-11	4.1	MA-55	6.2
PZ-12	0.4	MA-12	2.6	MA-56	2.2
PZ-13	0.6	MA-13	1.5	MA-57	20.0
PZ-14	1.3	MA-14	0.6	MA-58	4.2
PZ-15	0.1	MA-15	6.5	MA-59	1.5
PZ-16	0.3	MA-16	1.9	MA-60	6.3
PZ-17	0.3	MA-17	4.7	MA-61	5.0
PZ-18	0.3	MA-18	9.6	MA-62	5.0
PZ-19	2.5	MA-19	5.0	MA-63	3.6
PZ-20	2.0	MA-20	4.1	MA-64	13.1
PZ-21	0.1	MA-21	3.6	MA-65	8.4
PZ-22	0.5	MA-22	8.5	MA-66	5.1
PZ-23	1.4	MA-23	5.0	MA-67	6.0
PZ-24	2.6	MA-24	3.0		
PZ-25	3.7	MA-25	1.3		
PZ-26	0.9	MA-26	9.2		
PZ-27	2.2	MA-27	10.7		
PZ-28	0.3	MA-28	5.7		
PZ-29	1.5	MA-29	3.0		
PZ-30	1.2	MA-30	5.0		
PZ-31	2.3	MA-31	1.2		
PZ-33	3.0	MA-32	5.8		
PZ-34	0.8	MA-33	6.6		
PZ-35	1.7	MA-34	3.1		
PZ-36	3.4	MA-35	2.3		

PZ-37	3.8	MA-36	7.0
PZ-38	2.7	MA-37	2.1
PZ-39	3.4	MA-38	2.6
PZ-40	2.5	MA-39	6.9
PZ-41	5.1	MA-40	5.0
PZ-42	6.7	MA-41	28.2
PZ-43	1.5	MA-42	6.8
PZ-44	1.8	MA-43	2.4
PZ-45	7.1	MA-44	1.0

Anexo B

B.1. Datos de Nivel Piezométrico

Tabla 9. Datos del Nivel piezométrico asociado a las muestras obtenidas durante el terreno y los valores obtenidos de la base de datos de la DGA, identificados como DG por simplificación.

Pozos	mE	mN	Altura [m.s.n.m]	Nivel Estático [m]	Cota Hidráulica [m]
RF04	354412.00	6375544.00	1005.00	44.77	960.23
RF06	354248.00	6373397.00	932.00	27.00	905.00
RF07	354567.00	6373542.00	946.00	3.88	942.12
RF10	356024.00	6378905.00	1320.00	25.61	1294.39
RF14	343083.00	6370585.00	755.00	80.11	674.89
RF17	354546.00	6369928.00	923.00	92.33	830.67
RF21	355306.00	6365936.00	925.00	62.51	862.49
RF22	355436.00	6365885.00	931.00	15.78	915.22
RF23	350706.00	6360301.00	886.00	13.95	872.05
RF24	341012.00	6376499.00	700.00	57.52	642.48
RF25	341222.00	6376740.00	701.00	58.25	642.75
RF26	346936.00	6376660.00	768.00	92.79	675.21
RF27	346946.00	6376667.00	768.00	92.86	675.14
RF28	345020.00	6370648.00	770.00	97.05	672.95
RF29	336317.00	6379442.00	677.00	56.33	620.67
RF30	334468.00	6378640.00	651.00	35.50	615.50
RF31	333751.00	6378255.00	638.00	28.65	609.35
RF33	342816.00	6362662.00	769.00	68.51	700.49
RF34	340786.00	6363216.00	758.00	66.07	691.93
RF35	344893.00	6370543.00	772.00	97.01	674.99
RF36	345233.00	6370705.00	772.00	97.48	674.52
RF40	343581.00	6371868.00	744.00	79.81	664.19
RF48	345635.00	6367324.00	797.00	108.00	689.00
RF47	342913.00	6367002.00	763.00	80.03	682.97
RF46	341974.00	6361410.00	774.00	77.61	696.39
DG01	349280.00	6364520.00	833.00	103.50	729.50
DG02	345196.00	6370000.00	780.00	107.63	672.37
DG03	339416.00	6372144.00	705.00	48.64	656.36
DG04	337533.00	6376616.00	662.00	28.70	633.30
DG05	341177.00	6373785.00	712.00	62.90	649.10
DG06	348216.00	6365014.00	827.00	134.00	693.00
DG07	352067.00	6375681.00	901.00	73.50	827.50

DG08	350547.00	6375371.00	838.00	89.89	748.11
DG09	346996.00	6378422.00	805.00	94.06	710.94
DG10	334580.00	6376145.00	641.00	23.65	617.35
DG11	346597.00	6370079.00	792.00	123.00	669.00
DG12	346976.00	6369897.00	795.00	125.00	670.00
DG13	347669.00	6369434.00	807.00	130.00	677.00
DG14	347826.00	6369300.00	804.00	139.00	665.00
DG15	348013.00	6369189.00	809.00	137.00	672.00
DG16	345938.00	6373127.00	771.00	93.55	677.45
DG17	338930.00	6373353.00	686.00	44.30	641.70
DG18	339119.00	6373298.00	690.00	48.00	642.00
DG19	339310.00	6373217.00	692.00	50.00	642.00
DG20	339497.00	6373172.00	694.00	48.00	646.00
DG21	339677.00	6373082.00	696.00	49.00	647.00
DG22	339824.00	6373049.00	698.00	52.00	646.00
DG23	343246.00	6372216.00	750.00	84.00	666.00
DG24	343920.00	6371774.00	752.00	84.00	668.00
DG25	344139.00	6372029.00	755.00	88.00	667.00
DG26	341459.00	6371614.00	731.00	66.00	665.00
DG27	341744.00	6370787.00	738.00	88.00	650.00
DG28	345350.00	6372440.00	768.00	100.00	668.00

	Fundo La Quimera	Fundo Las Mercedes	Fundo Las Peñas	Fundo Las Viñas	Fundo Los Castaños	Fundo Los Maitenes	Fundo Los Pinos	Perfil San Felipe
15/01/1970	56.88		72.74	51.57		51.35	54.54	
15/02/1970	55.35	82.97	72.67			50.81	55.96	
15/03/1970	54.98	82.54		50.99		50.34	55.89	
15/04/1970	55.05	82.18	72.87	51.26		50.51	58.59	
15/05/1970	56.79	82.86		53.19		51.92	58.6	
15/06/1970			74.05				58.54	
15/07/1970	56.08	82.49	74.22	54.16		51.18	57.64	
15/08/1970	56.81	82.94	75.2	53.33		52.39	61.06	
15/09/1970	56.78	83.24	75.49	53.66		51.82	62.66	
15/10/1970	57.57			54.13		52.17	62.94	
15/11/1970	57.72	83.94	72.98	54.15		52.46	62.46	
15/12/1970	57.02	84	74.27	52.72		52.22		
15/01/1971	55.41	83.21		50.91		51.28	56	
15/02/1971	54.87	82.54	72.16	50.6		50.7	55.24	
15/03/1971	54.33	81.44	71.78	50.26		49.9	55.14	
15/04/1971	54.49	81.15		50.29			55.68	
15/05/1971	54.68	80.96	72.37	50.5			56.26	

15/06/1971	54.88	80.51		51.31			56.82	
15/07/1971			73.27				57.27	
15/08/1971	55.75			52.25			56.98	
15/09/1971	55.96	82.95	74.04	52.58		50.63	57.7	
15/10/1971	56.59	81.88	74.12	52.89		51.12	57.86	
15/11/1971	55.33	82.2	73.4	52.06		51.18	55.39	
15/12/1971	54.81	81.97	71.12	50.07		50.53	53.55	
15/03/1972	52.82	79.45	70.45	47.94		48.34	53.57	
15/04/1972	53.31	79.03	69.31			48.08	54.43	
15/05/1972	54.29	78.79	71.03	49.7			54.77	
15/06/1972	53.1	78.94	70.64	49.69			53.7	
15/07/1972	52.96	78.99		49.03		48.17		
15/08/1972	52.76	79.04	70.13	49.1		48.15	53.46	
15/09/1972	52.79	78.99	70.19	49.25		47.96	53.23	
15/11/1972	51.9	78.73	68.73	47.74		47.83	52.31	
15/12/1972	50.54						46.45	
15/01/1973	47.8	76.36		42.24			39.44	
15/03/1973	42.51	72.2		37.01		40.27	38.52	
15/06/1973	41.12	67.2		38.28		36.47	38.92	
15/10/1973						37.57	45.58	
15/01/1974	42.29	68.41	58.28	38.67		37.61	42.56	
15/03/1974	42.82	66.44	57.4	37.08		35.83	41.66	
15/05/1974	40.66	65.22		37.85		34.47		
15/06/1974			58.54			35.29	43.68	
15/07/1974	41.22	65.52	60.3	38.82		30.24	44.09	
15/08/1974	42.27					36.38		
15/10/1974	46.96					37.29		
15/11/1974		70.54					44.17	
15/12/1974	42.12	67.69		38.64		36.86	43.19	
15/01/1975	41.36	66.13				36.39	40.41	
15/02/1975	40.81			36.64			44.89	
15/04/1975	39.17	64.05	56.53	36.05		33.87	47.31	
15/06/1975	39.43	64.66	57.02	36.94		33.8	41.82	
15/10/1975	42.86	66.59		40.28			45.11	
15/11/1975	43.07	66.93		40.08			45.34	
15/01/1976	37.63	71.71		38.82			44.33	
15/02/1976	42.16	71.5		38.82			43.85	
15/03/1976	42.18	73.11		39.08			44.61	
15/04/1976	42.49	73.87		39.78			45.49	
15/05/1976	43.16	75.15		40.35			46.21	
15/06/1976	43.65			41			46.41	
15/07/1976	44.12			41.65			47.14	

15/08/1976	45.03	77.32		42.36			47.29	
15/10/1976	46.76	70.98		44.08			50.16	
15/11/1976	47.37	71.16		44.45			50.37	
15/01/1977	46.91	71.03		43.29			58.55	
15/04/1983				28.6			31.3	
15/06/1983	32.85			30.68			34.8	
15/08/1983	34.6			32.35		28.65	37.4	
15/09/1983	35.16		63.85	36.05			37.92	
15/10/1983	34.85		55.95	34.07		29.2	36.49	
15/11/1983	34.18			32.2		29.65		4.18
15/12/1983	33.8			32.2		27.92		3.92
15/01/1984	31.68			28.26		26.73		3.85
15/02/1984	30.97			28.55		25.57		5.02
15/03/1984	31.29			30.61		25.45		4.25
15/04/1984	31.9	55.45		30.4				4.47
15/05/1984	32.61	55.07		30.69		26.14		4.7
15/06/1984		56		32.84		27.06		5.04
15/07/1984		57.06		34.4		27.17		4.55
15/08/1984								4.88
15/09/1984		57.64		33.06		29.8		4.68
15/10/1984		58.06		32.94		27.92		4.28
15/11/1984	33.85	57.78		33.88		27.38		4.28
15/12/1984	33	57.01				27		3.86
15/01/1985	31.7	55.96		28.45		26.15		3.7
15/02/1985	30.7	54.86		27.94		26.25		3.76
15/05/1985	31.2	53.66		29.3		24.55		4.25
15/06/1985	32.55	54.78	50.75	31.12		25.75	35.84	4.8
15/07/1985	33.6	55.96	51.12	31.76		26.75	37.2	5.08
15/09/1985	35.2	57.86	55.23	33.15		33.66	39.07	5.46
15/10/1985	36.07	59.29	56.02	34.77		29.39	39.85	5.5
15/11/1985	36.4	61.15	55.29	34.86		29.93	39.69	5.32
15/12/1985	36.15	60.26	54.78	33.3		30.02	39.1	5.13
15/01/1986	35.8	60.16	54.41	33.83		30.2	38.99	4.1
15/02/1986	35.75	60.09	54.4	32.98	23.95		39.35	5.08
15/03/1986	35.85	59.96	54.62	33.25		29.75	39.67	4.18
15/06/1986	37.6	61.01	58.2	35.35			41.41	5.53
15/08/1986							45.6	
15/09/1986	39		56.43	31.45		33.2	45.6	5.8
15/11/1986	38.68			40.6				
15/03/1987	33.6	60.72	50.82	37.75			39.02	
15/05/1987	34.54		52.3	32.6			37.1	
15/08/1987	35.36	60.09	52.5		25.31	29.63	35.64	3.82

15/02/1988	26	50.63			18.42	26.78		3.66
15/07/1988	29.1	55.22	65.01	33.58			32.78	4.67
15/10/1988		59.36		31.8	31.56		35.47	5.06
15/12/1988	32.34	56	59.15	33.3			35.37	4.9
15/03/1989	31.42	59.89	57.03	29.38			34.66	4.83
15/05/1989	32.92	57.78	60.37	33.06	26.9		37.4	5.23
15/08/1989							41.82	
15/11/1989		62.24					39.84	5.23
15/03/1990							36.3	5.06
15/05/1990		58.4					39.33	
15/08/1990		61.82					42.93	6.39
15/12/1990	37.2				27.52		42.92	5.94
15/02/1991	39.1		55.23				40.67	6.07
15/04/1991	37.82		46.11	34.4		30.52	41.62	6.48
15/06/1991	41.56	64.8	57.93	37.25	29.64	32.02		6.52
15/10/1991	41.44	66.87		38.25	28.5	34.58	42.77	6.09
15/12/1991	39.77	65.74		36.41		33.44	37	5.22
15/02/1992	32.5	59.18		30.48		24.94	31.65	4.85
15/06/1992	33.82		53.35	34.67	26.78	27.96	36.28	
15/10/1992	35.71	60.83	57.92	33.55		29.82	40.75	5.27
15/12/1992	33.85	59.32		37.7		28.67	32.95	4.63
15/02/1993	31.51	56.62	47.41	35.36		26.7	32.62	4.63
15/04/1993	31.71	55.04	49.28	34.8			34.59	5.55
15/06/1993	33.54	56.2	52.52	37.37	32.11	27.12	37.04	5.63
15/08/1993		69.13	54.24		32.34	29.52	40.03	5.9
15/10/1993	37.26	61.58	57.92		32.45	31.58	41.58	5.95
15/12/1993	37.13	61.91	54.09			31.54	38.55	5.57
15/02/1994	33.56	60.89			26.07	30.29	36.44	5.55
15/04/1994	34.44	61	57.86	34.47	27.54	31.6	41.1	5.83
15/06/1994	38	62	61.94	40.23	28.82	31.94	42.28	6.34
15/09/1994	40.5	64.4		37.77	30.3	34.4	44.09	
15/10/1994	41.33	65.05		37.9	29.91		46.53	6.54
15/12/1994	40	66.58			28.2		41.2	5.95
15/02/1995	38.4	64.4	56.51	39	27.44	33.55	41.08	5.86
15/04/1995	38.5	64.2	55.41	38.4		33.3	40.95	6.06
15/06/1995	40.55	64.6		38.8	32.26	34.62	49.24	6.75
15/10/1995	43.96	68.28	58.51			37.9		7.65
15/12/1995	43.8	67.1						6.75
15/02/1996	42.83	68.42	61.33	41.65	37.21	37.74	45.53	6.86
15/04/1996	43.25	68.37			35.4		46.41	7.17
15/06/1996		66.97	63.83		33.2	39.45	48.4	7.7
15/08/1996	46.47	71	69.21			40.52	50.21	8.2

15/10/1996	48.07					42.2		8.85
15/12/1996	49.89		65.61					10
15/02/1997	50.08		59.01					10.06
15/04/1997	52.15		70.68			49.23	44.1	11.25
15/07/1997	52.83	80.25				47.17		8.85
15/10/1997	54.33	78.95	69.9			48.23		
15/02/1998	44.05	73.93				41.78		4.51
15/04/1998	41.74	71.4	62.08		38.76	38.28	44	6.08
15/06/1998	42.65	68.11	62.46	39.55	30.83	37.9	44.27	6.75
15/08/1998	41.15	70			32.5	38.72	45.56	7.37
15/10/1998		69.4	66.21		33.42		47.66	7.71
15/12/1998	45.92	69.62	64.63			40.26	48.56	6.89
15/02/1999	45.34	70.34				40.11	47.2	7.07
15/06/1999	46.22	70.25				40.41	49.12	7.58
15/08/1999		71.7	65.9	45.65		42.77	50.21	8.23
15/10/1999	47.56	73.05		45.4		43.25	50.8	8.05
15/04/2000		69.09		46.92		39.05	46.12	6.83
15/06/2000	45.2	63.8	42.04	46.7	30.5		47.26	8.65
15/08/2000	45.61	66.52	46.9	42.8	37.05	39.6	46.77	7.59
15/10/2000	46	77.5		46.65	32.5	40.1	47.81	6.15
15/12/2000	44.06	69.89	53.05			44.11	41.62	6.08
15/04/2001		67.33	67.91	39.29	34.36	43.17	39.6	6.55
15/06/2001	40.32	63.76	70.01			43.12	43.1	6.63
15/11/2001		55.57		42.05	33.7	35.3		
15/12/2001		58.4	59.63	41.78	31.2	37.1	42.18	5.85
15/03/2002	37.57	62.91	54.33		39.96	40.11		5.41
15/05/2002	34.12				32.74	38.68	39.95	6.23
15/07/2002	38.2	62.27			37.07	35.57	40.65	5.98
15/11/2002	36.6	63.39		39.67	26.9	34.47		6.8
15/01/2003	38.37	60.24		43.28	23.11	34.47	29.68	
15/03/2003	32.88	59.78		37.08	25.96	35.04	31.83	6.71
15/05/2003	34.57	63.14		31.75	22.14	33.53	28.46	4.05
15/06/2003								5.27
15/08/2003								5.7
15/09/2003	36.98			33.35	24.4	34.48	40.46	6.59
15/10/2003								6.59
15/11/2003	36.13	61.15	44.71	38.66	28.1	36.01	42.95	5.55
15/01/2004	37.65			36.7	24	30	37.75	5.97
15/03/2004	35.3	63.72		39.1	34.4	29.24	38.16	5.48
15/05/2004	36.07	61.31		34.5	35.82	30.08	39.61	5.87
15/06/2004								6.15
15/07/2004	38.35			36.25	29	31.58	41.7	6.15

15/08/2004								6.13
15/09/2004	40.75			40.8	34.73	33.64	43.08	6.46
15/10/2004								6.7
15/11/2004	41.89			40.7	39	39	43.95	6.71
15/12/2004								6.62
15/01/2005	41	66.3		40.7	37.42	43.18	43.69	6.13
15/02/2005								6.62
15/03/2005	40.59	65.58		37.75	39.17	36.06	43.85	6.24
15/05/2005	42.15			39.04	34.18	43.81	44.74	6.65
15/07/2005		67.8			30.88	36.96	42.55	6.97
15/08/2005								7.02
15/09/2005	43.92	64.34		41.12	29.76	37.94	42.81	6.55
15/10/2005								6.7
15/11/2005	47.21	70.22		40.01	29.2	37.52	44.72	6.75
15/01/2006	41.6	68.04		37.38	27.41	37.28		5.71
15/03/2006	37.95	64.83		35.04	26.11	34.16		5.57
15/05/2006				36.5		36.39	41.94	5.89
15/07/2006		65.37		36.5	26.72	35.71	43.15	6.22
15/09/2006	41.14	66.58		38.81	26	35.41	41.89	5.91
15/10/2006								5.95
15/11/2006		64.32		37.61	25.5		41.72	5.39
15/12/2006								5.45
15/01/2007	37.5			33.92	25.81	27.78	35	5.34
15/02/2007								5.93
15/03/2007	36.35	61		34.69	26.15	39.54		6.03
15/05/2007	38.2			34.75	29.79		38.25	6.35
15/07/2007	38.2			36.54	29.38	28.49	40.8	6.25
15/08/2007								6.55
15/09/2007					28.19	29.94	41.84	6.48
15/11/2007	38.4			37.89	27.14	34.31	42.92	6.17
15/01/2008	39.3			36.43	28.34	33.75	41.45	6.02
15/02/2008								5.91
15/03/2008	38.14			36.59	29.14	36.87	42.64	6.11
15/04/2008								6.26
15/05/2008	39.77			36.68	30.52	32.79	42.3	6.47
15/07/2008	40.47		57.53	37.8	30.52	32.79	42.2	6.85
15/09/2008	41.58		56.07		32.89	37.7	42.08	6.58
15/10/2008								6.75
15/11/2008	41.11		56.62			38.96	41.89	6.22
15/12/2008								6.18
15/01/2009	39		56.88	35.7	26.41	39.86	37.62	6.27
15/02/2009								6.16

15/03/2009				34.4	27.67		39.54	6.71
15/04/2009								5.82
15/05/2009	40.57			34.4	29.1	34.06	39.66	6.19
15/06/2009								7.11
15/07/2009	40.02		58.48	38.34	29.8	38.93	39.72	6.57
15/08/2009								6.71
15/09/2009	41.06		58.99	39.38	30.91	35.17	40.64	6.69
15/10/2009								6.75
15/11/2009	39.47		58.32	38.4	34.69	36.61	41.8	6.21
15/12/2009								6.48
15/01/2010	39.67			38.8	28.46	34.68	41.8	5.55
15/02/2010								5.8
15/03/2010	37.97			38.91	30.49	38.54	38.36	5.63
15/04/2010								5.58
15/05/2010	38.77		58.65	37.84	31.37	41.05	41	6.07
15/06/2010								6.83
15/07/2010	40.6			41.2	30.41	43.66	42.9	6.56
15/09/2010	42.42			41.55		44.06	45.32	6.24
15/10/2010								6.29
15/11/2010	42.98			40.93	31.17	40.7	46.23	6.9
15/12/2010								7.92
15/01/2011	43.5			40.69	31.7	39.64	45	8.04
15/03/2011	43.77			38.99	35.68	38.37	45.55	8.68
15/04/2011								7.75
15/05/2011				42.36	32.95	39.09	47.91	8.02
15/07/2011	46.9			44	36.6	40.41	49.3	8.75
15/08/2011								8.72
15/09/2011	48.14				41.6	41.9		8.36
15/11/2011	49.02			46.29	42.12	43.27	50.35	8.68
15/12/2011								8.27
15/01/2012	47.8			44.68		41.08	49.47	8.25
15/02/2012								8.38
15/03/2012	48.36			45.91	34.57	42.78	53.68	8.69
15/04/2012								8.87
15/05/2012	47.94			47.23	43.19	43.73	51.8	9.1
15/06/2012								8.69
15/07/2012				48.6	36.82			9.6
15/08/2012								9.7
15/09/2012	52							9.94
15/11/2012					41.3			9.48
15/12/2012								9.66
15/01/2013	51.6			48.6	36.5	48.42		9.51

15/03/2013	51.64			48.6	37.23	48.42		
15/05/2013	52.14			46.92	39.58	48.83	48.95	10.85
15/07/2013	53.5				35.7	47.88	51	11.18
15/09/2013	52.12			48.77	41.23	49.79	50.16	10.64
15/11/2013	51.14				40.15	48.05	50.48	10.27
15/01/2014					39.08	50.8		
15/03/2014					40.14	49.06		
15/05/2014								11.74
15/07/2014			75.77		48.86			
15/09/2014							55.05	12.55
15/11/2014			78.11					12.61
15/02/2015								13.85
15/04/2015								14.24
15/05/2015	61.62							
15/06/2015								14.98
15/08/2015								14.47
15/09/2015	63.48		82.29		46.57			14.29
15/11/2015	63.27				45.93			13.47
15/02/2016			76.4					10.3
15/03/2016								10.73
15/04/2016	56.83		82.52					10.94
15/05/2016								11.42
15/07/2016	57.33		75.64	54.33	41.73			11.72
15/08/2016								12.12
15/09/2016								12.06
15/10/2016			73.27	55.21	42.32	53.19		11.64
15/11/2016								10.55
15/01/2017	54.78		79.82	52.34	39.02	51.21		
15/04/2017	53.33		78.82	50.55	39.52			10.57
15/05/2017								10.8
15/06/2017								11.04
15/07/2017	54.13		73.1	51.65	40.4			11.02
15/10/2017	56.47		75.69		42.06			11.71
15/11/2017								11.56
15/12/2017								11.13
15/01/2018	56.43		80.52	53.44	40.95			11.34
15/02/2018								11.42
15/03/2018								11.7
15/04/2018	56.21		95.2	53.74				11.92
15/05/2018								12.18
15/06/2018								12.18
15/07/2018	57.48		76.67	55.05				12.35

15/10/2018	69.33			44.65			
15/11/2018							13.43
15/01/2019	69.98		80.52	43.42			12.86
15/04/2019	61.26		91.83				
15/05/2019							14.25
15/06/2019							14.13
15/07/2019	62.4		81.65				14.18
15/08/2019							14.74
15/10/2019	75.2		95.25				
15/01/2020			109.3				17.54
15/04/2020							19.91
15/07/2020							20.91
15/08/2020	76.83		106.28				21.28
15/09/2020							21.67
15/10/2020							22.28
15/11/2020	73.79		106.4				21.87
15/12/2020							22.4
15/01/2021	76.76			55.78			22.51
15/02/2021							22.5
15/03/2021							23
15/04/2021			107.56				23.27
15/05/2021							23.61
15/06/2021							23.85
15/07/2021	75.95		107.57	56.5			24.2
15/08/2021							24.88
15/09/2021							25.22
15/10/2021			107.52	59.68			25.79
15/11/2021							26.53
15/12/2021							26.5

Anexo C

C.1. Base de datos Hidrogeoquímicos

Tabla 10. Códigos e información de las muestras utilizadas para el análisis hidrogeoquímico. Manantiales destacados en celeste se analizan junto con los pozos.

Manantiales					Pozos					Ríos				
Id	mE	mN	Cota (m.s.n.m)	Fecha	Id	mE	mN	Cota (m.s.n.m)	Fecha	Id	mE	mN	Cota (m s.n.m.)	Fecha
MA-01	35055 5	638266 8	1128	01/09/1 8	PZ-01	35435 8	637458 3	924	01/02/20 22	R-01	35053 7	638673 4	1226	01/06/20 16
MA-02	35061 2	638685 5	1246	01/09/1 8	PZ-02	35424 8	637339 7	904	01/02/20 22	R-02	35686 1	635273 8	1219	01/06/20 16
MA-03	35078 5	638961 3	1515	01/09/1 8	PZ-03	35456 7	637354 2	917	01/02/20 22	R-03	35953 4	638557 0	2209	01/06/20 16
MA-04	35096 4	638961 0	1565	01/09/1 8	PZ-04	34287 2	637018 8	725	01/02/20 22	R-04	35444 1	638668 0	1891	01/06/20 16
MA-05	35144 8	639068 9	1899	01/09/1 8	PZ-05	35492 5	636656 0	895	01/02/20 22	R-05	38163 6	635866 9	1604	01/06/20 16
MA-06	35330 3	638992 1	2301	01/09/1 8	PZ-06	35400 0	636930 7	863	01/02/20 22	R-06	37982 5	635594 4	1522	01/06/20 16
MA-07	35373 4	638895 2	2146	01/09/1 8	PZ-07	35530 6	636593 6	898	01/02/20 22	R-07	36995 3	636407 8	1181	01/06/20 16
MA-08	35502 7	637691 1	1088	01/09/1 8	PZ-08	35543 6	636588 5	899	01/02/20 22	R-08	36976 2	636391 1	1154	01/06/20 16
MA-09	35510 4	637653 2	1077	01/09/1 8	PZ-09	35070 6	636300 1	857	01/02/20 22	R-09	36468 7	636361 5	1018	01/06/20 16
MA-10	35533 1	638771 1	2380	01/09/1 8	PZ-10	34101 2	637649 9	684	01/02/20 22	R-10	35198 6	636593 8	838	01/06/20 16
MA-11	35548 8	637842 9	1239	01/09/1 8	PZ-11	34693 6	637666 0	738	01/02/20 22	R-11	34596 3	637014 9	748	01/06/20 16
MA-12	35551 9	636999 4	902	01/09/1 8	PZ-12	33375 1	637825 5	608	01/02/20 22	R-12	33664 0	637488 5	629	01/06/20 16
MA-13	35557 4	636998 0	993	01/09/1 8	PZ-13	34078 6	636321 6	731	01/02/20 22	R-13	34022 6	636471 4	725	01/06/20 16
MA-14	35567 0	637006 1	939	01/09/1 8	PZ-14	34523 3	637072 0	745	01/02/20 22	R-14	35453 0	635953 6	942	01/06/20 16
MA-15	35579 2	638803 3	2085	01/09/1 8	PZ-15	34466 0	637074 0	736	01/02/20 22	R-15	35103 1	636023 6	854	01/06/20 16
MA-16	35734 3	636956 6	1088	01/09/1 8	PZ-16	34373 4	637186 8	723	01/02/20 22	R-16	35219 0	637610 7	826	01/06/20 16
MA-17	35917 8	638222 1	2179	01/09/1 8	PZ-17	34696 6	636988 5	771	01/02/20 22	R-17	35779 8	637380 6	1000	01/06/20 16
MA-18	35055 5	638266 8	1128	01/02/1 8	PZ-18	34782 2	636929 2	779	01/02/20 22	R-18	35686 1	635273 8	1219	01/02/20 17
MA-19	35061 2	638685 5	1246	01/02/1 8	PZ-19	34197 4	636141 0	745	01/02/20 22	R-19	38163 6	635866 9	1604	01/02/20 17
MA-20	35502 8	637691 1	1081	01/02/1 8	PZ-20	34291 3	636700 2	732	01/02/20 22	R-20	37982 5	635594 4	1522	01/02/20 17
MA-21	35510 4	637653 2	1077	01/02/1 8	PZ-21	34563 5	636732 4	761	01/02/20 22	R-21	33664 0	637488 5	629	01/02/20 17
MA-22	35533 1	638771 1	2380	01/02/1 8	PZ-22	35505 4	637015 4	926	01/07/20 18	R-22	35779 8	637380 6	1000	01/02/20 17
MA-23	35547 1	637897 0	1219	01/02/1 8	PZ-23	35428 9	637018 2	889	01/07/20 18	R-23	36260 8	638661 7	2823	01/02/20 17
MA-24	35557 6	636998 9	969	01/02/1 8	PZ-24	35493 2	636655 7	885	01/07/20 18	R-24	36009 3	638534 5	2320	01/02/20 17
MA-25	35557 7	637751 7	1157	01/02/1 8	PZ-25	34004 6	637662 5	644	01/07/20 18	R-25	35964 2	638559 6	2228	01/02/20 17
MA-26	35564 0	637002 1	965	01/02/1 8	PZ-26	35733 5	636521 3	896	01/07/20 18	R-26	35078 7	638963 1	1459	01/02/20 17
MA-27	35579 2	638803 3	2085	01/02/1 8	PZ-27	35603 2	636667 6	919	01/07/20 18	R-27	35370 6	639175 8	2396	01/02/20 17
MA-28	35672 3	638081 5	1535	01/02/1 8	PZ-28	35759 3	636703 1	1146	01/07/20 18	R-28	36182 6	636365 0	981	01/02/20 22
MA-29	35747 5	637989 6	1490	01/02/1 8	PZ-29	34834 8	636831 8	816	01/07/20 18	Canales				
MA-30	35720 2	636939 7	1082	01/07/1 8	PZ-30	34836 7	635939 9	835	01/07/20 18	Id	mE	mN	Cota	Fecha
MA-31	35727 6	636893 2	1102	01/07/1 8	PZ-31	34668 3	637282 2	749	01/07/20 18	CA-01	34309 0	637056 3	724	01/02/20 22

MA-32	35734 4	636958 3	1086	01/07/1 8	PZ-32	34651 7	636338 3	751	01/07/20 18	CA-02	35481 3	636677 6	891	01/02/20 22
MA-33	35734 7	636957 2	1085	01/07/1 8	PZ-33	35098 6	636024 9	882	01/07/20 18	CA-03	35494 3	636995 0	919	01/02/20 22
MA-34	33997 4	635940 3	926	01/02/1 7	PZ-34	35115 5	636007 2	876	01/07/20 18					
MA-35	34518 6	637881 4	800	01/02/1 7	PZ-35	34896 7	635979 5	821	01/07/20 18					
MA-36	34538 1	638767 5	1105	01/02/1 7	PZ-36	33956 2	637204 2	670	01/07/20 18					
MA-37	34893 0	635730 3	903	01/02/1 7	PZ-37	34876 0	635966 4	816	01/07/20 18					
MA-38	35073 8	635730 9	1056	01/02/1 7	PZ-38	35602 1	637891 0	1283	01/09/20 18					
MA-39	35078 2	638961 0	1562	01/02/1 7	PZ-39	35446 1	637447 4	939	01/09/20 18					
MA-40	35161 2	639104 5	1933	01/02/1 7	PZ-40	35462 7	637565 7	980	01/09/20 18					
MA-41	35454 1	639240 8	2465	01/02/1 7	PZ-41	35442 0	637553 7	973	01/09/20 18					
MA-42	35519 8	635491 1	1220	01/02/1 7	PZ-42	35483 3	637012 8	918	01/09/20 18					
MA-43	35548 8	637842 9	1239	01/02/1 7	PZ-43	34841 5	638160 6	895	01/09/20 18					
MA-44	35551 9	636999 4	902	01/02/1 7	PZ-44	34881 2	638238 1	938	01/09/20 18					
MA-45	35557 4	636998 0	993	01/02/1 7										
MA-46	35567 0	637006 1	939	01/02/1 7										
MA-47	35711 5	638315 4	1784	01/02/1 7										
MA-48	35734 3	636956 6	1088	01/02/1 7										
MA-49	35807 0	638133 0	1783	01/02/1 7										
MA-50	35917 8	638222 1	2179	01/02/1 7										
MA-51	36172 0	637863 6	1701	01/02/1 7										
MA-52	34475 5	637930 8	877	01/06/1 6										
MA-53	34893 0	635730 3	903	01/06/1 6										
MA-54	35505 3	638594 5	1844	01/06/1 6										
MA-55	35548 8	637842 9	1239	01/06/1 6										
MA-56	35551 9	636999 4	902	01/06/1 6										
MA-57	35567 0	637006 1	939	01/06/1 6										
MA-58	35711 5	638315 4	1784	01/06/1 6										
MA-59	35734 3	636956 6	1088	01/06/1 6										
MA-60	36316 4	637530 7	1456	01/06/1 6										
MA-61	34035 7	635836 1	1269	01/06/1 6										
MA-62	34518 1	637880 0	800	01/06/1 6										
MA-63	34538 1	638767 5	1105	01/06/1 6										
MA-64	34541 6	638766 0	1120	01/06/1 6										
MA-65	35061 2	638685 5	1246	01/06/1 6										
MA-66	35502 7	637691 1	1088	01/06/1 6										
MA-67	35510 4	637653 2	1077	01/06/1 6										

Anexo D: Isótopos

Datos isotópicos

Tabla 11. Datos isotópicos de pozo, manantiales, ríos y canales

Muestra	Tipo	Fecha	Cota [m.s.n.m]	$\delta^{18}\text{O}$ VSMOW	δD VSMOW
RF-1	Pozo	feb-22	924	-11.33	-85.57
RF-6	Pozo	feb-22	904	-11.47	-87.19
RF-7	Pozo	feb-22	917	-12.39	-92.62
RF-11	Pozo	feb-22	725	-14.94	-110.54
RF-15	Pozo	feb-22	895	-14.84	-111.06
RF-20	Pozo	feb-22	863	-13.96	-104.75
RF-21	Pozo	feb-22	898	-13.44	-101.25
RF-22	Pozo	feb-22	899	-14.14	-105.79
RF-24	Pozo	feb-22	684	-12.48	-93.99
RF-26	Pozo	feb-22	738	-13.13	-98.61
RF-31A	Pozo	feb-22	608	-13.7	-101.8
RF-34	Pozo	feb-22	731	-13.65	-102.51
RF-37A	Pozo	feb-22	745	-15.0	-110.2
RF-38	Pozo	feb-22	736	-14.64	-109.20
RF-39	Pozo	feb-22	723	-14.88	-110.63
RF-41	Pozo	feb-22	771	-14.96	-111.59
RF-44	Pozo	feb-22	779	-14.93	-111.41
RF-46	Pozo	feb-22	745	-13.15	-100.22
RF-47A	Pozo	feb-22	732	-14.2	-105.3
RF-48	Pozo	feb-22	761	-14.45	-108.25
MT-13	Pozo	sep-18	1283	-12.32	-87.00
MT-63	Pozo	sep-18	939	-12.01	-85.33
MT-64	Pozo	sep-18	980	-11.40	-83.48
MT-65	Pozo	sep-18	973	-11.31	-83.42
MT-83	Pozo	sep-18	918	-15.38	-107.92
MT-84	Pozo	sep-18	895	-11.61	-81.65
MT-85	Pozo	sep-18	938	-11.58	-82.91
MT63	Pozo	feb-18	939	-12.010	-85.330
MT64	Pozo	feb-18	980	-11.400	-83.480
MT65	Pozo	feb-18	973	-11.310	-83.420
MT71	Pozo	feb-18	918	-15.380	-107.920
MT5	Pozo	feb-17	938	-8.856	-73.179
MT4	Pozo	feb-17	895	-6.309	-69.521
MT13	Pozo	feb-17	1283	-11.306	-86.240
MT5	Pozo	jun-16	938	-11.59	-81.86
MT4	Pozo	jun-16	895	-12.06	-79.30

MT13	Pozo	jun-16	1283	-11.41	-83.06
MT-1	Manantial	sep-18	939	-10.28	-74.74
MT-2	Manantial	sep-18	902	-10.08	-75.12
MT-3	Manantial	sep-18	1088	-11.46	-81.88
MT-09	Manantial	sep-18	1246	-11.93	-85.38
MT-12	Manantial	sep-18	1077	-11.41	-81.43
MT-14	Manantial	sep-18	1239	-12.17	-85.79
MT-15	Manantial	sep-18	1088	-11.30	-82.85
MT-50	Manantial	sep-18	993	-10.52	-77.06
MT-52	Manantial	sep-18	2179	-13.80	-93.53
MT-54	Manantial	sep-18	1128	-11.73	-82.98
MT-67	Manantial	sep-18	2380	-11.43	-83.67
MT-68	Manantial	sep-18	2085	-13.15	-92.33
MT-69	Manantial	sep-18	2301	-12.77	-92.34
MT-70	Manantial	sep-18	2146	-12.47	-87.60
MT-80	Manantial	sep-18	1899	-11.69	-89.70
MT-81	Manantial	sep-18	1565	-9.93	-83.30
MT-82	Manantial	sep-18	1515	-12.56	-87.28
MT67	Manantial	feb-18	2380	-11.430	-83.670
MT68	Manantial	feb-18	2085	-13.150	-92.330
MT1	Manantial	feb-17	939	-8.730	-73.154
MT2	Manantial	feb-17	902	-9.616	-75.680
MT3	Manantial	feb-17	1088	-10.047	-75.499
MT75	Manantial	feb-17	800	-5.329	-64.234
MT9	Manantial	feb-17	1246	-8.619	-80.303
MT12	Manantial	feb-17	1077	-7.615	-74.105
MT14	Manantial	feb-17	1239	-11.714	-87.175
MT15	Manantial	feb-17	1088	-9.793	-78.297
MT17	Manantial	feb-17	1105	-7.324	-68.015
MT18	Manantial	feb-17	903	-11.895	-93.597
MT19	Manantial	feb-17	1220	-8.168	-73.586
MT21	Manantial	feb-17	1784	-11.274	-87.479
MT25	Manantial	feb-17	1750	-10.075	-84.605
MT43	Manantial	feb-17	2651	-12.537	-98.636
MT44	Manantial	feb-17	2757	-12.732	-96.113
MT45	Manantial	feb-17	2584	-12.448	-92.227
MT47	Manantial	feb-17	2908	-11.680	-90.198
MT50	Manantial	feb-17	993	-8.969	-72.627
MT51	Manantial	feb-17	1056	-7.885	-76.597
MT52	Manantial	feb-17	2179	-11.885	-86.948
MT53	Manantial	feb-17	1783	-11.589	-81.925
MT54	Manantial	feb-17	1128	-10.052	-79.961
MT55	Manantial	feb-17	1701	-11.365	-85.761
MT57	Manantial	feb-17	1562	-9.414	-78.943
MT58	Manantial	feb-17	1933	-10.759	-85.542

MT60	Manantial	feb-17	2465	-7.492	-72.328
MT61	Manantial	feb-17	926	-8.213	-67.610
MT1	Manantial	feb-17	939	-9.98	-73.95
MT2	Manantial	feb-17	902	-11.11	-78.30
MT3	Manantial	feb-17	1088	-11.23	-80.02
MT6	Manantial	feb-17	1269	-13.90	-102.08
MT7	Manantial	feb-17	877	-12.75	-92.21
MT8	Manantial	feb-17	800	-11.30	-82.40
MT9	Manantial	feb-17	1246	-11.89	-82.13
MT11	Manantial	feb-17	1456	-11.59	-83.35
MT12	Manantial	feb-17	1077	-10.48	-79.02
MT14	Manantial	feb-17	1239	-11.17	-80.50
MT15	Manantial	feb-17	1088	-10.84	-79.04
MT16	Manantial	feb-17	1120	-10.81	-76.52
MT17	Manantial	feb-17	1105	-10.96	-75.96
MT18	Manantial	feb-17	903	-13.49	-93.69
MT21	Manantial	feb-17	1784	-11.14	-86.27
MT23	Manantial	feb-17	1844	-11.91	-87.60
MT25	Manantial	feb-17	1750	-12.39	-93.90
MT41	Manantial	feb-17	2701	-13.17	-94.91
RF-45A	Río	feb-22	981	-15.2	-112.6
MT 20	Río	feb-17	1219	-10.534	-81.807
MT 26	Río	feb-17	1604	-11.734	-102.082
MT 27	Río	feb-17	1522	-12.994	-101.800
MT 33	Río	feb-17	629	-15.098	-110.160
MT 38	Río	feb-17	1000	-12.702	-91.832
MT 42	Río	feb-17	2823	-12.479	-92.960
MT 48	Río	feb-17	2320	-11.927	-93.377
MT 49	Río	feb-17	2228	-12.172	-89.175
MT 56	Río	feb-17	1459	-10.840	-86.262
MT10	Río	feb-17	1226	-12.49	-86.34
MT19	Río	feb-17	1220	-11.30	-80.51
MT22	Río	feb-17	2209	-13.66	-95.02
MT24	Río	feb-17	1891	-12.03	-88.49
MT26	Río	feb-17	1604	-14.66	-108.03
MT27	Río	feb-17	1522	-15.17	-104.20
MT28	Río	feb-17	1181	-13.07	-88.41
MT29	Río	feb-17	1154	-13.79	-98.33
MT30	Río	feb-17	1018	-15.17	-107.84
MT31	Río	feb-17	838	-15.33	-109.59
MT32	Río	feb-17	748	-15.27	-107.09
MT33	Río	feb-17	629	-15.21	-107.31
MT34	Río	feb-17	725	-14.45	-101.63
MT35	Río	feb-17	942	-14.30	-100.32
MT36	Río	feb-17	854	-13.82	-95.65

MT37	Río	feb-17	826	-12.67	-91.18
MT38	Río	feb-17	1000	-12.90	-95.24
MT10	Río	jun-16	1226	-12.49	-86.34
MT22	Río	jun-16	2209	-13.66	-95.02
MT24	Río	jun-16	1891	-12.03	-88.49
MT26	Río	jun-16	1604	-14.66	-108.03
MT27	Río	jun-16	1522	-15.17	-104.20
MT28	Río	jun-16	1181	-13.07	-88.41
MT29	Río	jun-16	1154	-13.79	-98.33
MT30	Río	jun-16	1018	-15.17	-107.84
MT31	Río	jun-16	838	-15.33	-109.59
MT32	Río	jun-16	748	-15.27	-107.09
MT33	Río	jun-16	629	-15.21	-107.31
MT34	Río	jun-16	725	-14.45	-101.63
MT35	Río	jun-16	942	-14.30	-100.32
MT36	Río	jun-16	854	-13.82	-95.65
MT37	Río	jun-16	826	-12.67	-91.18
MT38	Río	jun-16	1000	-12.90	-95.24
RF-13A	Canal	feb-22	724	-16.1	-118.4
RF-16A	Canal	feb-22	891	-15.6	-115.1
RF-18	Canal	jun-16	919	-16.28	-120.50

Anexo E

E.1. Background Geológico

Tabla 12. Datos utilizados para obtener los límites naturales

Id	mE	mN	Cota
MA-01	350555	6382668	1128
MA-02	350612	6386855	1246
MA-03	350785	6389613	1515
MA-04	350964	6389610	1565
MA-05	351448	6390689	1899
MA-06	353303	6389921	2301
MA-07	353734	6388952	2146
MA-08	355027	6376911	1088
MA-09	355104	6376532	1077
MA-10	355331	6387711	2380
MA-11	355488	6378429	1239
MA-12	355519	6369994	902
MA-13	355574	6369980	993
MA-14	355670	6370061	939
MA-15	355792	6388033	2085
MA-16	357343	6369566	1088
MA-17	359178	6382221	2179
MA-25	355577	6377517	1157
MA-28	356723	6380815	1535
MA-29	357475	6379896	1490
MA-30	357202	6369397	1082
MA-31	357276	6368932	1102
MA-34	339974	6359403	926
MA-35	345186	6378814	800
MA-36	345381	6387675	1105
MA-37	348930	6357303	903
MA-38	350738	6357309	1056
MA-39	350782	6389610	1562
MA-40	351612	6391045	1933
MA-41	354541	6392408	2465
MA-42	355198	6354911	1220
MA-47	357115	6383154	1784
MA-49	358070	6381330	1783
MA-51	361720	6378636	1701
MA-52	344755	6379308	877
MA-54	355053	6385945	1844
MA-60	363164	6375307	1456