



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

# ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO DE LAS ROCAS FRACTURADAS DEL CAJÓN DEL MAIPO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

SEBASTIÁN IGNACIO YÁÑEZ VERA

PROFESORA GUÍA:

LINDA DANIELE

PROFESOR CO-GUÍA:

MATIAS TAUCARE TORO

MIEMBRO DE LA COMISIÓN:

BENOÎT VIGUIER

Esta Memoria de Título se ha realizado en el marco del Consorcio Tecnológico Centro Avanzado para las Tecnologías del Agua (CAPTA), proyecto CORFO 19CTIGH-121349.

SANTIAGO DE CHILE

2022

## RESUMEN

El presente Trabajo de Título consiste en un análisis de las redes de fracturas en la Cordillera Principal de Los Andes en la zona del Cajón del Maipo, con el fin de evaluar su rol en la recarga y circulación de agua subterránea.

Debido al contexto de sequía por la que atraviesa la zona de estudio, en primera instancia se realizó una caracterización hidroclimática e hidrológica utilizando datos públicos entre 1991 y 2021, principalmente de precipitación, evapotranspiración, caudales y derechos de agua. Los resultados muestran un déficit aproximado de 40% en precipitación y caudales con respecto a años anteriores a 2010.

Con datos públicos recopilados de composición química e isotópica de las aguas de la zona de estudio se realizó un análisis hidrogeoquímico que permitió identificar patrones fisicoquímicos que ayuden a aclarar el origen y las relaciones entre las aguas superficiales y subterráneas, incluyendo las muestras procedentes de los túneles del proyecto Alto Maipo. Los valores de conductividad eléctrica muestran la tendencia de aumentar a medida que disminuye la cota de las aguas superficiales o si aumenta la profundidad de las aguas subterráneas. Respecto al tipo de agua, las muestras de agua superficial son del tipo sulfatada cálcicas en su gran mayoría, mientras que las muestras de agua subterránea aflorada en los túneles presentan gran variabilidad en su composición química respecto a muestras cercanas.

Los isótopos estables del agua  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$ , señalan que la mayoría de las muestras de agua subterránea de los túneles no han sido afectadas por evaporación y que el empobrecimiento puede relacionarse con la diferencia en la cota de precipitación. El isótopo radiactivo tritio revela la existencia de aguas con edades superiores a los 60 años (muestras con valores de UT bajo el límite de detección) y otras con distintos rangos de edades entre los 20 y 50 años. Todo lo analizado corrobora la existencia de una circulación por roca fracturada con distintos flujos y tiempos de tránsito que permite una diferenciación fisicoquímica en la mineralización de las aguas asociadas a diferentes patrones de circulación y tiempos de interacción con la roca.

El análisis de las redes de fracturas se realizó mediante un mapeo remoto, a partir de un raster de mosaico y un Modelo de Elevación Digital (DEM) se identificaron lineamientos morfoestructurales como quebradas, valles, cambios de pendientes, escarpes y discontinuidades evidentes. El resultado arrojó que las direcciones de los lineamientos son NS y NW preferentemente, acorde al contexto geológico de la zona: Faja Corrida y Plegada del Aconcagua reconocida por sus estructuras NS, y la Zona de Deformación del Maipo con estructuras NW y NE. Mediante el uso de la herramienta NetworkGT para Sistemas de Información Geográfica (SIG) se realizaron mapas de densidad y de conectividad de fracturas que permitieron reconocer dos zonas potenciales de circulación y/o recarga. Estas zonas coinciden espacialmente con muestras de agua subterráneas utilizadas en el análisis hidrogeoquímico.

La circulación favorecida por zonas de alta densidad y/o conectividad de fracturas permitiría la recarga y circulación de agua en el gran volumen de roca fracturada que conforma el área de estudio. Finalmente, el Cajón del Maipo presenta una hidrogeología compleja que aún no se conoce en detalle, y si bien la principal limitación de este estudio es no haber corroborado en terreno los detalles estructurales, los resultados son un primer paso para adentrarse en el mayor entendimiento del funcionamiento hidrogeológico de esta zona de suministro de agua para el Gran Santiago.

## AGRADECIMIENTOS

Llegó el momento de dar término a esta etapa de la vida, un momento que busqué por varios años y es imposible que no se me vengan a la cabeza tantos nombres que me ayudaron y facilitaron a llegar a esta instancia.

Quisiera agradecer en primer lugar a mi profesora guía Linda Daniele y a mi profesor co-guía Matias Taucare por orientarme en este proceso con sus consejos, correcciones y su ayuda, más considerando el contexto de pandemia con la que realice este trabajo de tesis, además de permitirme realizar un tema de investigación acorde a mis gustos e ideales. Agradecer también a Constanza, del Santuario Lagunillas, por hacer visible los problemas que afectan a la naturaleza y comunidades por la falta de agua, buscar apoyo académico y darme la oportunidad de realizar un tema de investigación con un trasfondo.

Agradezco infinitamente a mis padres, Carolina y Juan, por permitirme estudiar lejos de casa, por el esfuerzo de mantener a un hijo en otra ciudad y en una institución como lo es la Universidad de Chile, por el apoyo incondicional. A mi lela Ruth, por todo el cariño y ánimo que me ha dado durante toda mi vida. Agradecer a mi hermana Camila y primo Francisco por tanto apañe en todos estos años. Y a toda mi familia por ser un punto de reunión y seguridad.

Agradecer a cada amigo y conocido que hicieron esta estadía por la universidad mucho más grata. A los amigos de la infancia y en especial a los del FPMF por ser la familia santiaguina con quien tomar once. A los amigos de la u, a los cabros del pastoral, les cabres de las bancas, a los sedex, por siempre apañar con la recreación y hacer de la universidad un periodo que no olvidaré. Sumarle a cada compañero que tuve en distintos ramos, especialmente a la generación de geo que hicieron de la carrera algo inolvidable. También quiero agradecer a Javiera, quien fue mi compañera por gran parte de este periodo, porque sin su apoyo, compañía y amor este período hubiese sido mucho más difícil.

¡Muchas gracias a todos!

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Formulación de estudio propuesto .....	1
1.2. Hipótesis de trabajo.....	2
1.3. Objetivos .....	2
1.3.1. Objetivo General. ....	2
1.3.2. Objetivos específicos .....	3
1.4. Ubicación y acceso.....	3
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	5
2.1. Caracterización hidroclimática e hidrológica .....	5
2.2. Recopilación y análisis de datos químicos.....	5
2.3. Mapeo y análisis de lineamientos .....	6
<b>3. MARCO GEOLÓGICO</b> .....	8
3.1. Geología regional .....	8
3.2. Geología local .....	9
3.2.1. Rocas estratificadas .....	9
3.2.2. Unidades volcánicas.....	11
3.2.3. Unidades intrusivas .....	13
3.2.4. Depósitos no consolidados.....	13
3.3. Geología estructural .....	15
<b>4. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA</b> .....	19
4.1. Descripción general de la cuenca.....	19
4.2. Relieve.....	20
4.3. Clima y precipitación .....	22
4.4. Escorrentía.....	25
4.5. Evapotranspiración potencial .....	26
4.6. Hidrogeología.....	27
4.7. Derechos de agua .....	28

<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	31
5.1 Análisis hidroclimático .....	31
5.2. Hidrogeoquímica .....	36
5.3. Caracterización isotópica .....	45
5.4. Análisis topológico.....	51
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	60
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	62
<b>ANEXO</b> .....	70
Anexo A: Parámetros hidrometeorológicos .....	70
Anexo B: Datos hidroquímicos .....	77
Anexo C: QA/QC .....	86

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación y acceso de la zona de estudio. ....	4
Figura 2: Nomenclatura topológica para la caracterización de redes de fracturas según Sanderson y Nixon (2015). a) Mapa de una red de fracturas, y b) su caracterización topológica. Tomado de Taucare et al. (2020b). ....	7
Figura 3: Morfoestructuras entre los 32° y 35° S. El recuadro rojo indica el área de estudio. Basado en Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2001), Giambiagi et al. (2003a) y Tassara y Yáñez (2003). Tomado de Fock (2005). ....	9
Figura 4: Mapa geológico de la zona de estudio. Basado en Thiele (1980), Aguirre (1999), Gana et al. (1999), Giambiagi (2000), Giambiagi et al. (2001), Bustamante (2001), Sellés y Gana (2001), Giambiagi y Ramos (2002), SERNAGEOMIN (2003), Fock (2005), Armijo et al. (2010), SEGEMAR (2010), Riesner et al. (2017, 2018).....	14
Figura 5: Mapa estructural de los Andes (Polanski, 1964, 1972; Thiele, 1980; Rivano et al., 1993; Gana et al., 1999; SEGEMAR, 2000, 2010; Giambiagi et al., 2001; Giambiagi & Ramos 2002; SERNAGEOMIN, 2003; Fock, 2005; Armijo et al., 2010; Riesner et al., 2017). El recuadro rojo indica el área de estudio, WVF indica pliegues con vergencia oeste, FTB indica Faja Plegada y Corrida. Tomado de Riesner et al. (2018). ....	15
Figura 6: Sección transversal de la Cordillera Principal a 33,5°S. WVF indica pliegues con vergencia oeste, FTB indica Faja Plegada y Corrida, FC indica Cordillera Frontal. Tomado de Riesner et al. (2018). ....	15
Figura 7: Zona de deformación del Maipo (MDZ) resaltada en azul y zona de estudio en recuadro rojo. La geología de fondo es de SERNAGEOMIN (2002); fallas en el oeste Cordillera principal son de Piquer et al. (2016). RB-LB: Río Blanco – Los Bronces; ET: El Teniente; EP: Prospecto Escalones; SPN: vetas San Pedro de Nolasco; CIC: complejo intrusivo de Carlota; LA: Depósito ligado a los estratos de Lo Aguirre; AD: distrito de Antena de vetas de Au orogénicas; MV: volcán Maipo; WMC: Cordillera principal occidental; EMC: Cordillera Principal oriental. Tomado de Piquer et al. (2021). ....	16
Figura 8: División hidrográfica de la subcuenca Río Maipo Alto, además de estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas. Datos obtenidos de DGA (2020). ....	20
Figura 9: Principales cumbres, glaciares y cauces de la zona de estudio. Mapeo de glaciares obtenido de Infraestructura de Datos Geoespaciales (IDE) del Ministerio de Bienes Nacionales y realizado por la Dirección General de Aguas (DGA, 2014).....	21
Figura 10: Estaciones meteorológicas DGA. Información adicional sobre las estaciones en Anexo A. ....	22
Figura 11: Precipitación mensual promedio entre los años 1991-2020 en cuatro estaciones meteorológicas DGA. Datos obtenidos de DGA (2020).....	23
Figura 12: Climograma en estación meteorológica DGA en Embalse El Yeso entre los años 1991-2020. Línea azul indica temperatura y barras verdes indican precipitación. Datos obtenidos de DGA (2020).....	23
Figura 13: Área de cobertura de la nieve promedio y su límite inferior promedio (isoterma 0) durante los años 2000-2022. Datos obtenidos de Observatorio de Nieve de los Andes de Argentina y Chile (2022). ....	24
Figura 14: Caudal medio mensual entre los años 1991 y 2020 para cinco estaciones fluviométricas DGA. Datos obtenidos de DGA (2020). ....	25
Figura 15: Evapotranspiración potencial promedio y temperatura media promedio en Embalse El Yeso para el periodo 1991-2020. Elaboración propia con datos CAMELS-LS y DGA (2020). ....	26
Figura 16: Mapa hidrogeológico de Chile (1986) entre los 33° y 34°S escala 1:2.500.000. El recuadro verde indica el área de estudio. Tomado de DGA (1986). ....	27
Figura 17: Usos de derechos de agua consuntiva. Datos obtenidos de DGA (2021).....	28
Figura 18: Usos de derechos de agua no consuntiva. Datos obtenidos de DGA (2021). ....	29
Figura 19: Mapa con distribución de puntos de captación de derechos de aguas. Elaboración propia con datos obtenidos de DGA (2021). ....	30
Figura 20: Precipitación anual durante los años 1991-2020. Datos obtenidos de DGA (2020). ....	31
Figura 21: Índice de Niño Oceánico. Períodos cálidos y húmedos en azul y fríos y secos en naranja. Datos obtenidos de NOAA/National Weather Service (2021). ....	32

Figura 22: Precipitaciones mensuales promedio para los periodos de 1991-2010 y 2011-2020 en las estaciones meteorológicas de San José de Maipo y Embalse El Yeso. Datos obtenidos de DGA (2020). .....	32
Figura 23: Temperaturas medias promedio para los periodos 1991-2010 y 2011-2020 en la estación meteorológica de Embalse El Yeso. Datos obtenidos de DGA (2020). .....	33
Figura 24: Área de cobertura de la nieve anual y su límite inferior anual (isoterma 0) durante los años 2000-2022. Datos obtenidos de Observatorio de Nieve de los Andes de Argentina y Chile (2022). .....	33
Figura 25: Área de cobertura de la nieve anual y su límite inferior anual (isoterma 0) para los periodos 2000-2010 y 2011-2022. Datos obtenidos de Observatorio de Nieve de los Andes de Argentina y Chile (2022). ...	34
Figura 26: Caudal total anual en cinco estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas para el periodo de 1991-2020. Datos obtenidos de DGA (2020). .....	35
Figura 27: Caudal medio mensual promedio para el periodo de 1991-2020 en el sector de El Manzano. Datos obtenidos de DGA (2020). .....	35
Figura 28: Distribución de datos químicos de aguas en la cuenca Río Maipo Alto. Datos: Risacher y Hauser (2008), Bustamante et al. (2010), Benavente (2015) y Pincetti (2016) y SRK (2020). .....	37
Figura 29: Diagrama de Piper para aguas de la cuenca Río Maipo Alto. Datos: Risacher y Hauser (2008), Bustamante et al. (2010), Benavente (2015), Pincetti (2016) y SRK (2020). .....	37
Figura 30: Mapa geológico de la zona de estudio junto a trazas de túneles de la hidroeléctrica Alto Maipo y muestras de aguas afloradas, datos de SRK (2020). Basado en Thiele (1980), Aguirre (1999), Gana et al. (1999), Giambiagi (2000), Giambiagi et al. (2001), Bustamante (2001), Sellés y Gana (2001), Giambiagi y Ramos (2002), SERNAGEOMIN (2003), Fock (2005), Armijo et al. (2010), SEGEMAR (2010), Riesner et al. (2017, 2018). .....	38
Figura 31: Perfil geológico de los túneles Las Lajas, Alfalfal II y Volcán interpretado del mapa geológico. .	39
Figura 32: Gráfico de Conductividad Eléctrica vs Cota para muestras en túneles de la hidroeléctrica Alto Maipo. Datos obtenidos de SRK (2020). .....	40
Figura 33: Gráfico de Conductividad Eléctrica vs Cota para muestras superficiales y de pozos en la cuenca Alto Maipo. Datos obtenidos de SRK (2020). .....	40
Figura 34: Gráfico de Conductividad Eléctrica vs Profundidad para muestras en túneles de la hidroeléctrica Alto Maipo. Datos obtenidos de SRK (2020). .....	41
Figura 35: Diagrama de Piper para muestras de agua en el área norte, asociada al río Colorado. Datos obtenidos de SRK (2020). .....	42
Figura 36: Mapa con diagramas de Stiff para muestras de agua en el área norte, asociada al río Colorado. El Diagrama de Stiff tiene un máximo de 21 meq/L con una separación de 3 meq/L. Datos obtenidos de SRK (2020). .....	43
Figura 37: Diagrama de Piper para muestras de agua en el área sur, asociada a los ríos Yeso y Volcán. Datos obtenidos de SRK (2020). .....	44
Figura 38: Mapa con diagramas de Stiff para muestras de agua en el área sur asociada a los ríos Yeso y Volcán. El Diagrama de Stiff tiene un máximo de 49 meq/L con una separación de 7 meq/L. Datos obtenidos de SRK (2020). .....	44
Figura 39: Gráfico de isótopos del agua, relación entre $\delta D$ vs $\delta^{18}O$ para aguas subterráneas, superficiales y de pozo, Línea de Agua Meteorica (MWL) a los 33° S (Taucare et al., 2020) y Línea de Agua Meteorica Global (Craig, 1961). Datos obtenidos de SRK (2020). .....	46
Figura 40: Gráfico de isótopos del agua, relación entre $\delta^{18}O$ vs altitud para aguas subterráneas, superficiales y de pozo. Datos obtenidos de SRK (2020). .....	46
Figura 41: Gráfico de evolución en el tiempo del Tritio (UT) para las estaciones en Santiago, Mendoza y Kaitoke. Datos obtenidos de IAEA/WMO (2021). .....	48
Figura 42: Gráfico de regresión entre estación Kaitoke y Santiago/Mendoza. Datos obtenidos de IAEA/WMO (2021). .....	48
Figura 43: Gráfico de evolución en el tiempo del Tritio (UT) a partir de regresión en el área de estudio. Datos obtenidos de IAEA/WMO (2021). .....	48
Figura 44: Gráfico de Tritio (UT) para aguas afloradas en túneles, con límite de detección de 0,5. Datos obtenidos de SRK (2020). .....	49
Figura 45: Gráfico de edades estimadas para aguas afloradas en túneles. Datos obtenidos de SRK (2020). ...	50

Figura 46: Gráfico de Tritio (UT) vs profundidad para aguas afloradas en túneles, con límite de detección de 0,5. Datos obtenidos de SRK (2020). .....	50
Figura 47: Mapa con lineamientos morfoestructurales con sus orientaciones aproximadas junto a Diagrama de rosas con orientación de red de lineamientos con separación de 10°. .....	51
Figura 48: Mapa con caracterización topológica de la red de lineamientos. ....	52
Figura 49: Mapa con análisis topológico: número de nodos (nodos I + nodos Y + nodos X). ....	53
Figura 50: Mapa con análisis topológico: número de conexiones (nodos Y + nodos X). ....	54
Figura 51: Mapa con análisis topológico: densidad de fracturas, razón entre la suma de las longitudes de los lineamientos y el área de influencia. ....	55
Figura 52: Diagrama hidrogeológico del Frente Andino Occidental, se destaca el rol de las fallas oblicuas del basamento en la circulación de las aguas subterráneas provenientes de la Cordillera Principal y la recarga de los acuíferos aluviales adyacentes. Tomado de Taucare et al. (2020b). ....	57
Figura 53: Mapa con zonas de interés a partir de número de conexiones, muestras de aguas subterráneas en túneles de hidroeléctrica Alto Maipo y fallas identificadas en la zona de estudio. ....	58
Figura 54: Mapa con zonas de interés a partir de intensidad de fracturas, muestras de aguas subterráneas en túneles de hidroeléctrica Alto Maipo y fallas identificadas en la zona de estudio. ....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: División hidrográfica de cuenca Río Maipo Alto. ....	19
Tabla 2: Diez derechos de agua no consuntivo con mayor caudal otorgado, sus usos y distancia estimada de restitución. Esta distancia es mencionada en la plantilla de la DGA, además se calcularon dos distancias extras: distancia* es calculada con las coordenadas UTM de captación y restitución y la distancia** es calculada con las coordenadas UTM de captación, restitución y el desnivel entre ellas. Datos obtenidos de DGA (2021). ....	29

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Formulación de estudio propuesto

El agua es un recurso esencial para la vida y los ecosistemas, por eso es necesario conocer en detalle su interacción con el medio al fin de desarrollar una gestión prudente con las necesidades de la humanidad y los ecosistemas. Los problemas de agua son un tema de interés global especialmente vinculado al crecimiento poblacional, al cambio climático y los cambios de estilos de vida (globalización) que generan aumentos en la demanda (Taylor et al., 2013; IPCC, 2014; Tanuguchi et al., 2017).

Chile, en particular, desde el año 2009 está pasando por un periodo prolongado de cambios en el régimen de precipitaciones (Boiser et al., 2016, 2018; Garreaud et al., 2017, 2020), que está afectando el territorio nacional de manera intensa y prolongada con una sequía. La extensión de esta condición ha sido definida “mega sequía” y está afectando especialmente las regiones norte-centro (Garreaud et al., 2017, 2020). A las menores precipitaciones se añade una administración basada en el otorgamiento de derechos de agua que convierte la gestión en una tarea compleja. La disminución de los caudales superficiales ha puesto de manifiesto la importancia de las aguas subterráneas en asegurar la disponibilidad de agua no sólo para consumo humano. Este motivo ha impulsado a múltiples comunidades, ONG y grupos medioambientales a tomar medidas en defensa del agua.

En Chile el agua subterránea juega un papel clave en las distintas actividades socioeconómicas (riego, industria, consumo, etc.). El uso de agua subterránea para agua potable ronda el 40% del volumen total consumido en zonas urbanas, mientras que en zonas rurales alcanza hasta el 76% (DPRH, 2015). No obstante, la entrada y distribución del agua subterránea en el ciclo hidrológico y en el territorio aún no se conoce en detalle. Los acuíferos mejor conocidos y explotados en Chile se limitan a los constituidos en sedimentos cuaternarios no consolidados de diferente origen (aluvial, coluvial, fluvial, fluvio-glacial, laháricos, etc.). En relación con el territorio se han dividido en tres sectores hidrogeológicos: sector altiplánico, sector andino vertiente pacífico y el sector de cuencas costeras (DPRH, 2015).

Los datos de precipitación reportan que las precipitaciones en la Cordillera Principal son mayores a las de la Depresión Central (DGA, 2020). Este hecho apunta a que la Cordillera podría ser la mayor área de recarga de los acuíferos. Pero los actuales modelos hidrogeológicos no consideran la posible recarga subterránea desde la zona cordillerana considerando el Frente Occidental Andino como una condición límite sin flujo (DGA, 2004). No obstante, trabajos recientes han estimado que el aporte del frente de montaña puede representar entre un 5-50% de la recarga (Markovich et al., 2019).

En la Región Metropolitana los sedimentos cuaternarios que rellenan la Depresión Central y los valles del río Maipo y río Mapocho conforman un acuífero detrítico, que en general se puede considerar de carácter libre (Araneda et al., 2019). Los recientes resultados obtenidos en la cuenca del Aconcagua revelan un modelo hidrogeológico más complejo que evidencia de manera cualitativa los aportes del frente y bloque de montaña al acuífero de la Depresión Central (Taucare et al., 2020a). Además, en otro estudio del mismo autor, se evidencia la relación que existe entre las

redes de fracturas y los manantiales estudiados a lo largo del frente de montaña (Taucare et al., 2020b).

Considerando los antecedentes expuestos, la presente tesis pretende analizar los datos disponibles para evaluar la presencia y circulación de agua subterránea en el Cajón del Maipo y su relación con el agua superficial. Se espera generar una primera aproximación del potencial hidrogeológico de los procesos de recarga y en la principal zona de suministro a la capital de Chile.

## **1.2. Hipótesis de trabajo**

La presencia de afloramientos de agua subterránea en la cordillera de Los Andes a distintas cotas sugiere una circulación subterránea del agua, por lo tanto, se plantea la hipótesis de que exista un sistema hidrogeológico en rocas fracturadas de la cordillera principal las que otorgan la permeabilidad que permite la infiltración y recarga, así como la circulación de agua en rocas fracturadas, que pueda o no estar ejerciendo recarga de a los acuíferos aluviales de la Depresión Central.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo General.**

El objetivo general de esta memoria de título es analizar las rocas fracturadas en el área de estudio y evaluar su rol en la recarga y circulación de agua subterránea. Para lograr este objetivo se usarán datos disponibles públicos que incluyen la composición química e isotópica de las aguas en los diferentes estudios realizados, así como los resultados de los estudios realizados por Alto Maipo (HIDROMAS, 2018; SRK, 2020). Además de un análisis topológico de las fracturas de la zona, asociándolas al contexto geológico estructural del área.

La prioridad es reconocer el rol hidrogeológico de las rocas fracturadas del Cajón del Maipo, cuya importancia hasta ahora no ha sido considerada omitiendo así información relevante del aporte de aguas subterráneas en zonas montañosas y fracturadas en el suministro de aguas a grandes áreas urbanas, como lo es el Gran Santiago.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

Con el motivo de lograr el objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Caracterización hidrogeológica a partir de datos hidrológicos, hidrogeológicos y climáticos disponibles en estudios e informes públicos, así como datos disponibles en las plataformas de las diferentes administraciones.
- Identificación y análisis de las redes de fallas y fracturas.
- Análisis de la conectividad para establecer las zonas con mayor potencial de recarga
- Identificación y análisis de los patrones físicoquímicos para relacionar los diferentes tipos de agua presente en la zona de estudio, y en particular aclarar el origen y las relaciones de las aguas superficiales y subterráneas

### **1.4. Ubicación y acceso**

La zona de estudio se encuentra ubicada en la Región Metropolitana de Santiago, Provincia Cordillera, en la Comuna de San José de Maipo, popularmente conocido como “Cajón del Maipo” al SE de Santiago. La zona se extiende por la Cordillera de los Andes en territorio nacional entre las latitudes 33°26’ S y 33°51’ S.

El acceso a la zona tiene dos rutas principales, la ruta G-25 o Camino Al Volcán que recorre la ribera norte del río Maipo hasta Baños Morales, pasando por las localidades de Los Peumos, San José de Maipo, San Alfonso, El Ingenio, San Gabriel, entre otras, a esta ruta se accede por la comuna de Puente Alto. También se tiene la ruta G-27 o Camino Al Toyo, que corresponde a una ruta paralela la G-25 por la ribera sur del río Maipo, la que llega hasta la localidad del Toyo y se accede por la comuna de Pirque. Dentro de la zona existen dos cruces importantes en la ruta G-25, en primer lugar, se tiene la ruta G-345 que se dirige a las localidades de Los Maitenes y El Alfalfal a lo largo del río Colorado, y en segundo lugar se tiene la ruta G-455 que se dirige al Embalse El Yeso a lo largo del río homónimo.

Las rutas mencionadas se encuentran pavimentadas, a excepción de la ruta G-455, que es de tierra, además señalar que existen múltiples caminos de ripio que permiten llegar a zonas más alejadas dentro de la zona de estudio, a su vez, aumenta la dificultad de transitarlas debido a la alta cantidad de flujos y remociones que se ocasionan durante épocas de lluvia.

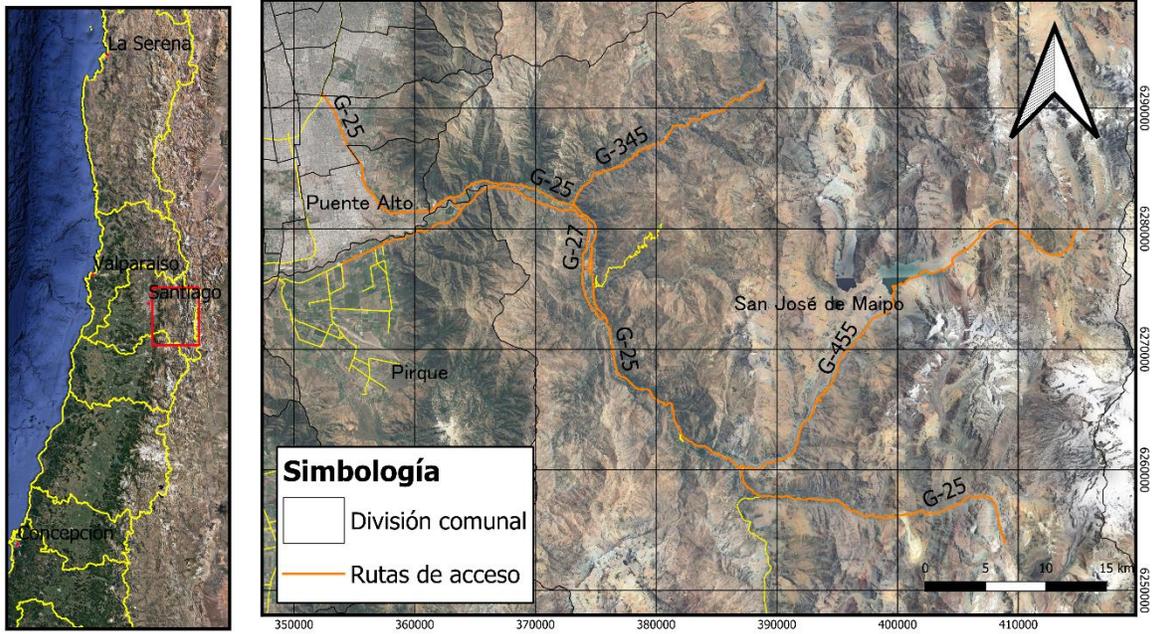


Figura 1: Ubicación y acceso de la zona de estudio.

## **2. METODOLOGÍA**

Para comenzar se hizo una recopilación bibliográfica sobre la geología de la zona, con énfasis en la geología estructural y específicamente el reconocimiento de estructuras que permitan la infiltración de aguas como lo son fallas, contactos y/o fracturas. Las muestras de aguas fueron una compilación de datos disponibles en el área de estudio. Debido a la pandemia no se pudo realizar trabajo de terreno.

### **2.1. Caracterización hidroclimática e hidrológica**

La caracterización hidrogeológica de la zona de estudio se llevó a cabo considerando el clima del lugar, específicamente los parámetros de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial, y la fisiografía, considerando el relieve del área y su red hidrográfica, examinando la escorrentía de los cauces principales, además se revisó el detalle de los derechos de aguas otorgados en la cuenca.

Los parámetros de precipitación mensual, temperatura mensual promedio y caudal medio mensual fueron recopilados del sitio web de la Dirección General de Aguas (DGA, 2020), mientras que la información de precipitación sólida se obtuvo del Observatorio de Nieve de los Andes de Argentina y Chile, estos datos fueron analizados para determinar la naturaleza de la zona, los cálculos se encuentran en el Anexo A.

Para el determinar la evapotranspiración potencial se utilizó la herramienta CAMELS-CL (Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies) (Alvarez-Garreton et al., 2018) desarrollada por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup>.

Los derechos de aguas otorgados en la cuenca alta del río Maipo fueron compiladas del sitio web de la Dirección General de Aguas (DGA, 2021), para su comprensión se realizaron cálculos detallados en el Anexo A.

### **2.2. Recopilación y análisis de datos químicos**

Los datos químicos de aguas son principalmente recolectados del informe “Estudio de Origen de Aguas” de la consultora SRK (2020), este informe se obtuvo gracias a la ley 20.285 o ley de transparencia. Estos datos corresponden a 65 muestras de aguas de distintos orígenes: 26 muestras de túneles, 6 muestras de pozos y 33 muestras superficiales, las muestras de túneles corresponden a afloramientos de agua que han aparecido en el proyecto hidroeléctrico Alto Maipo. Todas estas muestras tienen un análisis de parámetros fisicoquímicos, elementos mayores, elementos menores y trazas, isotópico, y para el caso de las muestras de túneles, análisis de tritio. El análisis hidroquímico (parámetros fisicoquímicos y química) fue realizado en el Laboratorio de SGS de Canadá, mientras que el análisis isotópico fue realizado en la Universidad de Arizona (EE.UU.).

Estos datos fueron sometidos a un QA/QC para verificar su veracidad, el que se encuentra en el Anexo C.

Además, se recopilaron algunos datos de estudios académicos realizados en la zona de estudio, siendo principalmente muestras de agua termal de los trabajos de Pincetti (2016), Benavente (2015), Bustamante et al. (2010) y Risacher y Hauser (2008), sumando 16 muestras con datos de elementos mayores. El recuento de los datos recopilados se encuentra en el Anexo B.

Una vez recopilados los datos químicos, en primera instancia se graficó la relación entre la conductividad eléctrica de las muestras con su cota y su profundidad, luego con los diagramas de Piper y diagramas de Stiff georreferenciados se categorizaron los tipos de aguas presentes en el área de estudio y se identificó similitudes y diferencias entre estas. Siguiendo con los isótopos estables  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$ , se graficaron junto a las Líneas de Agua Meteorológica Local y Global para reconocer alguna similitud entre el fraccionamiento isotópico de las muestras de aguas, también se graficó la relación entre  $\delta^{18}O$  y la altitud para distinguir la altura a la que fueron precipitadas estas muestras. Finalmente, con datos del isótopo radiactivo tritio de la zona y de estaciones cercanas de la Red Global de Isótopos en Precipitación (GNL) de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) y la Organización Meteorológica Mundial (WMO) se logró otorgarles edades aproximadas a las muestras de agua de los túneles. Con todo esto fue posible determinar el tipo de aguas y patrones de evolución de las aguas.

### **2.3. Mapeo y análisis de lineamientos**

Para el mapeo remoto de lineamientos se utilizó en primer lugar un raster de mosaico formado con varias imágenes satelitales descargadas del software SAS.Planet con una resolución espacial de 1,99 metros/píxel, en segundo lugar se usó un Modelo de Elevación Digital (DEM) del dataset ALOS PALSAR del año 2011, producto ofrecido por Alaska Satellite Facility, con una resolución de 12,5 metros/píxel, a partir de este raster se utilizaron las herramientas “hillshade” y “slope” de QGIS para tener una mejor visualización del terreno.

Los aspectos que se tomaron en cuenta para mapear los lineamientos morfoestructurales fueron: quebradas, valles o cuchillas alineadas, cambios de pendientes, escarpes importantes, cambios de color y discontinuidades evidentes de algún tipo, además de estructuras descritas previamente en la literatura de la zona.

El análisis de la red de lineamientos fue procesado por la herramienta NetworkGT desarrollada por Nyberg et al. (2018) para Sistemas de Información Geográfica (SIG), esta se basa en los componentes topológicos nodos y ramas (Jing y Stephansson, 1997; Sanderson y Nixon, 2015, 2018), un nodo corresponde a un punto donde termina una línea o donde se cruza con otra, dependiendo de esto, puede ser un nodo aislado (nodo I) o nodo de conexión (nodo Y o X) (Figura 1). Una rama es una línea delimitada por un nodo, dependiendo del nodo que la delimite se clasificaron en tres tipos: rama aislada (I-I), rama parcialmente conectada (C-I) o rama completamente conectada (C-C) (Figura 2).

Una vez ya terminada la red de lineamientos, se determinó sus direcciones preferentes, representado en un diagrama de rosas. Luego, a partir de los componentes topológicos nodos y ramas se generaron tres mapas sobre una grilla de 74 x 90 km<sup>2</sup> con celdas de 2 x 2 km<sup>2</sup>: i) mapa con número de nodos (nodos I, Y y X), ii) mapa con número de conexiones (nodos Y y X), y iii) mapa con intensidad de fracturas (km/km<sup>2</sup>). Cada celda tiene un área de detección correspondiente a una circunferencia de radio 5 km. a partir del centro de la celda.

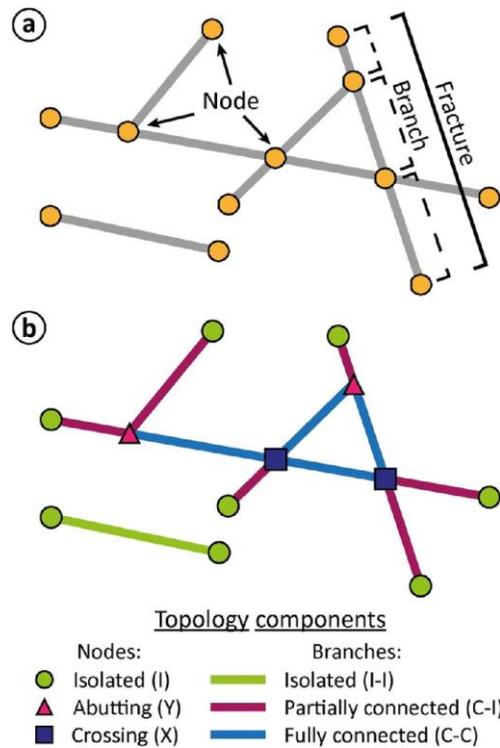


Figura 2: Nomenclatura topológica para la caracterización de redes de fracturas según Sanderson y Nixon (2015). a) Mapa de una red de fracturas, y b) su caracterización topológica. Tomado de Taucare et al. (2020b).

## 3. MARCO GEOLÓGICO

### 3.1. Geología regional

El territorio de Chile se extiende por más de 4000 kilómetros en una disposición Norte a Sur principalmente, entre los 18°S y 55°S aproximadamente, teniendo como límite occidental el océano Pacífico y como límite oriental las altas cumbres que dividen al país de Argentina, Bolivia y Perú.

La Cordillera de Los Andes, principal rasgo geográfico de Chile es el resultado de un margen tectónico convergente, el país se encuentra en el extremo suroccidental de la placa continental Sudamericana la que converge y se desplaza por sobre las placas oceánicas de Nazca y Antártica. Según las características de la subducción varía el volcanismo, la sismicidad y las estructuras geológicas.

A lo largo del margen, a partir del estudio de hipocentros de terremotos, se descubrió que la convergencia presenta cambios en la zona de Wadati-Benioff, segmentando tectónicamente el territorio chileno en tres: desde los 15°S hasta los 27°S hay una subducción normal, con un ángulo de subducción entre los 25° a 30°; entre los 27°S y 33°S existe una subducción plana, con un ángulo de subducción cercano a los 10° y sin volcanismo; y finalmente al sur de los 33°S nuevamente con subducción normal (Barazangi & Isacks, 1976). La zona de estudio se encuentra al sur de los 33°S en la denominada zona de transición, en donde el ángulo de subducción comienza a normalizarse y a generar volcanismo.

En particular, la zona de estudio se encuentra entre los 33°S y 34°S, en una de las cinco unidades morfoestructurales, la Cordillera Principal, estas unidades se distribuyen en franjas orientadas en N-S, de occidente a oriente son: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera Principal, Cordillera Frontal, Precordillera y Antepaís (Figura 3). La Cordillera Principal es posible dividirla en su flanco oriental y en flanco occidental.

La Cordillera de la Costa está constituida principalmente por granitoides Paleozoico Superior en su flanco occidental, mientras que su flanco oriental está compuesto por secuencias volcánicas y sedimentarias Mesozoicas (Wall et al., 1999; Sellés y Gana, 2001; SERNAGEOMIN, 2003). La Depresión Central corresponde a una cuenca rellena por depósitos fluviales y aluviales que en algunos puntos llegan a los 500 metros de espesor (Thiele, 1980; Araneda et al., 2000; Yáñez et al., 2015). La Cordillera Principal, la que se puede dividir en dos flancos, la Cordillera Principal Occidental, que se compone por rocas cenozoicas, como lo son las Formaciones Farellones y Abanico, y la Cordillera Principal Oriental, formada por rocas mesozoicas con alta deformación. Finalmente, la Cordillera Frontal constituye un basamento Pre-Cámbrico, Paleozoico y Triásico, mientras que la Precordillera está compuesta por rocas del Paleozoico Inferior principalmente (Fock, 2005).

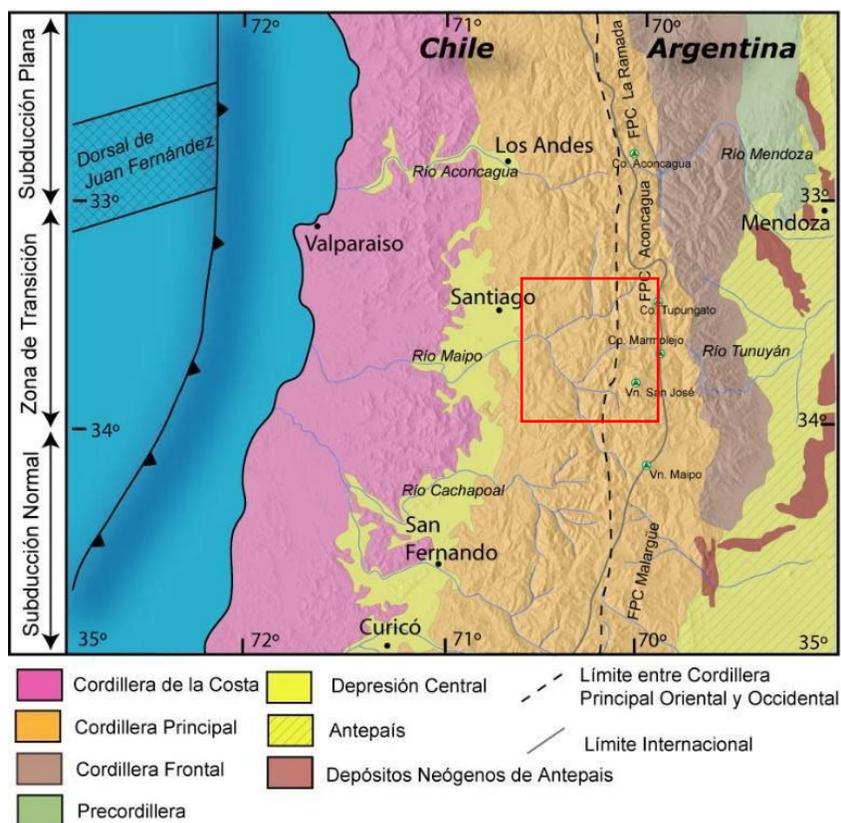


Figura 3: Morfoestructuras entre los 32° y 35° S. El recuadro rojo indica el área de estudio. Basado en Charrier y Muñoz (1994), Giambiagi et al. (2001), Giambiagi et al. (2003a) y Tassara y Yáñez (2003). Tomado de Fock (2005).

## 3.2. Geología local

### 3.2.1. Rocas estratificadas

- Formación Nieves Negras (Batoniano – Caloviano)

Definida por Álvarez et al. 1997, 2000 en la naciente del río Colina en el límite territorial chileno-argentino. Posee afloramientos discontinuos en una franja de orientación NNW, entre los esteros Caballo y Yeguas Muertas (Bustamante et al., 2010), y constituye el núcleo del anticlinal de Yeguas Muertas (Giambiagi et al., 2001). Corresponde a una secuencia de areniscas finas a medias con intercalaciones de pelitas negras, limolitas y brechas subordinadas en su base, hacia su techo se encuentra una serie rítmica de areniscas gruesas y niveles delgadas de limolita (Álvarez et al., 1997; Charrier et al., 2002a). Su base es desconocida y subyace en concordancia a la Formación Río Colina, su potencia máxima estimada es de 400 metros. A partir de registro fósil se le asigna una

edad Batoniano – Caloviano temprano (Álvarez et al., 1997; Charrier et al., 2002) y está correlacionada con el miembro Santa Elena de la Formación Nacientes del Teno (Klohn, 1960, Davidson, 1971) y las Formaciones Las Lajas, Los Molles y Tres Esquinas en Argentina (Charrier et al., 2002b).

- Formación Río Colina (González, 1963, Caloviano – Oxfordiano)

Fue definida por González (1963) en el valle del río Colina como un conjunto de sedimentitas clásticas marinas, fosilíferas, con intercalaciones de potentes lentes de evaporitas” (Thiele, 1980). Aflora en la parte oriental de la Cordillera Principal como complejos macizos de evaporitas en forma discontinua, ligados a fallas. Su litología está compuesta principalmente por calizas y lutitas calcáreas oscuras, lutitas finamente estratificadas, areniscas, conglomerados finos e intercalaciones de andesitas. También se tienen intercalaciones de potentes lentes de evaporitas de yeso (González, 1963, Thiele, 1980). Su base es aparentemente concordante con la Formación Nieves Negras (Álvarez et al., 1997) y subyace de manera concordante a la Formación Río Damas, su espesor visible no supera los 800 m (Thiele, 1980). A partir de fósiles encontrados se le asigna una edad Caloviano – Oxfordiano y se correlaciona con las Formaciones Tábanos, Lotena, La Manga y Auquilco en Argentina (Thiele, 1980; Álvarez et al., 1997).

- Formación Río Damas (Klohn, 1960, Kimmeridgiana)

Fue definida por Klohn (1960) en el valle del río Damas en la provincia de Colchagua, como un “complejo de sedimentos clásticos finos y gruesos, y de esporádicos sedimentos químicos” (Thiele, 1980). Se distribuye a lo largo de dos franjas subparalelas de dirección norte, una en territorio chileno, desde la cabecera del río Maipo hasta más al norte del río Colorado. La otra franja se extiende en territorio argentino, además existen afloramientos discontinuos y de menor extensión entre ambas franjas. Está compuesta por una sucesión conglomerados y brechas conglomeradicas, gruesas a medianas, de colores rojizos y verdosos, con intercalaciones potentes de areniscas y limolitas de colores púrpura a marrón, existen intercalaciones abundantes de rocas volcánicas andesíticas y se reconocen pequeños lentes de yeso (Thiele, 1980). Su base es concordante con la Formación Río Colina, al igual que su techo correspondiente a la Formación Lo Valdés, su potencia aproximada es de 3000 m (Thiele, 1980). Se le asigna una edad kimmeridgiana al considerar las dataciones de las formaciones adyacentes y se correlaciona con el miembro superior de la Formación Lagunillas (Thiele, 1980). En Argentina, la unidad es correlacionable con la Formación Tordillo, asignada al Kimmeridgiano (Thiele, 1980; Sruoga et al., 2000; Giambiagi, 2003). Esta formación corresponde a depósitos formados esencialmente en ambiente terrestre, subaéreo y lacustre (Thiele, 1980).

- Formación Lo Valdés (González, 1963, Tithoniano-Hauteriviano)

Fue definida por González (1963) en el lugar homónimo en el valle del río El Volcán, como un “conjunto sedimentario fosilífero, constituido por tres miembros, de los cuales el intermedio se compone por sedimentos clásticos” (Thiele, 1980), luego, Salazar y Stinnesbeck (2015) definieron

los 3 miembros de base a techo como Miembro Escalador, Miembro Placa Roja y Miembro Cantera. Se presenta en franjas continuas de dirección norte-sur en la zona fronteriza con Argentina, se extiende desde el sur del río Volcán hasta más al norte del río Colorado, a partir de allí se desarrolla en territorio argentino. Corresponde a una secuencia sedimentaria de calizas, calcilitas, lutitas y areniscas calcáreas, conglomerados y brechas. Se intercalan rocas volcánicas andesíticas. Además, presenta pequeñas capas lenticulares de yeso (Thiele, 1980). Su base es concordante con la Formación Río Damas y el techo también lo es con la Formación Colimapu, su potencia estimada es de 1350 metros (Thiele, 1980). Mediante registro fósil se le asigna una edad Tithoniano-Hauteriviano (Thiele, 1980) y se correlaciona con la Formación San José hacia el norte, de edad valanginiana, con la Formación Termas del Flaco hacia el sur, de edad titoniana superior a hauteriviana, y con el Grupo Mendoza en Argentina (Thiele, 1980). La Formación Lo Valdés se asocia a un ambiente marino profundo, transicional a un ambiente costero (Mardones, 2019).

- Formación Colimapu (Klohn, 1960, Hauteriviano - Albiano)

Fue definida por Klohn (1960) en la quebrada homónima, afluente del río Maipo, como un “conjunto sedimentario de origen terrestre” (Thiele, 1980). Se encuentra a lo largo de una franja de dirección norte, desde el sur del río Volcán hasta más al norte del río Colorado. Está conformado por una serie de capas lateralmente discontinuas de una sucesión de areniscas y lutitas rojas, conglomerados de matriz arenosa gris rojiza, lutitas rojas con niveles de rocas piroclásticas y algunas lavas andesíticas y calizas (Thiele, 1980). Su base es concordante con la Formación Lo Valdés, mientras que su contacto con la suprayacente Formación Abanico ha sido descrito como concordante (Thiele, 1980), sin embargo, también ha sido descrito como un contacto discordante (Charrier et al., 1996; Charrier et al., 2002), es por lo que este contacto podría interpretarse como una superficie de erosión, sumado al lapso temporal con la unidad suprayacente (Thiele, 1980), su potencia máxima estimada es de 2000 metros (Thiele, 1980). Martínez y Osorio (1963) le otorgan una edad mínima albiana a partir del registro fósil de carofitas, y su edad máxima sería hauteriviana, de acuerdo con la edad asignada a la Formación Lo Valdés que la infrayace (Thiele, 1980). Se correlaciona con la Formación Cristo Redentor en el valle del río Aconcagua (Aguirre, 1960).

### **3.2.2. Unidades volcánicas**

- Formación Abanico (Aguirre, 1960, Eoceno Superior–Mioceno)

Definida por Aguirre (1960) en la provincia de Aconcagua como “una secuencia de vulcanitas y sedimentitas clásticas terrígenas de colores predominantes gris pardo y púrpura rojo grisáceo” (Thiele, 1980). Su distribución es amplia en la zona y se dispone en dos franjas norte-sur separadas por los aforamientos de la Formación Farellones. Está formada por una secuencia de tobas y brechas volcánicas con intercalaciones de lavas y sedimentitas clásticas. Las brechas volcánicas gruesas contienen clastos de 5 a 15 cm de andesitas porfíricas y afaníticas. Las lavas son andesíticas y riolíticas. En su parte superior se encuentran sedimentitas clásticas, areniscas de grano medio a fino, lutitas y limos finamente estratificados con flora fósil y restos carbonosos, estos niveles se

asocian a un ambiente lacustre (Thiele, 1980). Se encuentra sobre la Formación Colimapu a través de fallas y su techo se muestra en contacto transicional con la Formación Farellones variando entre discordante, pseudo-concordante y concordante (Charrier et al., 2002), su potencia aproximada es de 3000 metros (Thiele, 1980). Mediante dataciones radiométricas (Fock, 2005; Gana y Wall, 1997; Charrier et al., 1996; Kay et al., 1995) y estudios de fauna fósil (Wyss et al., 1990, 1994) se entregaron edades eocena superior – mioceno. La Formación Abanico es correlacionable con la Formación Coya – Machalí definida por Klohn (1960) (Thiele, 1980) hacia el sur y en Argentina es equivalente temporal a la Formación Molle, que aflora más al sur (Oligoceno Superior) (Sruoga et al., 2000).

- Formación Farellones (Mioceno inferior-medio)

Fue definida por Klohn (1960) como “una potente unidad constituida por sedimentitas clásticas terrígenas, lavas andesíticas, riolíticas y basálticas y rocas piroclásticas que alternan con sedimentos derivados de la descomposición de estas rocas efusivas” (Thiele, 1980). Aflora en una franja nortesur en capas evidentemente estratificadas y poco deformadas, con una posición subhorizontal. Corresponde a una sucesión compuesta por lavas andesítica, riolíticas y basálticas y rocas piroclásticas, tobas e ignimbritas, con intercalaciones de brechas. Las lavas tienen un predominio sobre las tobas y brechas, además existen intercalaciones de rocas volcanoclásticas más finas que producen una marcada estratificación, permitiendo su clara identificación (Thiele, 1980). Sobreyace a la Formación Abanico de manera concordante, pseudoconcordante y discordante, mientras que subyace a la Formación Colorado - La Parva discordantemente y en algunas partes corresponde a la superficie actual como es el caso de la zona de estudio, su espesor estimado es de 2500 metros (Thiele, 1980). De acuerdo con las dataciones radiométricas (Charrier & Munizaga, 1979; Munizaga y Vicente, 1982; Vergara et al., 1988; Fock, 2005), a la Formación Farellones se le asigna una edad miocena. Se correlaciona cronológicamente en Argentina con las formaciones Palaoco, Contreras, Conglomerados de Tunuyán y Agua de la Piedra (Sruoga et al., 2000; Giambiagi et al., 2001).

- Unidad Volcánica Antigua (Thiele y Katsui, 1969)

Corresponde a los esqueletos de volcanes extinguidos formados principalmente por coladas andesíticas y traquiandesíticas de colores rojizos y amarillentos, constituye las zonas más altas de la Cordillera Principal. La unidad se encuentra por sobre las estructuras de pliegues y fallas de la zona y no se ve afectada por fallas de carácter regional (Thiele, 1980). Se encuentra evidentemente erosionada por la acción glacial de la zona. Se le asigna una edad Pleistocena (Thiele, 1980).

- Unidad Volcánica Nueva o Volcanismo Reciente (Thiele y Katsui, 1969)

En esta unidad se designan los volcanes con registro histórico de actividad y están sobre la Unidad Volcánica Antigua, destacan el Volcán Tupungatito o el Volcán San José (Thiele y Katsui, 1969; Thiele, 1980). Son principalmente coladas andesíticas frescas, con intercalaciones de brechas y piroclastos predominantemente oscuros, además se sobrepone a la Unidad Volcánica Antigua. Se le asigna una edad Holocena (Thiele, 1980).

### **3.2.3. Unidades intrusivas**

El plutonismo de la zona es interpretado por Thiele (1980) como un proceso continuo, durante un periodo prolongado, con una polaridad relativa en el enfriamiento de los distintos plutones, teniendo a los más jóvenes hacia el oriente. Se agruparon dos unidades en base a sus características petrográficas y estructurales.

- **Unidad Intrusiva I**

Corresponden a los intrusivos de mayor tamaño que además intruyen hasta la Formación Farellones. Litológicamente corresponden a granodiorita, monzogranito y monzonita cuarcífera (Thiele, 1980), entre ellos se encuentran Intrusivo La Obra, Disputada, San Gabriel, La Gloria y Colina. Se le asigna una edad miocena por mediciones radiométricas K/Ar (Thiele, 1980).

- **Unidad Intrusiva II**

Esta unidad representa a intrusivos de menor tamaño que los de la Unidad Intrusiva I, incluyendo stocks, lacolitos, filones-manto y diques que cortan hasta la Formación Farellones. Están compuestos principalmente por microgranodioritas, pórfidos dioríticos, dacitas y andesitas con variaciones texturales (Thiele, 1980). Se le asigna una edad Eoceno Superior-Mioceno Inferior (Fock, 2005)

### **3.2.4. Depósitos no consolidados**

- **Depósitos Fluviales, Glacio-fluviales, aluviales**

Están caracterizados por material de variado calibre, con tamaños de bloques, gravas, arenas, limos y arcillas, con petrografía correspondiente a las distintas unidades litológicas presentes en la zona. Se encuentran principalmente rellenando los valles de la zona, sobresaliendo aquellos que forman niveles de terrazas a lo largo del río Maipo (Thiele, 1980).

- **Depósitos Lacustres**

Corresponden a depósitos de dimensiones reducidas finamente laminados compuesto por limos y arcillas, producto de la acumulación en lagos formados por morrenas frontales o por desmoronamiento en los valles de los ríos Colina, Colorado, Maipo y Yeso (Thiele, 1980).

- Depósitos Gravitacionales

Abarcan prácticamente toda el área de estudio, siendo de mayor importancia aquellos productos de la reptación del suelo y talud, los que producen importantes acumulaciones detríticas en la base de las pendientes, aumentando la dominancia los de talud a medida que se asciende por los valles al aumentar las pendientes (Thiele, 1980).

- Depósitos Glaciales

Se ubican principalmente en las cabeceras de las quebradas sobre los 2.500 m.s.n.m., corresponden a morrenas marginales y acumulaciones de detritos provenientes de glaciares de roca, en circo glaciares en altas cumbres. También existen morrenas terminales y de retroceso en los valles de los ríos Colorado, Yeso, Volcán y esteros afluentes (Thiele, 1980).

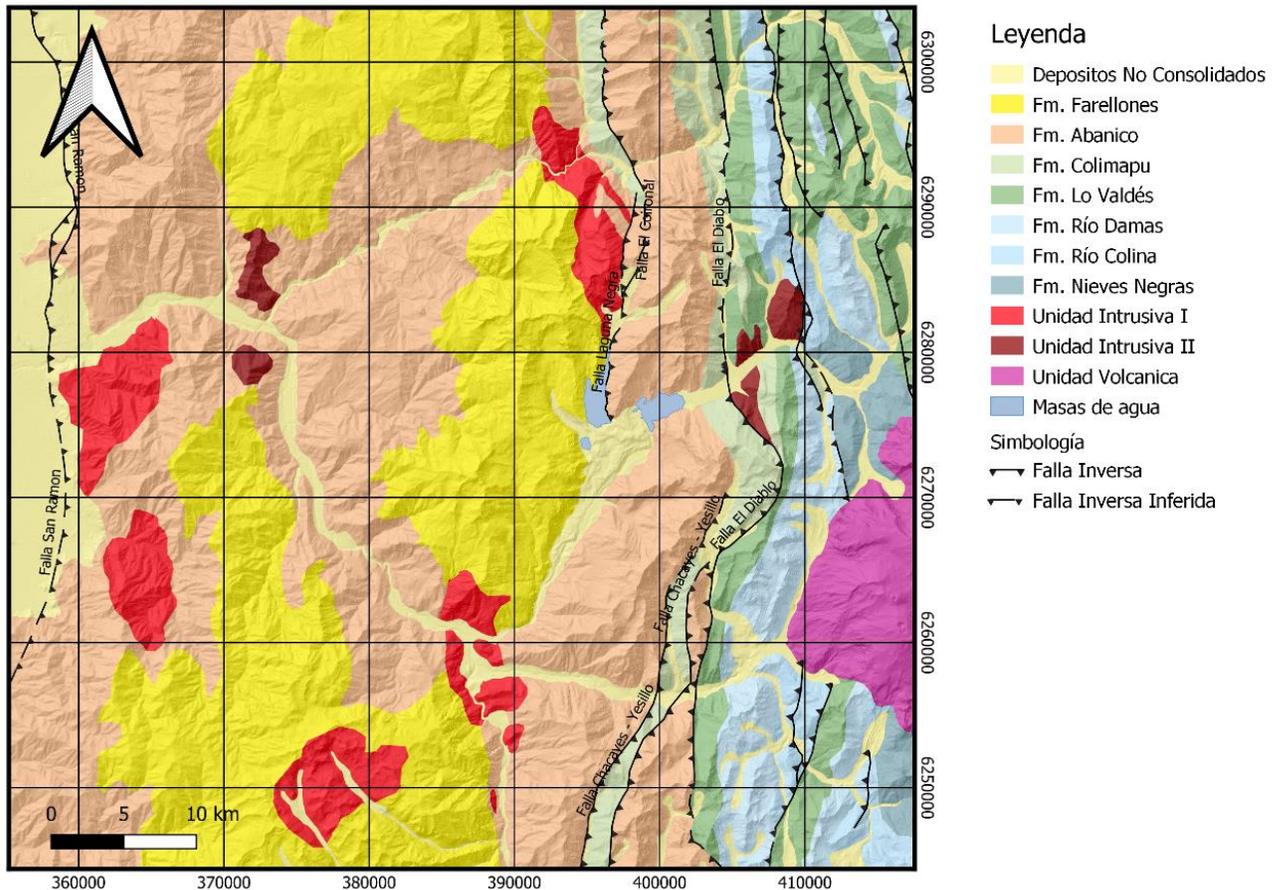


Figura 4: Mapa geológico de la zona de estudio. Basado en Thiele (1980), Aguirre (1999), Gana et al. (1999), Giambiagi (2000), Giambiagi et al. (2001), Bustamante (2001), Sellés y Gana (2001), Giambiagi y Ramos (2002), SERNAGEOMIN (2003), Fock (2005), Armijo et al. (2010), SEGEMAR (2010), Riesner et al. (2017, 2018).

### 3.3. Geología estructural

La zona de estudio presenta una compleja evolución estructural, es posible separar su control estructural en dos dominios: la Cuenca de Abanico y la Faja Plegada y Corrida del Aconcagua. En general, las estructuras mayores tienen un rumbo aproximadamente norte-sur, pero con grandes variaciones en la deformación y la vergencia (Figura 5 y 6).

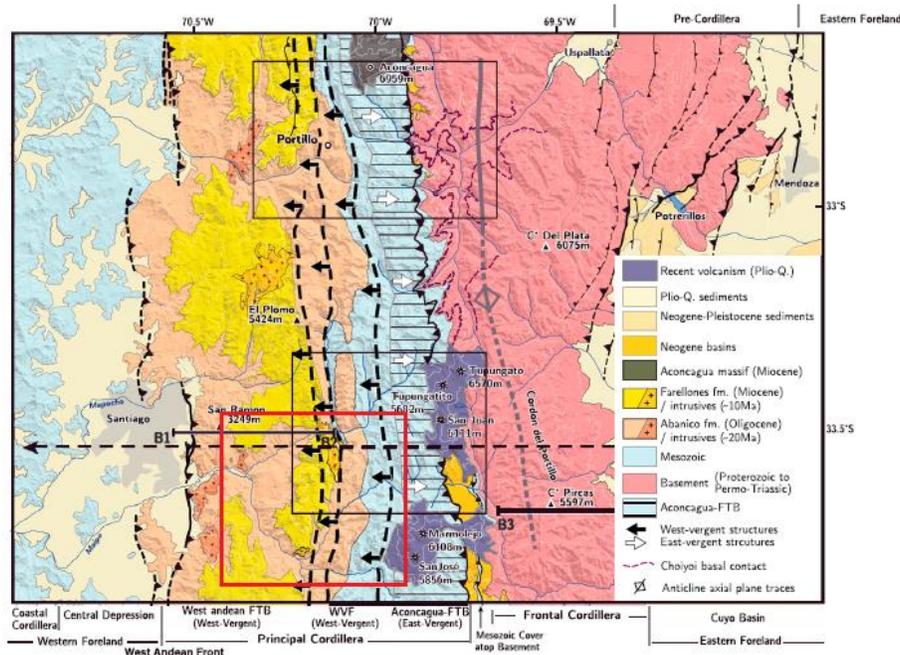


Figura 5: Mapa estructural de los Andes (Polanski, 1964, 1972; Thiele, 1980; Rivano et al., 1993; Gana et al., 1999; SEGEMAR, 2000, 2010; Giambiagi et al., 2001; Giambiagi & Ramos 2002; SERNAGEOMIN, 2003; Fock, 2005; Armijo et al., 2010; Riesner et al., 2017). El recuadro rojo indica el área de estudio, WVF indica pliegues con vergencia oeste, FTB indica Faja Plegada y Corrida. Tomado de Riesner et al. (2018).

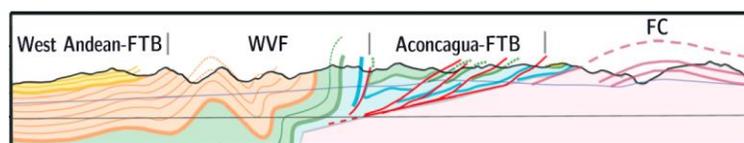


Figura 6: Sección transversal de la Cordillera Principal a 33,5°S. WVF indica pliegues con vergencia oeste, FTB indica Faja Plegada y Corrida, FC indica Cordillera Frontal. Tomado de Riesner et al. (2018).

La Cuenca de Abanico es interpretado como un sistema de cuencas extensionales invertido con orientación N-S a NNE-SSW (Godoy et al., 1999; Charrier et al., 2002; Giambiagi et al., 2003b; Charrier et al., 2005; Fock et al., 2006; Farías et al., 2010). La deformación de este dominio afecta principalmente a la Formación Abanico, las estructuras que la afectan en su mayoría son cabalgamientos de alto ángulo, con vergencia este y oeste, pliegues que varían amplitud y longitud de onda, teniendo espesores de los flancos muy variables como consecuencia (Godoy et al., 1999; Charrier et al., 2002, 2005; Fock et al., 2006).

La Faja Plegada y Corrida del Aconcagua es descrito con un estilo de deformación híbrido, de piel fina en su zona externa donde el desplazamiento llega hasta la cobertura sedimentaria, y de piel gruesa en su parte interna, involucrando bloques de basamento pre-Jurásico (Giambiagi y Ramos, 2002). Presenta una deformación controlada principalmente por sistemas de fallas inversas de alto ángulo, producto de un régimen de inversión de fallas extensionales (Giambiagi et al., 2003), de orientación NS a NNW con vergencia este y retrocorrimientos al oeste.

Además, la zona se encuentra en los límites de una estructura de margen-transversal más grande, la zona de deformación del Maipo (Figura 7), una discontinuidad a escala continental que atraviesa todo el margen continental chileno y ha estado activa al menos desde el Jurásico y está asociada a la dorsal de Juan Fernández (Yáñez et al., 2002; Piquer et al., 2001). Como resultado de la intercepción de esta gran estructura con el arco volcánico se encuentra el llamado Sistema de Fallas Piuquencillo, un sistema de falla a escala litosférica, que controló fuertemente la deformación y el flujo de magmas y fluidos hidrotermales durante el Neógeno (Piquer et al., 2021). La zona de estudio es encuentra próxima es estas estructuras que se manifiestan con fallas de dirección NW y NE (Piquer et al., 2021).

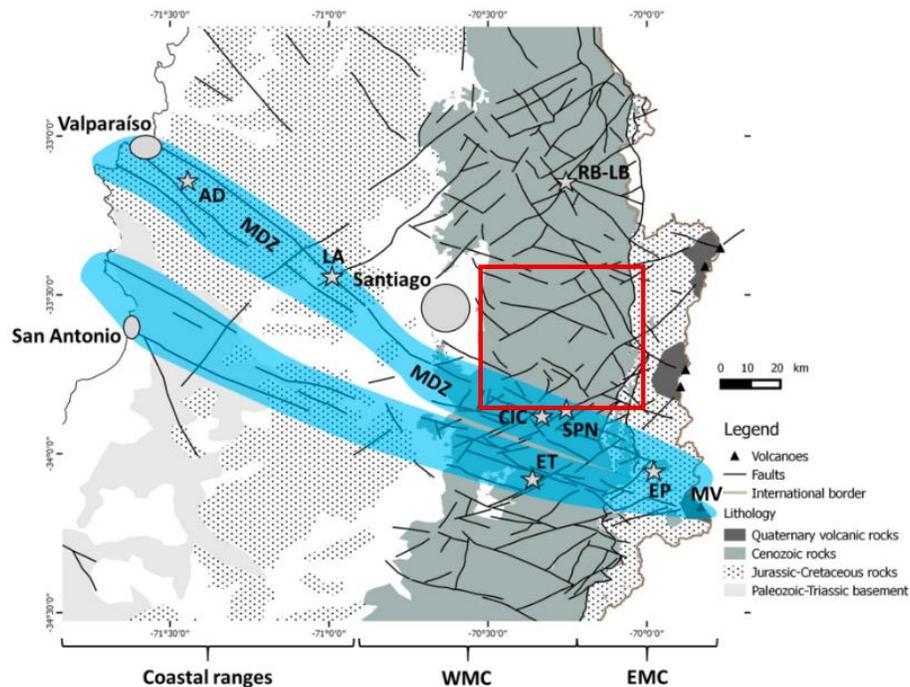


Figura 7: Zona de deformación del Maipo (MDZ) resaltada en azul y zona de estudio en recuadro rojo. La geología de fondo es de SERNAGEOMIN (2002); fallas en el oeste Cordillera principal son de Piquer et al. (2016). RB-LB: Río Blanco – Los Bronces; ET: El Teniente; EP: Prospecto Escalones; SPN: vetas San Pedro de Nolasco; CIC: complejo intrusivo de Carlota; LA: Depósito ligado a los estratos de Lo Aguirre; AD: distrito de Antena de vetas de Au orogénicas; MV: volcán Maipo; WMC: Cordillera principal occidental; EMC: Cordillera Principal oriental. Tomado de Piquer et al. (2021).

Algunas de las estructuras más destacables de la zona son:

- Falla San Ramon

Se extiende por 30 km a lo largo del frente occidental de los Andes frente a la ciudad de Santiago (Yáñez et al., 2020). Es una falla inversa con vergencia oeste, corresponde al límite occidental de un sistema de pliegue de propagación (Armijo et al., 2010). Se ha estimado mediante métodos geofísicos que la Falla de San Ramon ha absorbido entre el 5% al 20% de todo el acortamiento de los Andes los últimos 4 Ma (Yáñez et al., 2020)

- Falla Laguna Negra

Corresponde a una falla inversa de vergencia oeste, llega a cortar la Formación Abanico y a filones manto asociado al Plutón La Gloria (9,8 Ma; Cornejo y Mahood, 1997). Además, se puede relacionar con los retrocorrimiento de la Falla El Diablo en el valle del Río Volcán (Fock, 2005). También es responsable de grandes deslizamientos a lo largo del río Yeso.

- Falla Chacayes-Yesillo

Es una falla inversa de alto ángulo con vergencia oeste, con un manteo aproximado de 80° E y con un rumbo de N20°E (Fock, 2005). Esta estructura pondría en contacto las limolitas y areniscas rojas de la Formación Colimapu con las lavas andesíticas de la base de la Formación Abanico (Bustamante, 2001), además tendría un movimiento horizontal transcurrente, lo que de otorga una componente dextral (Bustamante, 2001).

- Falla El Diablo

Corresponde a una falla inversa y vergencia al este, con un rumbo de N20°E y manteo de 80°W (Fock, 2005). Además, pone en contacto las calizas basales de la Formación Abanico con el Intrusivo Valle del Morado (Mardones, 2016)

- Falla Baños Colina

Descrita por Mardones (2016) como una falla inferida ubicada en el Valle de río Colina, es una falla inversa con vergencia al este, con rumbo NNE-SSW y manteo ~ 90°. Repite las secuencias de las formaciones Lo Valdés, Río Damas y Río Colina.

- Falla Punta Zanzi

Descrita por Mardones (2016) como una falla de inflexión inferida ubicada en Punta Zanzi, corresponde a una falla inversa de vergencia este, posee rumbo aproximadamente N-S y manteo ~ 90°. Repite las secuencias de la Formación Río Damas.

- Falla Estero Las Minas

Corresponde a uno de los últimos corrimientos con vergencia este que forma la Faja Plegada y Corrida de Aconcagua, de oeste a este. Se trata de una falla inversa inferida, de vergencia este, con rumbo N-S y una inclinación ~75° al oeste. Deja en contacto a las formaciones Río Damas-Río Colina sobre la Formación Lo Valdés (Mardones, 2016).

## 4. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

### 4.1. Descripción general de la cuenca

El área de estudio se encuentra dentro de la subcuenca Río Maipo Alto, que es la más cordillerana de la cuenca del Río Maipo. Nace en las altas cumbres de la Cordillera de los Andes, límite con Argentina, hasta la localidad del Manzano donde drena un área de 4.858 km<sup>2</sup>. Sus cauces principales son: río Maipo, río Colorado, río Olivares, río Yeso y río Volcán. Según las delimitaciones de la cuenca, esta se divide en otras ocho sub-subcuencas, detalladas en la Tabla 1. Las divisiones se pueden ver en la Figura 8, que además contiene la red hidrográfica y algunos cuerpos de agua.

Este lugar se caracteriza por contener las reservas de agua de la Región Metropolitana, existen 768 glaciares (GEOESTUDIOS LTDA, 2011), además de 3 importantes cuerpos de agua, Laguna Negra, Laguna del Encañado y el Embalse el Yeso y varios otros de menor volumen. También es posible encontrar fuentes termales hacia el límite oriental, como: Baños Morales, Baños Colina, Baños Azules, Baños Tupungato y las Termas del Plomo.

Dentro del área de estudio existen varias estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA), de las que se han seleccionado cinco de ellas debido a su continuidad de registro y por su posición que permite monitorear los caudales de subcuencas al ubicarse en su salida, a partir de estos datos se desligó el análisis del capítulo 4.4 de Escorrentía.

Tabla 1: División hidrográfica de cuenca Río Maipo Alto.

Cuenca / Código	Subcuenca / Código	Código sub-subcuenca	Nombre sub-subcuenca	Área drenaje [km <sup>2</sup> ]
Río Maipo / 057	Río Maipo Alto / 0570	05700	Río Maipo bajo junta Río Negro	768
		05701	Río Maipo entre Río Negro y Río Volcán	737
		05702	Río Volcán	523
		05703	Río Yeso	627
		05704	Río Maipo entre Río Volcán y Río Colorado	533
		05705	Río Colorado antes junta Río Olivares	789
		05706	Río Olivares	543
		05707	Río Colorado entre Río Olivares y Río Maipo	338

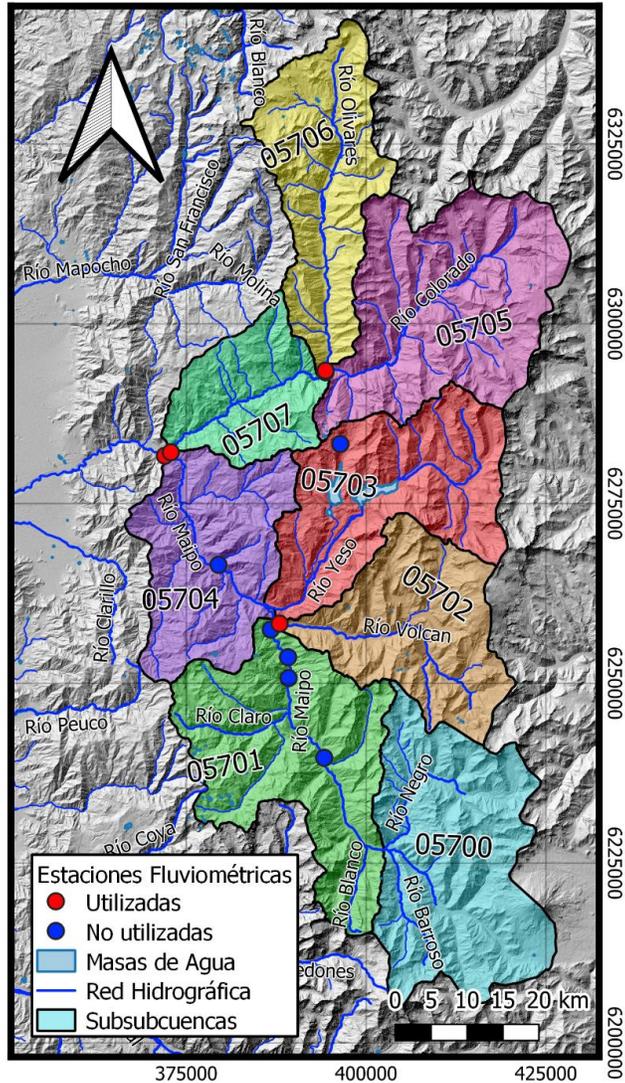


Figura 8: División hidrográfica de la subcuenca Río Maipo Alto, además de estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas. Datos obtenidos de DGA (2020).

## 4.2. Relieve

Las características geomorfológicas del área de estudio son las típicas de una zona del contexto cordillerano, que destaca por sus altas cumbres rocosas, volcanes, glaciares, valles glacio-fluviales y grandes remociones en masa. La zona está modelada por varios afluentes del río Maipo, los que han formado grandes valles que les otorgan un alta pendiente a las laderas de los cerros, generando una morfodinámica activa, responsable de depósitos coluviales, terrazas fluviales y remociones en masa.

Hacia las zonas de mayor altura se tiene una influencia principalmente glacial en el modelamiento de la topografía, mientras que más hacia el poniente la influencia es mayormente fluvial.

En la zona oriente los valles son del tipo glacio-fluvial, con una geometría característica en forma de “U”, junto a ellos se tienen laderas de altas pendientes con depósitos coluviales y fluviales en su base. Además de morfologías glaciales como morrenas, circos glaciales y horst. Hacia la zona poniente los valles pasan a ser principalmente fluviales, con su geometría en forma de “V”, disminuyendo la pendiente de las laderas y con aumento de terrazas fluviales.

La Cordillera de los Andes en esta latitud se caracteriza por la reactivación del volcanismo, dando comienzo a la Zona Volcánica Sur (ZVS), con los volcanes Tupungato (6.570 m.s.n.m.), Tupungatito (5.660 m.s.n.m.) y San José (6.070 m.s.n.m.). A estos se suman otras grandes cumbres que destacan, como lo son los cerros Marmolejo (6.100 m.s.n.m.), Alto San Juan (6.111 m.s.n.m.), Pirámide (5.484 m.s.n.m.), Loma Larga (5.380 m.s.n.m.) y Mesón Alto (5.253 m.s.n.m.).

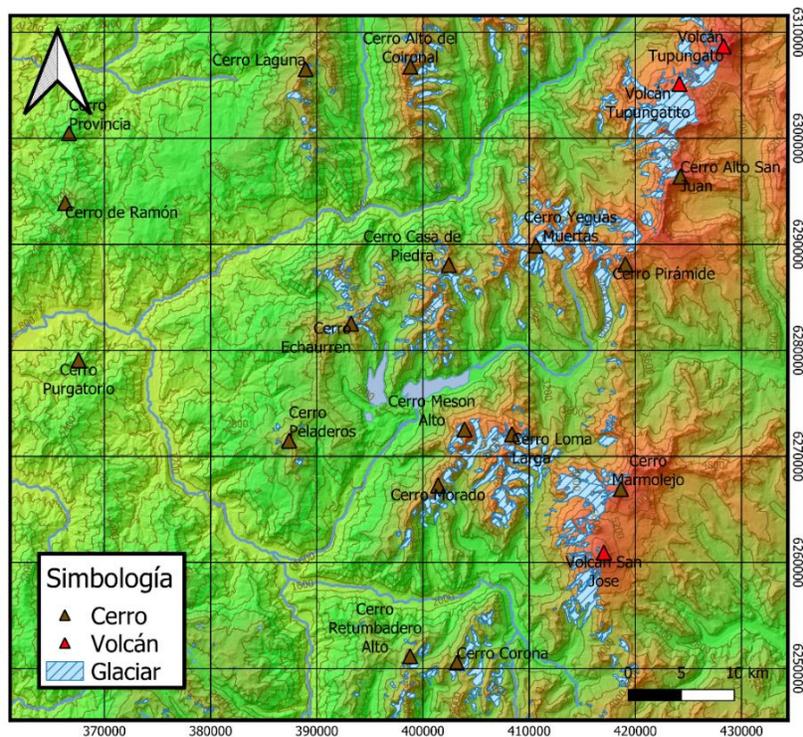


Figura 9: Principales cumbres, glaciares y cauces de la zona de estudio. Mapeo de glaciares obtenido de Infraestructura de Datos Geospaciales (IDE) del Ministerio de Bienes Nacionales y realizado por la Dirección General de Aguas (DGA, 2014).

### 4.3. Clima y precipitación

El clima en zona de estudio presenta ciertas variaciones debido a la complejidad del terreno, en general, a esta latitud se tiene un clima mediterráneo o templado cálido con lluvias invernales: Cs bajo la Clasificación de Köppen, este clima se caracteriza por tener temperaturas entre los  $-3^{\circ}\text{C}$  y  $18^{\circ}\text{C}$  en el mes más frío y una precipitación en el mes más seco durante verano inferior a un tercio de la del mes más lluvioso de invierno, lo que se traduce en un periodo de lluvias durante el invierno y un verano seco y caluroso. En particular, la zona presenta un gran desnivel topográfico con alturas por sobre los 4000 m.s.n.m. a estas cotas, el clima cambia a uno del tipo tundra por efecto de la altura (ETH), que se caracteriza por temperaturas entre los  $0^{\circ}\text{C}$  y  $10^{\circ}\text{C}$  en el mes más cálido, siendo común la abundancia de precipitaciones sólidas.

En la zona de estudio existen varias estaciones meteorológicas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA), en el presente estudio se utilizaron cuatro de las más de diez que se encuentran vigentes actualmente en la comuna de San José de Maipo. La selección se hizo considerando que poseen un registro continuo mensual de precipitaciones entre los años 1991-2020 y para la estación Embalse El Yeso también se obtuvieron las temperaturas medias mensuales. Las especificaciones de las estaciones meteorológicas se encuentran en el Anexo A.

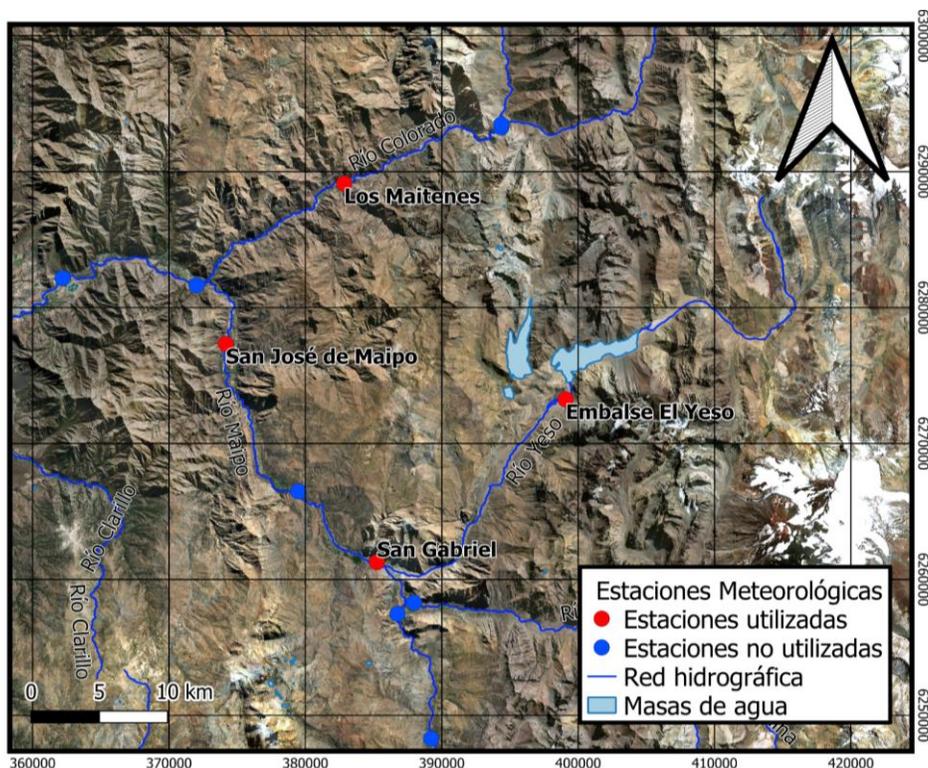


Figura 10: Estaciones meteorológicas DGA. Información adicional sobre las estaciones en Anexo A.

A partir de los datos recopilados, su visualización muestra las tendencias correspondientes al clima de la zona, en las Figuras 11 y 12 se ve como las precipitaciones mensuales promedio en las cuatro

estaciones de la zona, durante los años 1991-2020, aumentan considerablemente en los meses de invierno y contrariamente, son casi nulas durante el verano. Respecto al climograma en el Embalse El Yeso, en representación de la zona, elaborado con las precipitaciones y temperaturas medias promedio durante los años 1991-2020, las temperaturas aumentan a medida que las precipitaciones disminuyen, se tiene que los meses de junio, julio y agosto tienen temperaturas promedio de alrededor de los 3°C, además el periodo de lluvias se concentra entre los meses de mayo hasta agosto, este periodo en Embalse El Yeso representa el 72.8% de la precipitación anual promedio 590,9 mm/año, y el mes de junio con un 27% de la precipitación anual promedio es el mes más lluvioso del año.

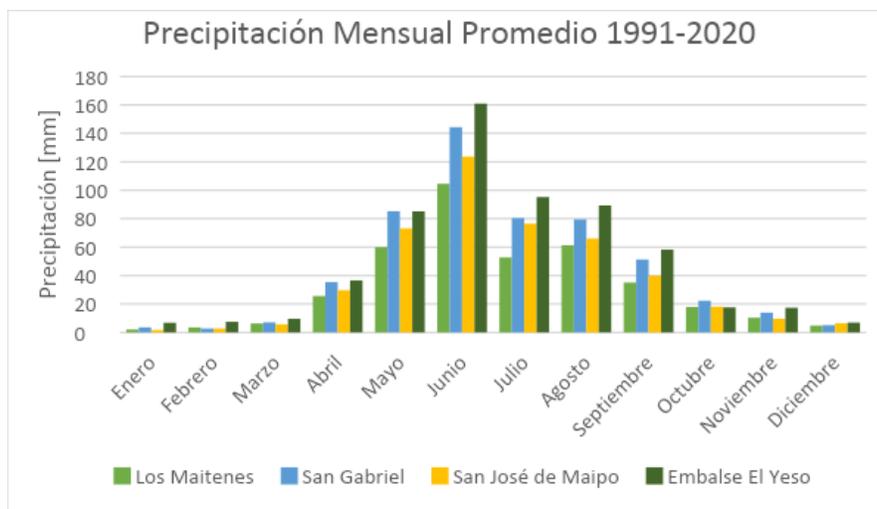


Figura 11: Precipitación mensual promedio entre los años 1991-2020 en cuatro estaciones meteorológicas DGA. Datos obtenidos de DGA (2020).

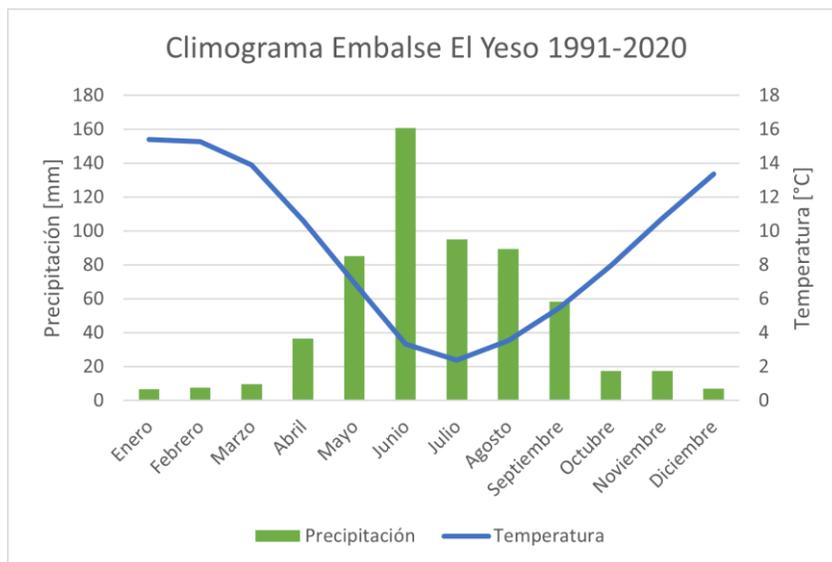


Figura 12: Climograma en estación meteorológica DGA en Embalse El Yeso entre los años 1991-2020. Línea azul indica temperatura y barras verdes indican precipitación. Datos obtenidos de DGA (2020).

El caso de la precipitación sólida, a partir de datos del Observatorio de Nieve de los Andes de Argentina y Chile, desarrollada por el Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA-CONICET) y Centro de Investigación del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup> de Chile. Se obtuvo la caracterización del estado de las nieves en la cuenca del Maipo desde el año 2000 al 2022 (Figura 13), los datos muestran un aumento del área cubierta por nieve durante los meses de invierno, sobrepasando los 4000 km<sup>2</sup>, y se mantienen hasta primavera cuando comienza a aumentar la temperatura y por consecuencia el derretimiento de la nieve, llegando a su menor área durante el verano. De manera contraria, el límite inferior de las nieves o isoterma 0, llega a su punto más alto durante verano, sobrepasando los 4000 m.s.n.m. y su punto más bajo durante el invierno llegando hasta los 3000 m.s.n.m.

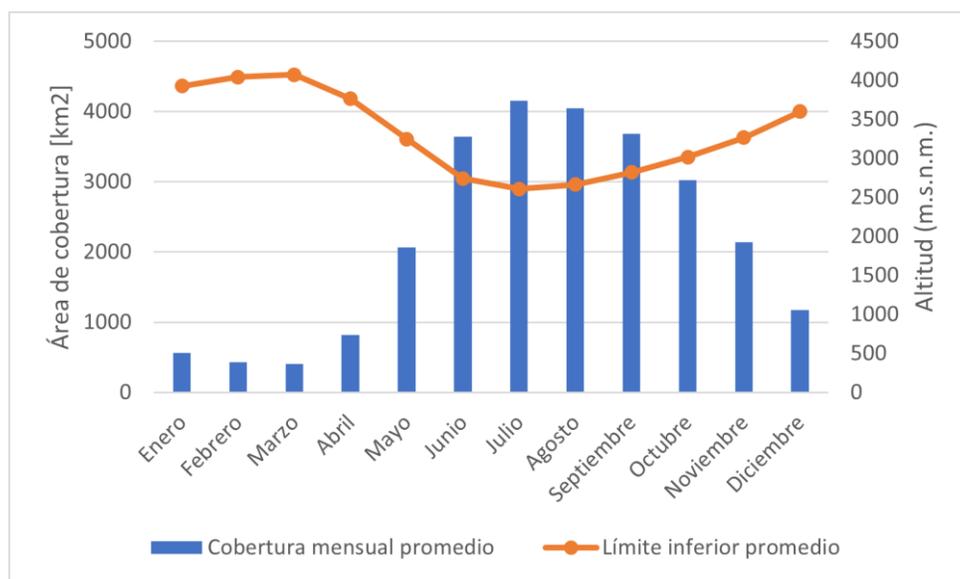


Figura 13: Área de cobertura de la nieve promedio y su límite inferior promedio (isoterma 0) durante los años 2000-2022. Datos obtenidos de Observatorio de Nieve de los Andes de Argentina y Chile (2022).

#### 4.4. Escorrentía

Dentro de los cauces más importantes que alimentan al río Maipo, se encuentran el río Colorado, río El Yeso y río Volcán, además del río Olivares, que alimenta al río Colorado. La Dirección General de Aguas posee estaciones fluviométricas antes de la confluencia entre ríos, pudiendo monitorear los caudales que aportan cada subcuenca al sistema principal, los ríos y estaciones se pueden ver en la Figura 8. A partir de los datos fluviométricos de estas estaciones y un periodo de tiempo de 30 años, de 1991 a 2020, se tiene que el caudal promedio anual para la cuenca Maipo Alto es de 1213.4 m<sup>3</sup>/s, representado por la estación en Río Maipo en El Manzano debido a su posición en la parte baja de esta. El caudal medio mensual en cinco estaciones fluviométricas (Figura 14) muestran un régimen nival de los cauces, es decir, aumento del caudal durante los meses correspondientes al periodo de verano, donde las temperaturas son las más altas y el derretimiento de nieve y glaciares generan un aporte a los caudales de los distintos cauces dentro de la cuenca.

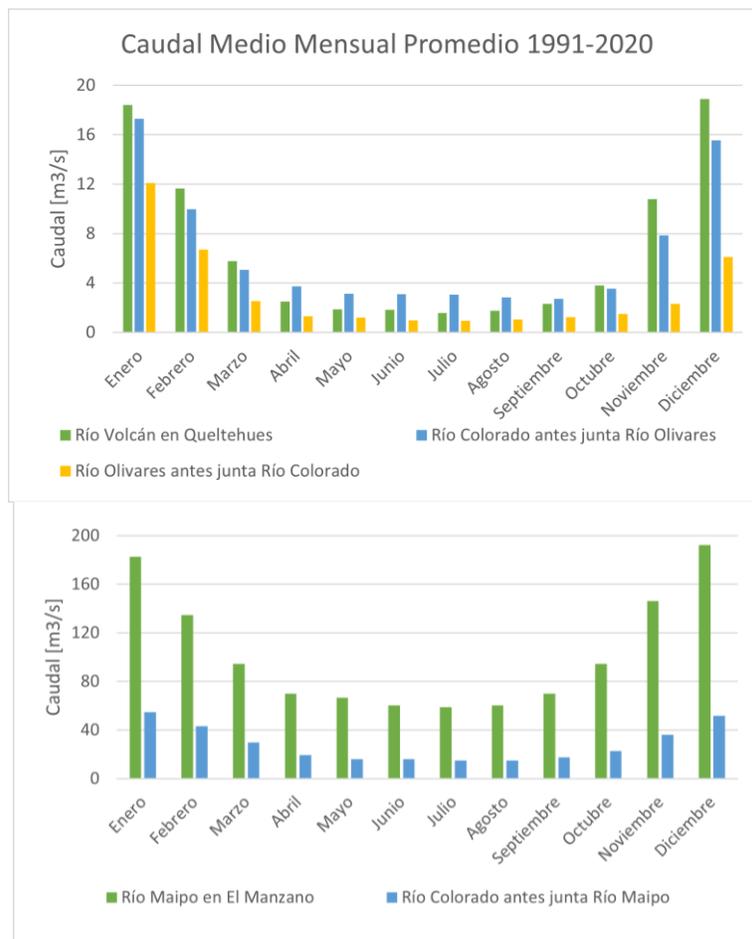


Figura 14: Caudal medio mensual entre los años 1991 y 2020 para cinco estaciones fluviométricas DGA. Datos obtenidos de DGA (2020).

## 4.5. Evapotranspiración potencial

Los datos de evapotranspiración de la cuenca Río Maipo Alto fueron recopilados de la herramienta CAMELS-CL (Catchment Attributes and Meteorology for Large Sample Studies) (Alvarez-Garreton et al., 2018) desarrollada por investigadores del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup>, corresponde a una base de datos que integra información física e hidrometeorológica de las cuencas de todo Chile. La herramienta calcula la evapotranspiración potencial mediante dos metodologías, el primer producto sigue la fórmula propuesta por Hargreaves y Samani (1985), se basa en la temperatura de la superficie. El segundo dato es proporcionado por el producto MODIS PET (Mu et al., 2005) que es el resultado de procesar diferentes fuentes de información: índice de área foliar, fracción fotosintéticamente activa, radiación, tipo de cobertura del suelo, albedo y datos de reanálisis meteorológicos. Los datos recopilados entre los años 1991 a 2020 (Figura 15) muestran los milímetros de evapotranspiración potencial mensual promedio, siendo enero el mes de mayor evapotranspiración potencial con 105,4 mm. Durante los meses de mayor temperatura es cuando mayor evapotranspiración existe, independiente a que además sean los meses de menores precipitaciones.

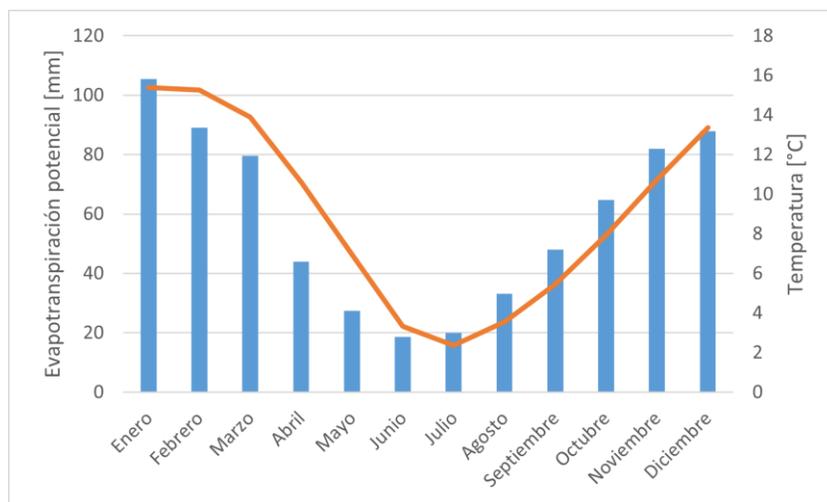


Figura 15: Evapotranspiración potencial promedio y temperatura media promedio en Embalse El Yeso para el periodo 1991-2020. Elaboración propia con datos CAMELS-LS y DGA (2020).

## 4.6. Hidrogeología

En el Mapa Hidrogeológico de Chile (1986) la zona de estudio se encuentra entre rocas sedimentarias y volcánicas de muy baja a nula permeabilidad (Figura 16), algo que se repite lo largo de la Cordillera de Los Andes en la zona centro-sur del país. En el valle del Maipo, el acuífero está restringido al relleno sedimentario del fondo del valle, constituido principalmente por sedimentos fluviales y aluviales. A lo largo del río Maipo, en el área de mayor población, se encuentra la mayor cantidad de derechos de agua subterránea asociados al acuífero libre ligado al cauce principal de la cuenca. Adicionalmente, en los valles de los ríos Yeso y Volcán se reconoce la presencia de acuíferos cordilleranos de sedimentos aluviales y coluviales (CADE-IDEPE, 2004).

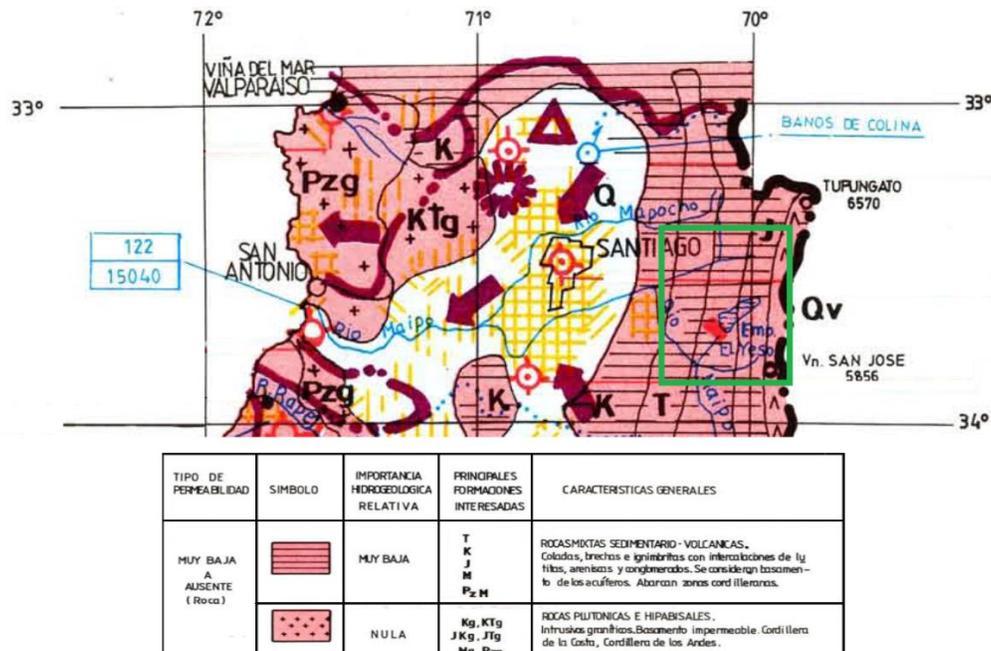


Figura 16: Mapa hidrogeológico de Chile (1986) entre los 33° y 34°S escala 1:2.500.000. El recuadro verde indica el área de estudio. Tomado de DGA (1986).

Existen además potenciales acuíferos de permeabilidad secundaria asociados a fuentes termales hacia el límite oriental de la cuenca, las termas del Plomo, Baños Colina, Baños Morales y los Baños Azules. Sin embargo, la zona no ha sido estudiada a fondo desde el punto de vista hidrogeológico a pesar de la existencia de vertientes y surgencias de agua natural que evidencian la importancia de la permeabilidad secundaria.

## 4.7. Derechos de agua

En la comuna de San José de Maipo existen 297 derechos de aguas entregados, 268 superficiales y 29 subterráneas, hasta el mes de abril del año 2021. Del total de derechos, 134 son derechos consuntivos y solo el 32,8% tiene coordenadas. Estos derechos se encuentran repartidos principalmente en la parte baja de la cuenca Río Maipo Alto y en el inicio de la cuenca Río Maipo Medio, donde existe una mayor densidad de población (Figura 19). La extracción de estas aguas representa una salida en el sistema hidrológico de la cuenca, cuyo caudal anual promedio corresponde a 36,42 m<sup>3</sup>/s, la que se traduce en 1148,5 hm<sup>3</sup>/año. El uso de estas aguas es principalmente para el consumo humano, con un 58,74%, siendo esta fuente de agua potable de gran parte del Gran Santiago, con un menor porcentaje se utiliza para riego, minería, uso doméstico, etc., además existen un porcentaje considerable de 32,64% el que no especifica su uso, generando un vacío de información importante sobre en que se utilizan las aguas de la cuenca alta del río Maipo.

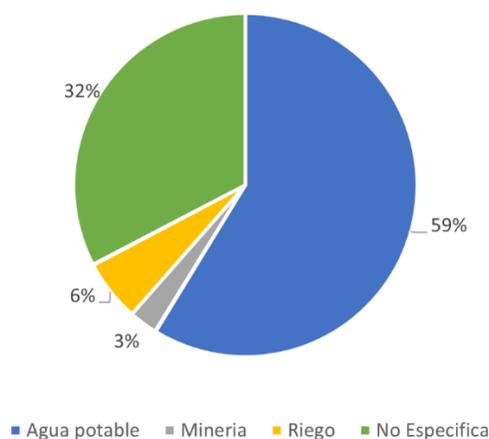


Figura 17: Usos de derechos de agua consuntiva. Datos obtenidos de DGA (2021).

Los derechos de agua no consuntivos otorgados son 163, de ellos el 70,6% tienen coordenadas y se ubican principalmente en sectores de mayor altitud (Figura 19). El 97,2% del caudal total otorgado se usa principalmente para la producción de energía hidroeléctrica, por un total de 123.342,9 m<sup>3</sup>/s equivalente a 3.889.741,7 hm<sup>3</sup>/año. Estos caudales deben ser devueltos al cauce en las mismas condiciones químicas en las que fueron captadas, aunque no se menciona a cuánta distancia son devueltas desde su punto de captación, los 10 derechos de aguas no consuntivas con mayor caudal otorgado concentran el 92,87% del caudal total, y se estima que desvían aguas en un trayecto de 110 km aproximadamente (Tabla 2).

Tabla 2: Diez derechos de agua no consuntivo con mayor caudal otorgado, sus usos y distancia estimada de restitución. Esta distancia es mencionada en la plantilla de la DGA, además se calcularon dos distancias extras: distancia\* es calculada con las coordenadas UTM de captación y restitución y la distancia\*\* es calculada con las coordenadas UTM de captación, restitución y el desnivel entre ellas. Datos obtenidos de DGA (2021).

Nombre Solicitante	Naturaleza del Agua	Uso	Caudal Anual Promedio [m <sup>3</sup> /s]	Distancia [m]	Distancia* [m]	Distancia** [m]
EXPLOENERGIAS LTDA.	Superficial	Energía Hidroeléctrica	36498,92	1800	1820,17	1827,55
RP EL ARROYO ENERGIAS RENOVABLES S.A.	Superficial	Energía Hidroeléctrica	4212,96	4026	4025,70	4028,49
RP EL ARROYO ENERGIAS RENOVABLES S.A.	Superficial	Energía Hidroeléctrica	3014,96	4026	4025,70	4028,49
ALTO MAIPO SPA	Superficial	Energía Hidroeléctrica	2196,14	20000	17047,81	17049,54
ENERGIA COYANCO S.A.	Superficial	Energía Hidroeléctrica	19689,84	5071	5071,50	5071,80
HIDROELECTRICA LOS ALMENDROS S.A.	Superficial	Energía Hidroeléctrica	7524,49	20000	17047,81	17049,54
HIDROELECTRICA LOS ALMENDROS S.A.	Superficial	Energía Hidroeléctrica	11687,67	20000	17047,81	17049,54
HIDROELECTRICA LOS ALMENDROS S.A.	Superficial	Energía Hidroeléctrica	3224,60	20000	17047,81	17049,54
HIDROELECTRICA LOS ALMENDROS S.A.	Superficial	Energía Hidroeléctrica	5121,91	20000	17047,81	17049,54
AUGUSTO PEDRO GUILLON CUEVAS	Superficial	Energía Hidroeléctrica	21377,75	5064	5063,60	5063,75
Caudal total [hm <sup>3</sup> /año]			3612424,729	119,99	105,25	105,27
				Distancia total [km]		

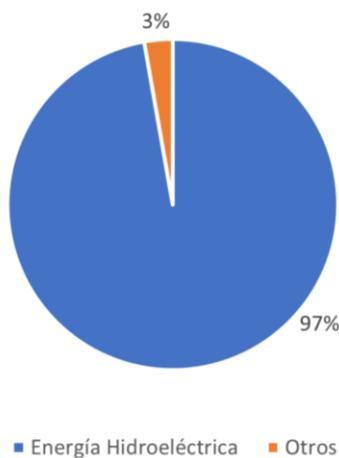


Figura 18: Usos de derechos de agua no consuntiva. Datos obtenidos de DGA (2021).

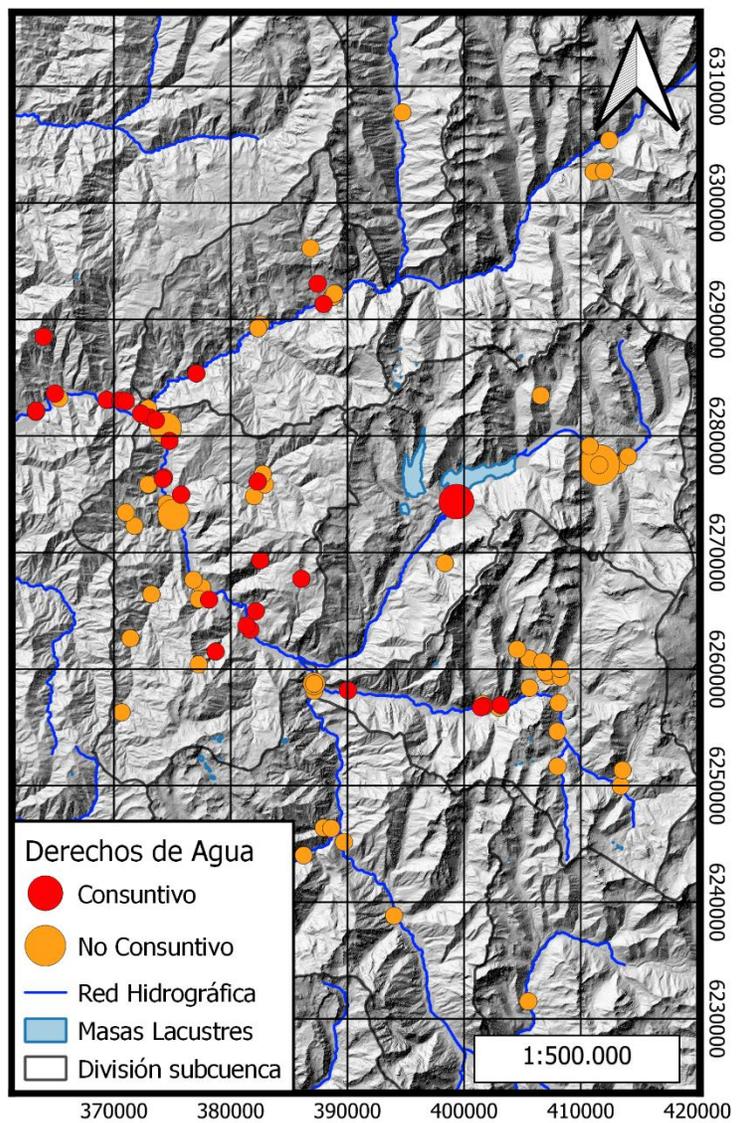


Figura 19: Mapa con distribución de puntos de captación de derechos de aguas. Elaboración propia con datos obtenidos de DGA (2021).

## 5. RESULTADOS Y DISCUSION

### 5.1 Análisis hidroclimático

Considerando que el país está siendo afectado por una “mega sequía” que perjudica a la zona norte y centro del país, evento más largo registrado y con pocos análogos en el último milenio, ha traído un déficit medio de precipitaciones de 20 a 40% (Garreaud et al., 2020). Debido a esto, se graficó las precipitaciones anuales durante los años 1991 hasta 2020 en cuatro estaciones meteorológicas de la zona (Figura 20), del gráfico se desprenden principalmente dos observaciones, en primer lugar, existe una variabilidad interanual en las precipitaciones, es decir, periodos de mayor y menor precipitaciones en intervalos de uno a tres años, se relaciona típicamente con El Niño Oscilación del Sur (ENOS) (Montecinos y Aceituno, 2003), que muestre fases opuestas, de años húmedos y secos durante los fenómenos de El Niño y La Niña, respectivamente (Figura 21). La segunda observación corresponde a la evidente disminución en la precipitación a partir de los años 2010-2011, donde la curva ya no presenta una variabilidad interanual considerable como lo era antes de este punto.

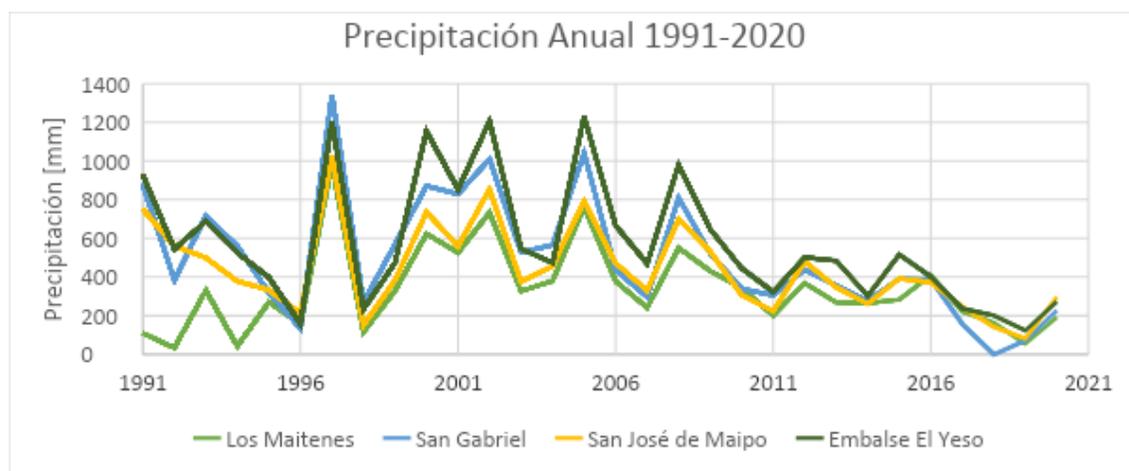


Figura 20: Precipitación anual durante los años 1991-2020. Datos obtenidos de DGA (2020).

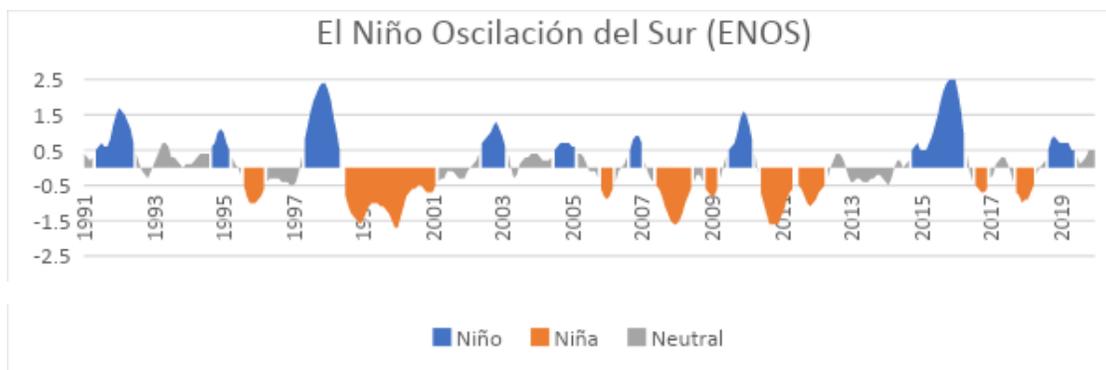


Figura 21: Índice de Niño Oceánico. Periodos cálidos y húmedos en azul y fríos y secos en naranja. Datos obtenidos de NOAA/National Weather Service (2021).

A continuación, basándose en la observación anteriormente descrita se comparan las precipitaciones y temperaturas en dos puntos de la zona, San José de Maipo y Embalse El Yeso, para los periodos 1991-2010 y 2011-2020. Las precipitaciones han disminuido claramente, durante el periodo de lluvias han bajado en promedio un 44.7% y 49.2% en San José de Maipo y Embalse El Yeso, respectivamente (Figura 22). Mientras que la temperatura en Embalse El Yeso tiene variaciones importantes en algunos meses, y en general, un aumento de la temperatura, los mayores aumentos se presentan en los meses de enero, julio, agosto y septiembre, donde la diferencia es de 0.9°C, 0,84°C, 0,95°C y 1,21°C respectivamente, afectando principalmente a la estación de invierno. Existe la excepción de marzo y octubre, donde la temperatura disminuyó 0.41°C y 0.85°C respectivamente.

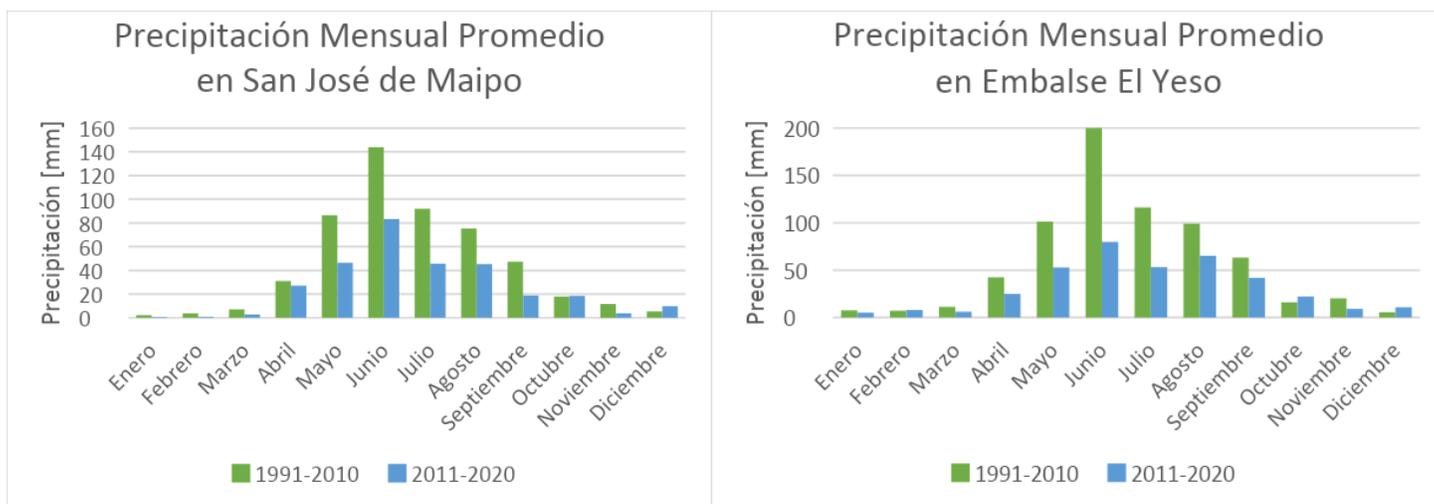


Figura 22: Precipitaciones mensuales promedio para los periodos de 1991-2010 y 2011-2020 en las estaciones meteorológicas de San José de Maipo y Embalse El Yeso. Datos obtenidos de DGA (2020).

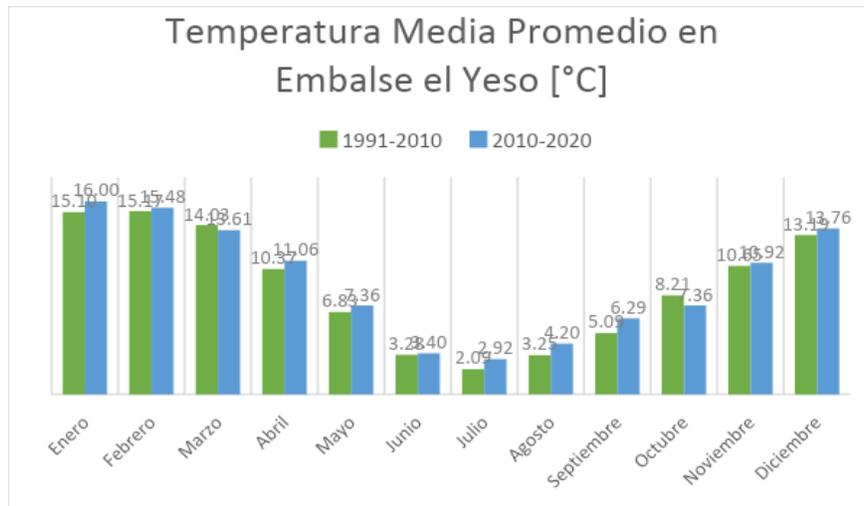


Figura 23: Temperaturas medias promedio para los períodos 1991-2010 y 2011-2020 en la estación meteorológica de Embalse El Yeso. Datos obtenidos de DGA (2020).

Al igual que la precipitación líquida, se graficó para la precipitación sólida anual la variación de área de cobertura y la isoterma 0 desde el año 2000 hasta 2021 (Figura 24), se ve como la cobertura de nieve promedio ha bajado gradualmente, siguiendo la variabilidad interanual El Niño Oscilación del Sur (ENOS) que provoca algunos años excepcionales. El límite inferior de nieves o isoterma 0 genera una curva contraria a la de cobertura, se observa como aumenta en altitud a medida que las cobertura disminuye.

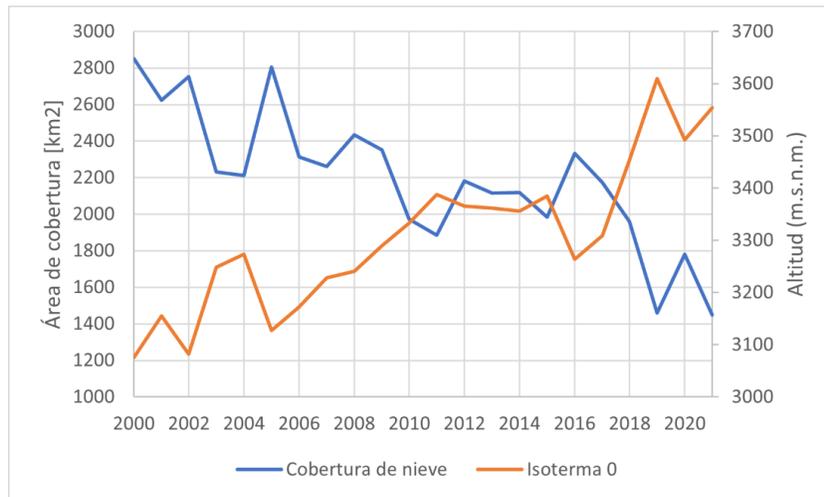


Figura 24: Área de cobertura de la nieve anual y su límite inferior anual (isoterma 0) durante los años 2000-2022. Datos obtenidos de Observatorio de Nieve de los Andes de Argentina y Chile (2022).

Al comparar los periodos 2000-2010 y 2011-2022 (Figura 25), se observa que el área de cobertura disminuyó en promedio 471 km<sup>2</sup>, lo que significa un 26,6% de disminución en la cobertura de nieve. Mientras que la línea inferior de nieve subió en promedio 205 m.

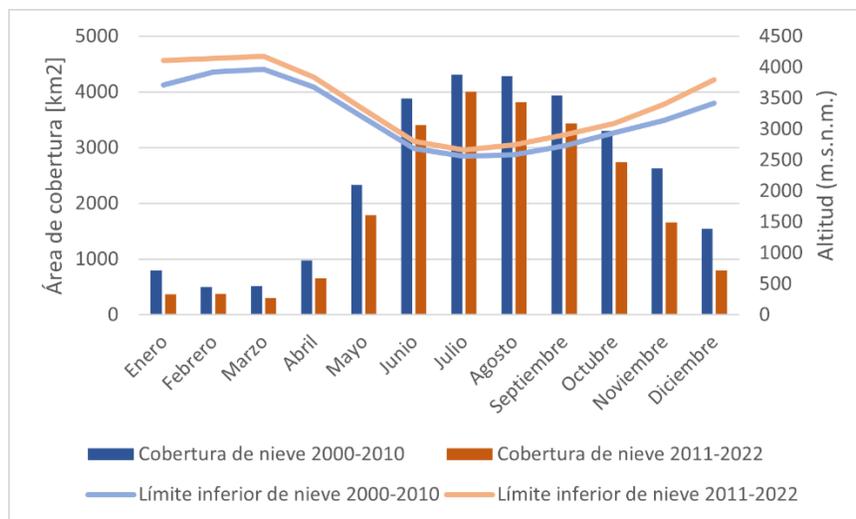


Figura 25: Área de cobertura de la nieve anual y su límite inferior anual (isoterma 0) para los periodos 2000-2010 y 2011-2022. Datos obtenidos de Observatorio de Nieve de los Andes de Argentina y Chile (2022).

De la misma forma que con la precipitación, se obtuvo el caudal total anual en cinco estaciones fluviométricas dentro de la cuenca (Figura 26). Análogo a la precipitación, existe una variación interanual asociada al El Niño Oscilación del Sur (ENOS), que muestra fases opuestas, de años húmedos y secos durante los fenómenos de El Niño y La Niña, respectivamente. Al igual como sucede con la precipitación, a partir de un mínimo el año 2011 los caudales ya no vuelven a los máximos de años pasados, al contrario, comienzan a llegar a valores no antes registrados. Debido a esto, se analizaron los caudales medios para cada mes en los distintos periodos de tiempo: de 1991 a 2010 y de 2011 a 2020 (Figura 27), la disminución de caudal es evidente para el periodo post año 2011, siendo de un 37,8% menor en comparación al periodo 1991-2010.

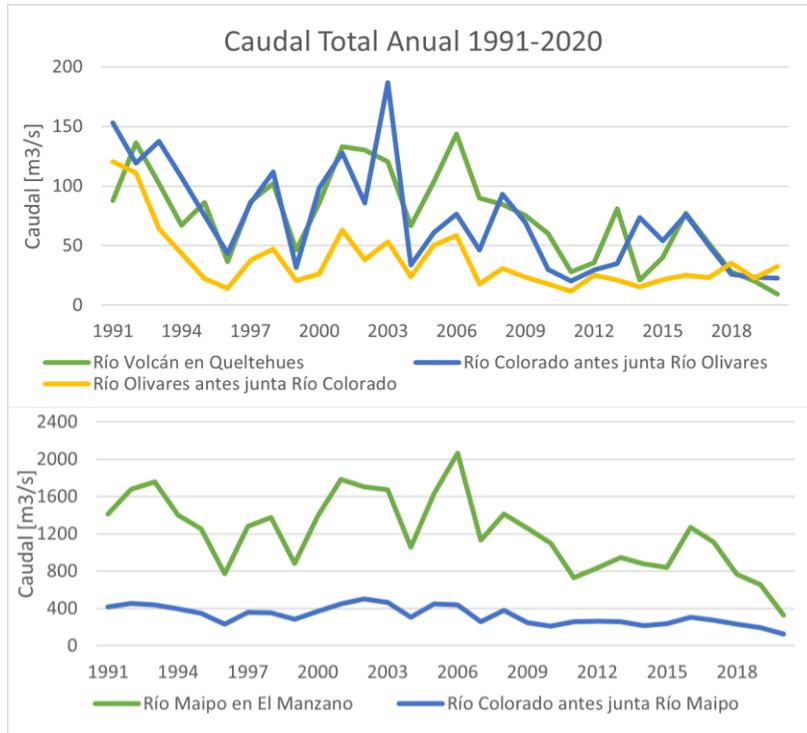


Figura 26: Caudal total anual en cinco estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas para el periodo de 1991-2020. Datos obtenidos de DGA (2020).

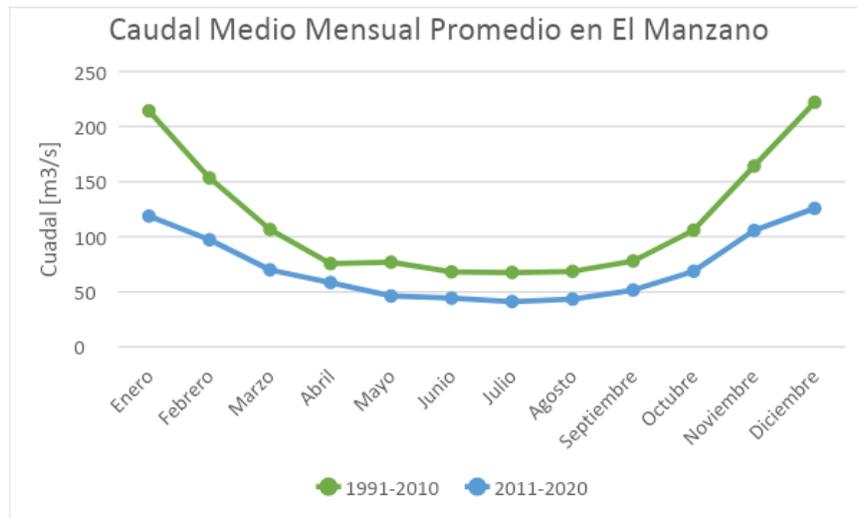


Figura 27: Caudal medio mensual promedio para el periodo de 1991-2020 en el sector de El Manzano. Datos obtenidos de DGA (2020).

## 5.2. Hidrogeoquímica

El estudio de las aguas, en la zona de estudio, ha estado centrado principalmente en entender el origen de las aguas termales presentes en el sector oriente de la cuenca (Hauser, 1997; Risacher y Hauser, 2008; Martini, 2008; Bustamante et al., 2010; Benavente et al., 2016). Estos autores identificaron diferentes tipos de agua y vincularon las características fisicoquímicas a la interacción agua-roca y a fallas regionales presentes en el área.

Para analizar la química de las aguas de la cuenca, se recopilaron distintos estudios donde se realizaron análisis químicos, se ocuparon los datos de los trabajos de Risacher y Hauser (2008), Bustamante et al. (2010), Benavente (2015) y Pincetti (2016), estos datos son únicamente de aguas termales, para aguas superficiales, de pozo y túneles se ocuparon los datos del trabajo de la consultora SRK (2020), los resultados se encuentran en el Anexo B, y se pueden ver su distribución y composición en las Figuras 28 y 29 respectivamente.

En el diagrama de Piper (Figura 29) se observa cómo las diferentes muestras tomadas se concentran en la mitad superior del gráfico central indicando que las aguas de la zona de estudio presentan tipos químicos parecidos independientemente del ambiente del cual proceden las muestras (superficial, subterráneo incluidas las de los túneles). Las aguas superficiales son del tipo sulfatadas cálcicas principalmente, con algunas cloruradas cálcicas, al igual que las muestras de agua de pozo. Esta similitud geoquímica puede estar relacionada con el nexo entre agua superficial y subterránea en el entorno de los cauces. Las aguas termales son en su mayoría cloruradas sódicas ocupando un área bien definida del gráfico dando así cuenta de las similitudes existentes entre ellas. Respecto a las aguas de túneles, estas corresponden a muestras procedentes de afloramientos en los túneles de la hidroeléctrica Alto Maipo, estas son las aguas con composición más variable de todas presentando similitudes con todas las otras muestras analizadas. Su análisis es de principal interés para este estudio, pues permiten inferir sobre la circulación de aguas en roca fracturada.

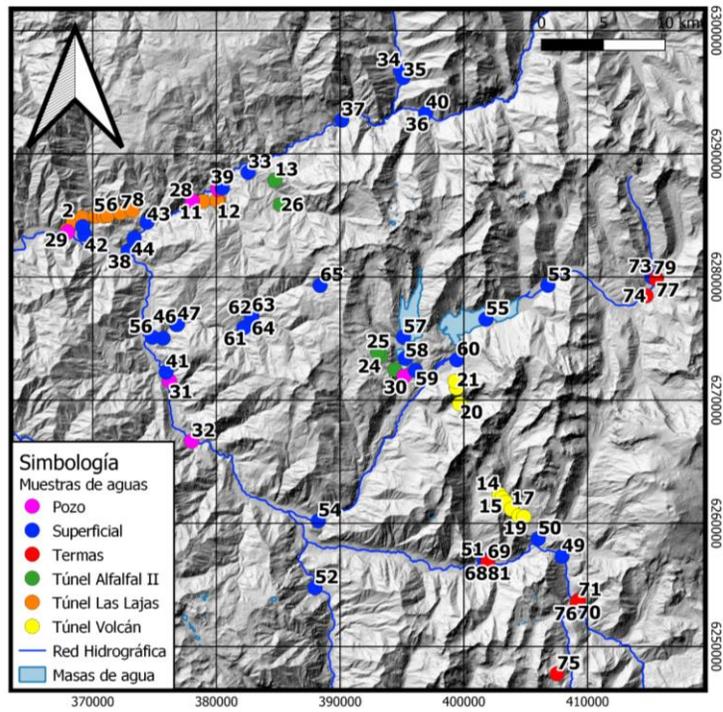


Figura 28: Distribución de datos químicos de aguas en la cuenca Río Maipo Alto. Datos: Risacher y Hauser (2008), Bustamante et al. (2010), Benavente (2015) y Pincetti (2016) y SRK (2020).

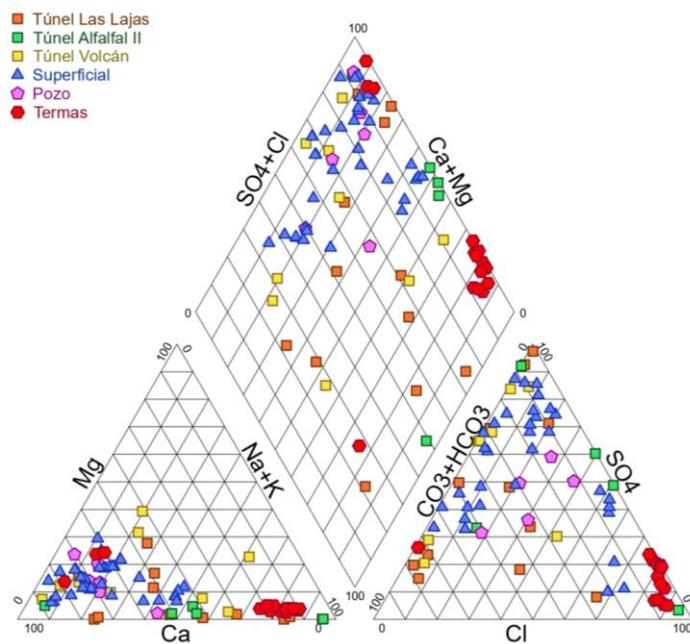


Figura 29: Diagrama de Piper para aguas de la cuenca Río Maipo Alto. Datos: Risacher y Hauser (2008), Bustamante et al. (2010), Benavente (2015), Pincetti (2016) y SRK (2020).

Las muestras de agua tomadas en los afloramientos de los túneles se encuentran en promedio a 500 m de profundidad, estas se ubican en contacto con rocas de diferente composición, en la figura 30 se observa la traza de los tuneles sobre la geología de la zona. Además, se realizaron perfiles geológicos de los túneles con la interpretación superficial a partir del mapa geológico (Figura 31). El túnel Las Lajas cruza exclusivamente a la Formación Abanico y atraviesa al Pluton El Manzano, el túnel Alfalfal II atraviesa la Formación Abanico por debajo del Formación Farellones y finalmente, el túnel Volcán cruza la Formación Abanico, Formación Colimapu y Formación Lo Valdés, incluidas las Fallas Chacayes-Yesillo y El Diablo.

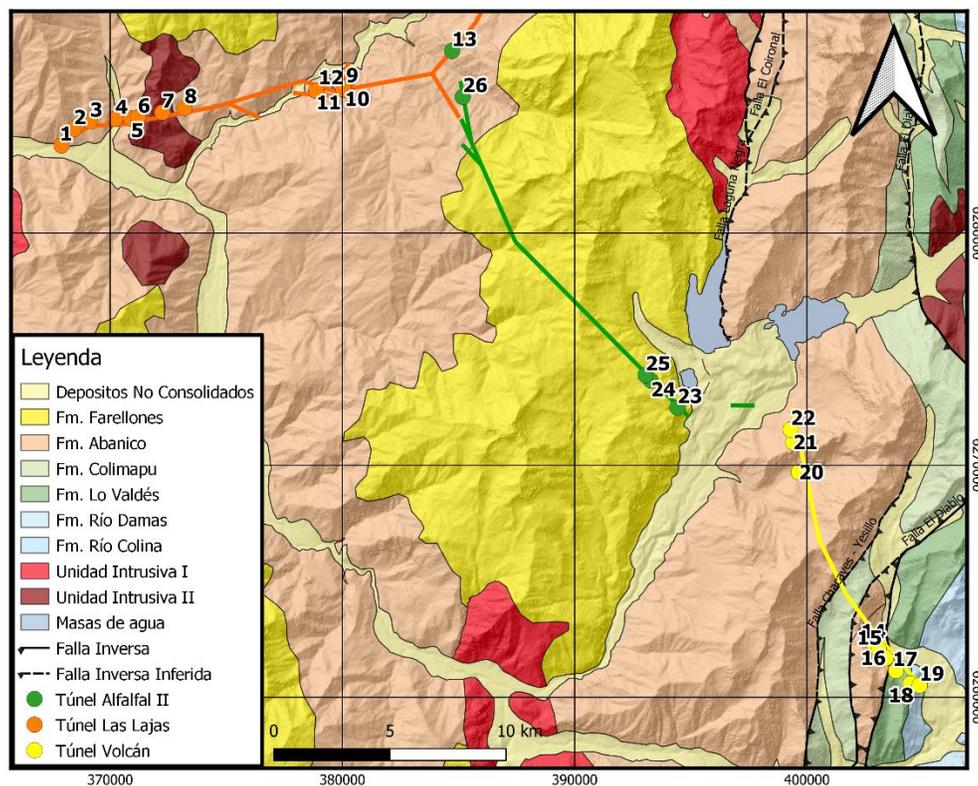


Figura 30: Mapa geológico de la zona de estudio junto a trazas de túneles de la hidroeléctrica Alto Maipo y muestras de aguas afloradas, datos de SRK (2020). Basado en Thiele (1980), Aguirre (1999), Gana et al. (1999), Giambiagi (2000), Giambiagi et al. (2001), Bustamante (2001), Sellés y Gana (2001), Giambiagi y Ramos (2002), SERNAGEOMIN (2003), Fock (2005), Armijo et al. (2010), SEGEMAR (2010), Riesner et al. (2017, 2018).

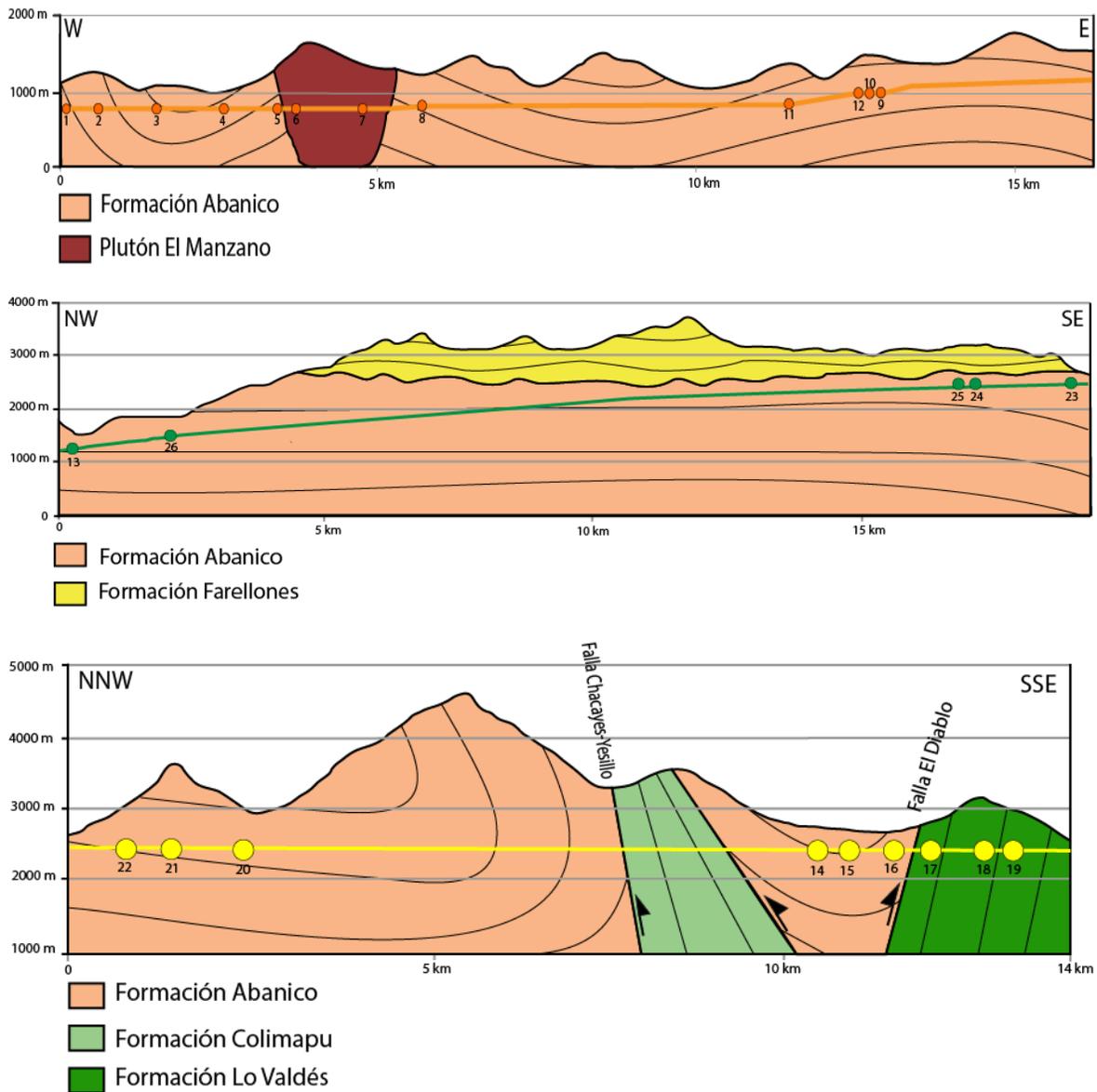


Figura 31: Perfil geológico de los túneles Las Lajas, Alfalfal II y Volcán interpretado del mapa geológico.

La relación entre el agua superficial y el agua subterránea puede ser evaluada utilizando las características fisicoquímicas de las muestras en relación a la posición de las mismas. Para tal fin, se ha analizado la Conductividad Eléctrica (CE) con respecto a la cota y/o profundidad de las muestras.

En primer lugar, el gráfico de CE vs cota (Figura 32) señala que las muestras de los túneles Las Lajas y Volcán se encuentran a cotas similares dentro de los túneles correspondientes, entre los 800 y 1000 m.s.n.m. para el túnel Las Lajas y a 2500 m.s.n.m. para el túnel Volcán, mientras que el túnel Alfalfal II tiene una diferencia de cotas de más de 1200 metros entre sus portales, desde los 1300 y 2500 m.s.n.m.

En segundo lugar, la CE tiene diferencias para cada túnel, los túneles Las Lajas y Volcán tienen comportamientos variables a una misma cota, pero en un rango acotado, con una CE que va desde los 100 a los 950  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en túnel Las Lajas y entre los 250 y 1900  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en el túnel Volcán. Las muestras del túnel Alfalfal II poseen un comportamiento confuso, particularmente las muestras 24 y 25, que tienen una CE de 5450 y 7690  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente, más llama la atención considerando que la muestra 23 se encuentra a la misma cota y a tan solo 1,5 km de distancia de estas muestras y tiene una CE de 901  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

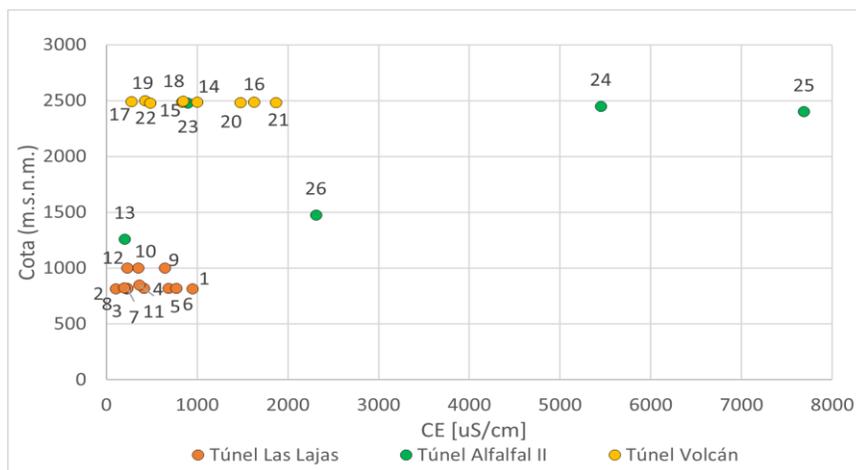


Figura 32: Gráfico de Conductividad Eléctrica vs Cota para muestras en túneles de la hidroeléctrica Alto Maipo. Datos obtenidos de SRK (2020).

Las muestras de agua superficiales y de pozos (Figura 33) tienen valores de CE entre 150 y 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  aproximadamente. Estos valores son los mismos que los de las muestras de los túneles, excepto las n° 24 y 25. Con respecto a las tendencias observadas, si bien existe una cierta tendencia a que este valor aumente a medida que baja la cota, existen varias muestras que no siguen esta pauta claramente.

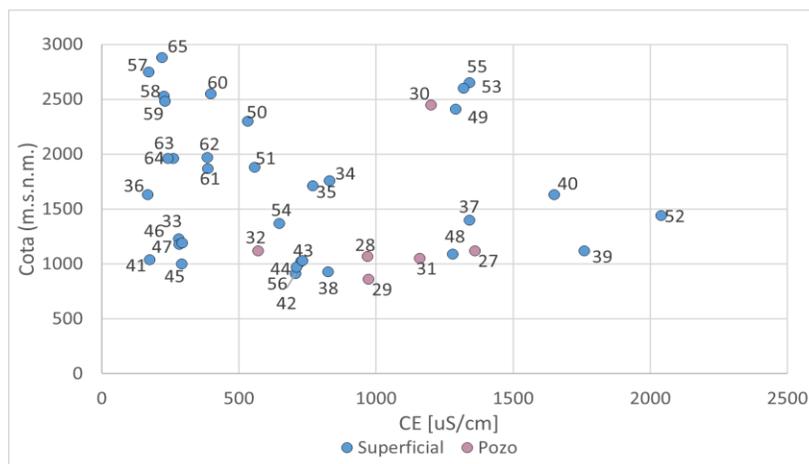


Figura 33: Gráfico de Conductividad Eléctrica vs Cota para muestras superficiales y de pozos en la cuenca Alto Maipo. Datos obtenidos de SRK (2020).

Para obtener una visión más completa de la relación entre la CE y la profundidad de los afloramientos de agua en los túneles se calculó la profundidad media de los mismos. En general, los túneles se encuentran aproximadamente 500 m de profundidad con respecto a la superficie topográfica, aunque la irregularidad del terreno hace que se alcance una profundidad que varía entre 200 m hasta casi 900 m. Suponiendo que la profundidad de la infraestructura es la de la interceptación de las aguas, se puede indicar que las aguas de los túneles varían en estos rangos de profundidad. Siendo las que tienen menos de 200 m son las muestras más cercanas a los portales de los túneles, como es el caso de la muestra n° 1 y 19, o que se encuentren justamente bajo alguna quebrada que disminuya la diferencia en la profundidad en comparación con muestras adyacentes, como sucede con la muestra n° 4.

El gráfico 34 muestra una tendencia a aumentar la CE a medida que aumenta la profundidad, esto se ve más claro en los túneles Alfalfal II y Volcán, la dispersión que existe se debe a que la circulación en roca fracturada tiene distintas trayectorias, otorgando una composición química heterogénea del agua, distinto al caso de lo que sería un acuífero detrítico que genera un agua homogénea químicamente.

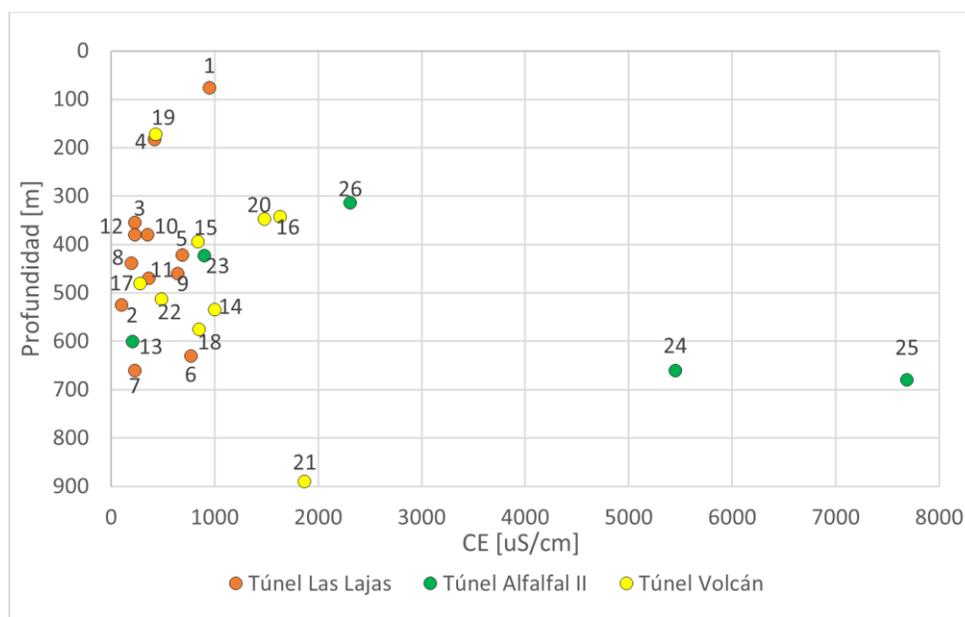


Figura 34: Gráfico de Conductividad Eléctrica vs Profundidad para muestras en túneles de la hidroeléctrica Alto Maipo. Datos obtenidos de SRK (2020).

Para distinguir el proceso de evolución del agua de manera más local en la zona de estudio se realizaron diagramas de Piper (Figuras 35 y 37) y diagramas de Stiff georreferenciados (figuras 36 y 38) diferenciados en dos áreas, norte y sur, para mejor comprensión.

Para el área norte asociada al río Colorado, se observa una gran diversidad en la química de las aguas, las aguas superficiales y de pozo son del tipo sulfatadas cálcicas, con algunas variaciones como las muestras 35, 37, 39 y 40 que tienen mayor concentración de Na.

En los túneles de la hidroeléctrica Alto Maipo existe una diversidad importante entre las muestras a pesar de su cercanía, en el tramo más occidental del túnel Las Lajas entre las muestras 1 y 8 el tipo de agua más reconocible es la sulfatada cálcica, muestras 1, 5 y 6, que además son las con mayor CE en este tramo. Las otras muestras de este segmento además de tener menor CE tienen proporciones más igualadas entre los cationes y aniones, con ligera preferencia del catión  $\text{Ca}^{2+}$  y una preferencia más marcada del anión  $\text{SO}_4^{2-}$ . Las muestras 2 y 8 son una particularidad al ser derechamente bicarbonatadas cálcicas. La variedad en la química se explica con una circulación de agua en roca fracturada por distintos trayectos y tiempos, lo que generaría una mineralización por la interacción con la roca heterogénea, lo que además habla de lo fracturada que se encuentra esta zona.

En el tramo oriental del túnel Las Lajas, entre las muestras 9 al 12 junto a las 13 y 26 del segmento noroeste del túnel Alfalfal II, las aguas son del tipo clorurada/bicarbonatada sódica, estas aguas tienen esta huella química que no tiene relación aparente con algún otro tipo de agua de la zona y debido a que se encuentran cercanas espacialmente debieran tener un origen común. Finalmente, la muestra 26, cuya CE es superior a los  $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$  y se posiciona como la tercera muestra con mayor CE, es del tipo clorurada sódica/cálcica con una inusual concentración del anión  $\text{Cl}^-$  frente a los demás aniones, su relación con las demás muestras de agua podría relacionarse con aquellas aguas superficiales cloruradas, especialmente con la muestra 39 con la que comparte cierta similitud química y se encuentran alineadas en una dirección NW.

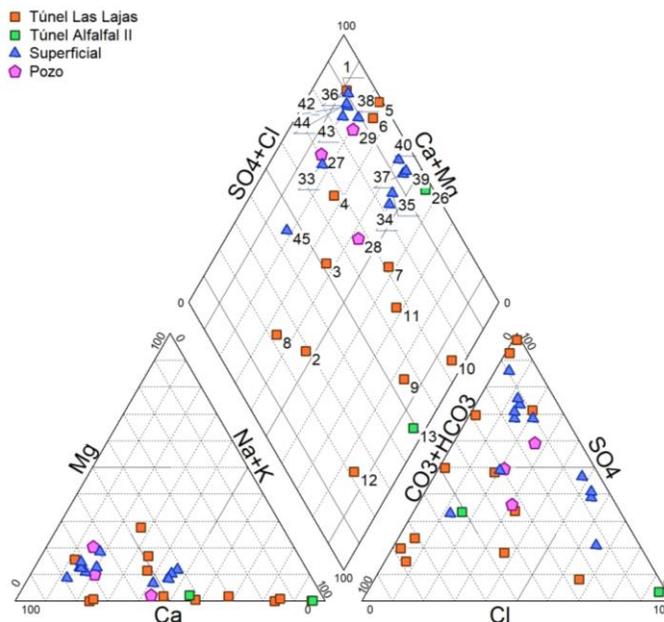


Figura 35: Diagrama de Piper para muestras de agua en el área norte, asociada al río Colorado. Datos obtenidos de SRK (2020).

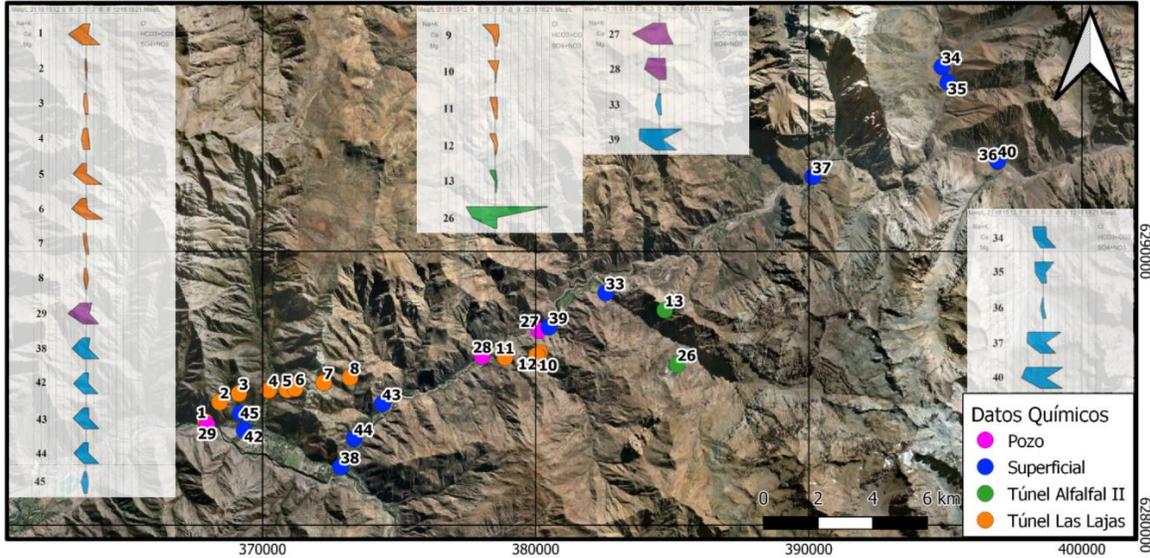


Figura 36: Mapa con diagramas de Stiff para muestras de agua en el área norte, asociada al río Colorado. El Diagrama de Stiff tiene un máximo de 21 meq/L con una separación de 3 meq/L. Datos obtenidos de SRK (2020).

En el área sur, entre los ríos Yeso y Volcán, las aguas superficiales al igual que en el área norte son del tipo sulfatada cálcica, con la excepción de la muestra 60 que es ligeramente más bicarbonatada. El diagrama de Stiff de estas aguas muestra que las aguas más orientales tienen mayores concentraciones de iones, muestras 49, 50 y 51 en el río Volcán y las muestras 53 y 55 que se encuentran al oriente del Embalse El Yeso, las demás muestras de aguas superficiales no superan los 7 meq/L en cada ión. La muestra 30 obtenida de pozo es del tipo clorurada cálcica, a diferencia de lo que sucede en el área norte no tiene una huella similar al agua superficial, diferenciándose con una concentración inusual del anión  $\text{Cl}^-$  en relación con las aguas que se encuentran en la zona.

Para el caso de las aguas subterráneas se tiene una amplia diversidad de tipos y anomalías en las concentraciones de iones como advertía la CE anteriormente. Las muestras del túnel Alfalfal II tienen dos huellas químicas: la muestra 23, la más cercana al portal sur del túnel es del tipo sulfatada cálcica al igual que las muestras de agua superficial de la zona, por lo que su origen pareciera ser ese. Las muestras 24 y 25 son las con mayor concentración de iones en toda la zona de estudio y son del tipo cloruradas/sulfatadas sódica/cálcicas en proporciones muy parejas, la particularidad de estas aguas no tiene comparación con las aguas muestreadas en la zona, por lo que su huella química podría explicarse con grandes tiempos de residencia e interacción con roca dura.

Las aguas del túnel Volcán son las más variadas, en la sección noroeste las muestras 20 y 22 son del tipo bicarbonatadas cálcicas y la muestra 21 sulfatada sódica, lo que tienen en común estas 3 muestras es la anómala concentración del catión  $\text{Mg}^{+2}$  no visto en ninguna otra muestra de agua de la zona. La sección sureste del túnel, entre las muestras 14 y 19, son principalmente sulfatadas cálcicas con la excepción de la muestra 14 que es del tipo sulfatada sódica y la muestra 17 que es bicarbonatada sódica, esta variedad química para muestras próximas entre sí puede deberse a las distintas rutas por donde están circulando estas aguas, esto hace sentido considerando que esta área

fue identificada como una zona de alta densidad de fractura, por lo que el agua tendría mayor espacio para circular.

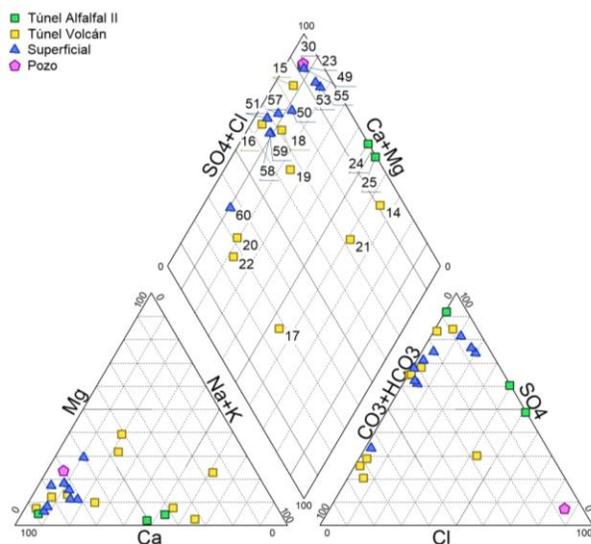


Figura 37: Diagrama de Piper para muestras de agua en el área sur, asociada a los ríos Yeso y Volcán. Datos obtenidos de SRK (2020).

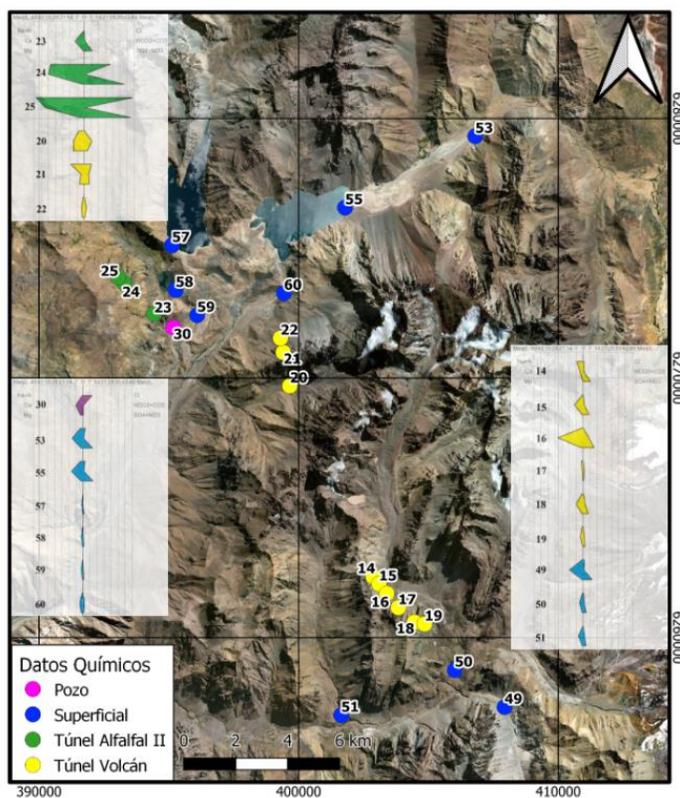


Figura 38: Mapa con diagramas de Stiff para muestras de agua en el área sur asociada a los ríos Yeso y Volcán. El Diagrama de Stiff tiene un máximo de 49 meq/L con una separación de 7 meq/L. Datos obtenidos de SRK (2020).

### 5.3. Caracterización isotópica

Para un mayor entendimiento del origen de las aguas subterráneas afloradas en túneles de la hidroeléctrica de Alto Maipo, se representan los isótopos estables del agua  $\delta D$  y  $\delta^{18}O$  junto a la Línea de Agua Meteórica Local (MWL) a los 33°S calculada por Taucare et al. (2020) y la Línea de Agua Meteórica Global (GMWL) descrita por Craig (1961),  $\delta D = 8,07 \delta^{18}O + 11,42$  ( $R^2 = 0,97$ ) y  $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$  respectivamente. En la figura 39 se pueden ver dos grupos marcados, el primero con valores entre -12,8 ‰ a -11,7 ‰ para  $\delta^{18}O$  y entre -97 ‰ a -83 ‰ para  $\delta D$ , y un segundo grupo más empobrecido con valores entre -16,1 ‰ a -14 ‰ para  $\delta^{18}O$  y entre -120 ‰ a -102 ‰ para  $\delta D$ .

El primer grupo coincide con lo que se definió como área norte y que además son las muestras que encuentran a una cota de 1000 m.s.n.m. aproximadamente, donde se encuentran las muestras del túnel Las Lajas y las muestras 13 y 26 del túnel Alfalfal II, a excepción de la muestra 1 que se encuentra en el segundo grupo, que coincide con el área sur, compuesto por las muestras del túnel Volcán y las muestras 23, 24 y 25 del túnel Alfalfal II que se encuentran a los 2500 m.s.n.m.

A grandes rasgos se observa que las muestras se encuentran alineadas y ligeramente por debajo de ambas Líneas de Agua Meteórica, a pesar de estar aproximadamente un grado más al sur de lo que representa la Línea de Agua Meteórica Local a los 33°S, en el caso particular de las muestras 9, 10, 11, 12, 13 y 26 que se encuentran cercanas espacialmente, son las aguas que más se alejan de la tendencia y se denominan aguas residuales de un proceso de evaporación que las enriquece isotópicamente (Clark, 2015), debido a que estas aguas no se encuentran en contacto con la atmósfera, el proceso de evaporación debió ocurrir antes de su infiltración en la roca fracturada.

Respecto a las aguas superficiales y de pozo, estas se encuentran alineadas y ligeramente bajo las Líneas de Agua Meteórica, poseen un rango mayor en su huella isotópica con aguas más y menos empobrecidas en comparación a las aguas de túneles, con valores entre los -17,7 ‰ a -10 ‰ para  $\delta^{18}O$  y entre -133 ‰ a -81 ‰ para  $\delta D$ . Además, no se tiene una correlación entre las aguas en términos de altitud, es decir, se tiene que las muestras más empobrecidas se hallan a en altitudes altas y bajas, por lo que existirían otros parámetros que generan estas variaciones, como puede ser la continentalidad y diferencias meteorológicas que afecten la temperatura de la zona o la cantidad de precipitación (Dansgaard, 1964).

Una observación sobre las aguas superficiales menos empobrecidas es que se alejan por debajo de la Línea de Agua Meteórica, estas aguas han experimentado un proceso de evaporación a medida que fluyen en contacto con la atmósfera enriqueciéndose de isótopos estable y generando una pendiente distinta a la de la Línea de Agua Meteórica (Clark, 2015).

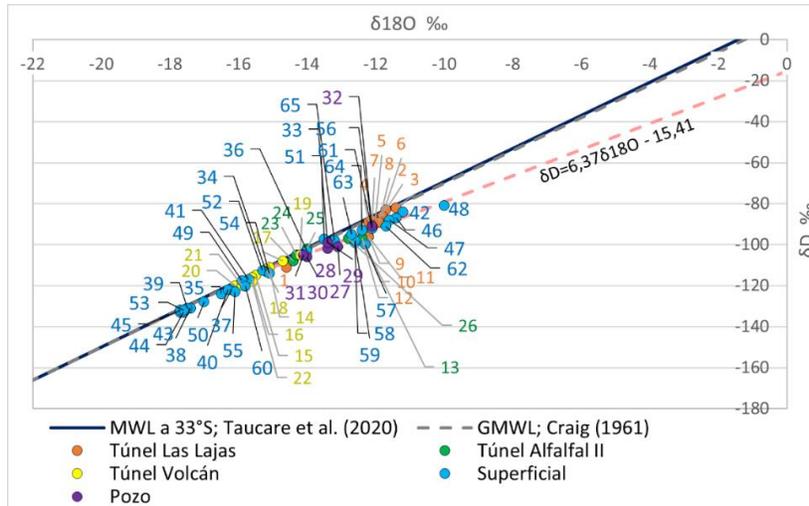


Figura 39: Gráfico de isótopos del agua, relación entre  $\delta D$  vs  $\delta 18O$  para aguas subterráneas, superficiales y de pozo, Línea de Agua Meteórica (MWL) a los  $33^{\circ} S$  (Taucare et al., 2020) y Línea de Agua Meteórica Global (Craig, 1961). Datos obtenidos de SRK (2020).

La relación entre  $\delta 18O$  y la altitud revela la altura a la que fueron precipitadas las aguas al interceptar los valores de  $\delta 18O$  con la variación vertical del contenido isotópico a los  $33^{\circ} S$  representada por la línea  $\nabla \delta 18O = -0.3\text{‰}(\delta 18O)/100m$  (Taucare et al., 2020). Las muestras del túnel Las Lajas y las muestras n° 13 y 26 del túnel Alfalfal II, justamente del área norte, fueron precipitadas entre los 1800 y 2200 m.s.n.m., a excepción de la muestra n° 1 que fue precipitada a los 2900 m.s.n.m., estas muestras se encuentran en promedio a los 1000 m.s.n.m. por lo que han recorrido entre 800 y 1200 m en la vertical para llegar a su posición, el caso de la muestra n° 1 es anómalo debido ha bajado 2000 m desde su punto de precipitación aproximadamente. Las muestras 23, 24 y 25 del túnel Alfalfal II fueron precipitadas entre los 2700 y 2800 m.s.n.m. y se encuentran a los 2500 m.s.n.m. por lo que han recorrido tan solo 200 m en la vertical, mientras que las muestras del túnel Volcán fueron precipitadas entre los 2700 y 3300 m.s.n.m y se encuentran a los 2500 m, de manera que han recorrido entre 200 y 800 m en la vertical hasta su posición.

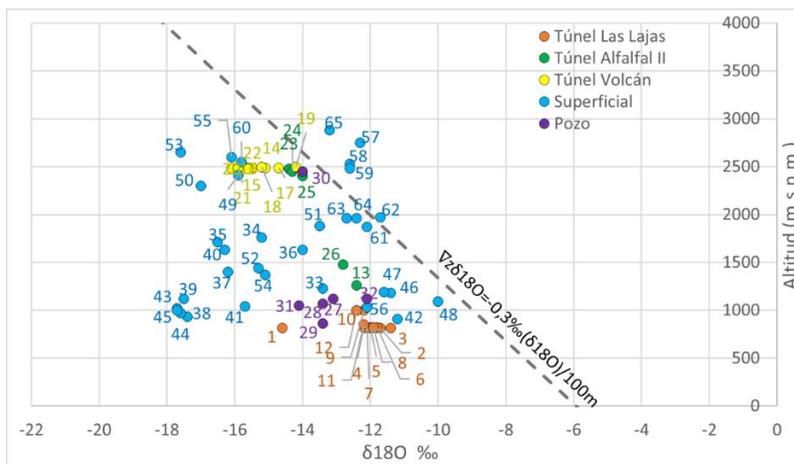


Figura 40: Gráfico de isótopos del agua, relación entre  $\delta 18O$  vs altitud para aguas subterráneas, superficiales y de pozo. Datos obtenidos de SRK (2020).

Finalmente, se analizaron los valores del isótopo radiactivo tritio ( $^3\text{H}$ ) procedentes del estudio de SRK (2020), este se mide en Unidades de Tritio (UT), este isótopo permite datar las aguas en una escala de décadas ya que su periodo radioactivo es 12,32 años (Lucas y Unterweger, 2000). La concentración de tritio en las aguas subterráneas muestreadas deriva de lo que sucede en la atmósfera, es allí donde se produce naturalmente este isótopo, por la interacción de radiación cósmica con los componentes atmosféricos, en esta reacción se une al ciclo hidrológico (Rozanski et al., 1991).

En las décadas de 1950 y 1960 por la acción antropogénica las concentraciones de Tritio en la atmósfera aumentaron significativamente, debido a ensayos de bombas nucleares en el hemisferio norte principalmente, siendo esta la mayor causa directa de producción de Tritio (Mason et al., 1982), sin embargo, gracias al dinamismo del ciclo hidrológico, datos de precipitación han demostrado que el tritio producido por bombas ha sido removido casi por completo para el año 1991 (Rozanski et al., 1991), por lo que para la actualidad las concentraciones ya corresponden a las naturales.

La Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) y la Organización Meteorológica Mundial (WMO) en conjunto han generado una Red Global de Isótopos en Precipitación (GNIP) con el fin de monitorear los isótopos estables y radioactivos de las precipitaciones en todo el mundo. Para tener una idea de los niveles de UT en el área de estudio se graficaron los promedios anuales ponderados por precipitación para los datos disponibles en estaciones cercanas (Figura 41), la estación Santiago posee 16 datos entre los años 1965 y 1975 y la estación Mendoza en territorio argentino con datos continuos entre los años 1980 y 1987, además se recopilamos los datos de la estación Kaitoke en Nueva Zelanda debido a su continuidad entre 1960 a 2011 y porque se encuentra en el hemisferio sur, por lo que tiene una similitud respecto a la evolución de los valores (IAEA/WMO, 2021). Se realizó una regresión entre los valores de tritio en Kaitoke y Santiago/Mendoza (Figura 42) con el fin de generar una línea continua de lo que serían los valores de tritio en la zona de estudio (Figura 43), debido a que la regresión posee un coeficiente de determinación no muy cercano a 1 ( $R^2=0,6178$ ) los valores deben tomarse como un estimado. Los resultados arrojan que las concentraciones de tritio en la actualidad se aproximan a los 10 UT en la zona cercana al área de estudio.

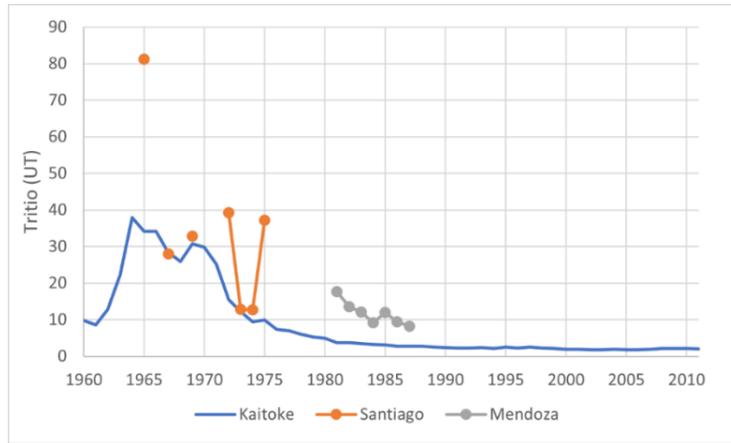


Figura 41: Gráfico de evolución en el tiempo del Tritio (UT) para las estaciones en Santiago, Mendoza y Kaitoke. Datos obtenidos de IAEA/WMO (2021).

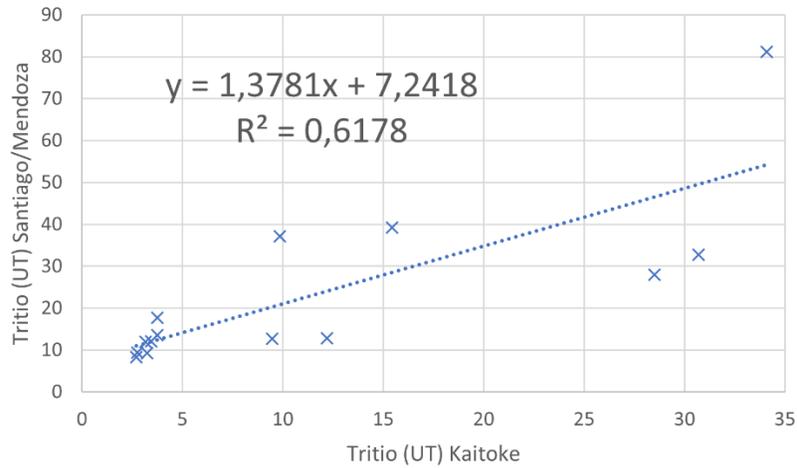


Figura 42: Gráfico de regresión entre estación Kaitoke y Santiago/Mendoza. Datos obtenidos de IAEA/WMO (2021).

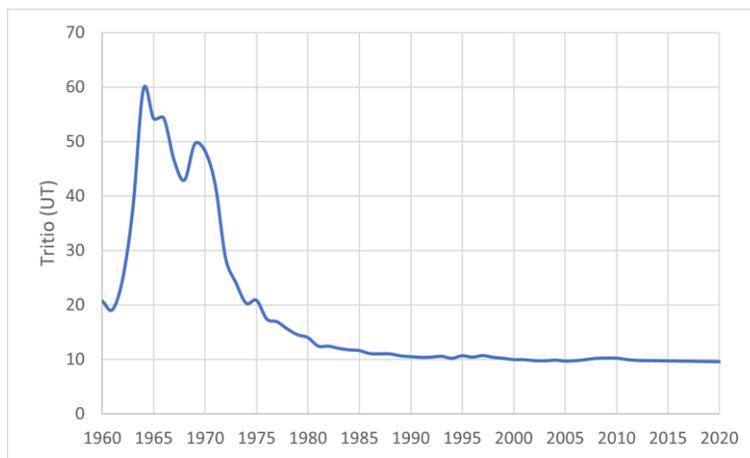


Figura 43: Gráfico de evolución en el tiempo del Tritio (UT) a partir de regresión en el área de estudio. Datos obtenidos de IAEA/WMO (2021).

Las aguas afloradas en túneles tiene niveles de tritio por debajo de los 3 UT (Figura 44), con su mayoría por debajo de los 0,5 UT, que es el límite de detección del análisis, esto quiere decir que en estas muestras de agua el tritio ya decayó a niveles indetectables, pudiendo ser valores menores a 0,5. Asumiendo un valor aproximado de 10 UT como valor inicial, utilizando la ley de decaimiento del tritio:  $t = -17,93 \ln(a_t 3H / (a_0 3H))$ ,  $a_t 3H$  es la concentración de tritio en el tiempo  $t$  expresada en UT,  $a_0 3H$  es la concentración de tritio en un inicio y  $t$  es el tiempo expresado en años (Clark, 2013). Utilizando esta fórmula, se calcularon las posibles edades que tendrían las muestras tomadas en los túneles (Figura 45), los resultados señalan que las muestras con valores de 0,5 UT, es decir bajo el límite de detección instrumental, tienen edades superiores a los 60 años, por otro lado, las muestras con valores intermedios, entre 0,5 y 3 UT tienen edades que varían entre los 20 y 50 años, pudiendo algunas muestras tener dos rangos de edades posibles, esto debido a la curva de evolución del tritio, como sucede con las muestras n° 1, 16, 17 y 19, justamente las muestras con mayor concentración de tritio.

El hecho de que existan muestras de agua próximas con edades distintas indica que puede haber diferentes flujos en la circulación por roca fracturada y con distintos tiempos de tránsito. Las muestras n° 1 y 19 son las tomadas a menor profundidad, menos de 200 m (Figura 46), justamente son aquellas con valores de UT mayores a muestras próximas, por lo que se infiere que su circulación por roca fracturada ha sido de un menor tiempo de tránsito.

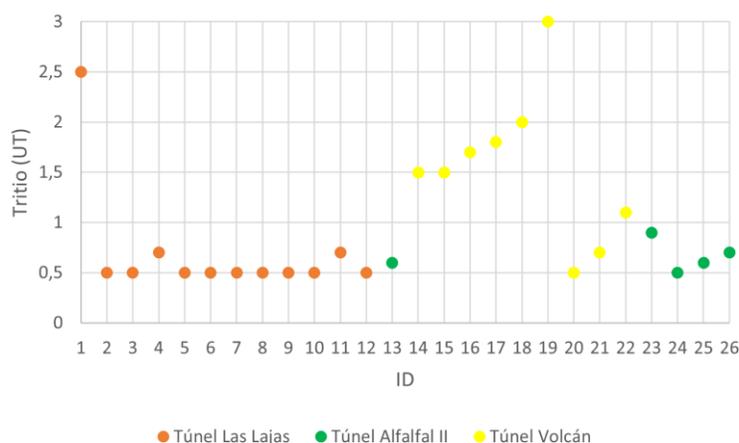


Figura 44: Gráfico de Tritio (UT) para aguas afloradas en túneles, con límite de detección de 0,5. Datos obtenidos de SRK (2020).

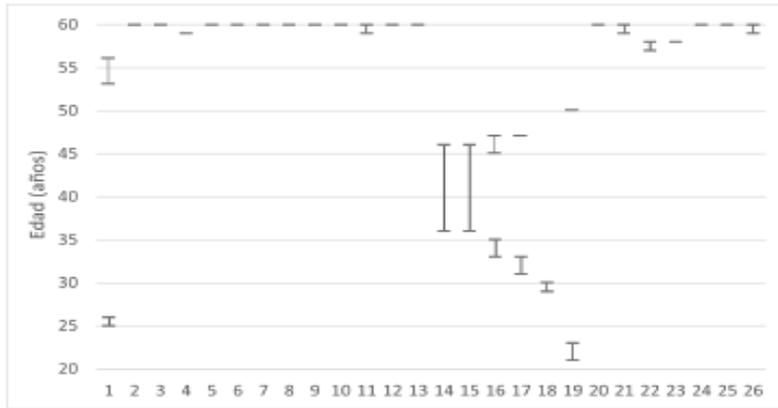


Figura 45: Gráfico de edades estimadas para aguas afloradas en túneles. Datos obtenidos de SRK (2020).

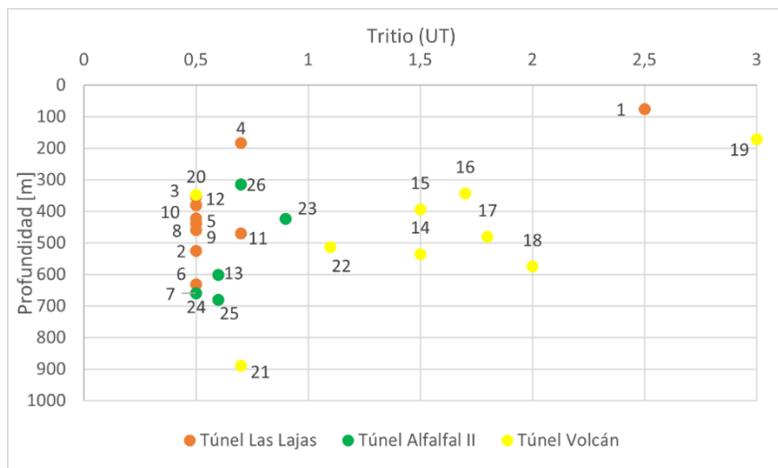


Figura 46: Gráfico de Tritio (UT) vs profundidad para aguas afloradas en túneles, con límite de detección de 0,5. Datos obtenidos de SRK (2020).

## 5.4. Análisis topológico

Luego del mapeo remoto de lineamientos morfoestructurales, se descartaron aquellos trazos que tuvieran una longitud menor a dos kilómetros, obteniendo la siguiente red de lineamientos (Figura 47). Esta red consta de 272 lineamientos digitalizados, respecto a su orientación, las direcciones NS y NW son las que se repiten con más frecuencia, por último, está la dirección NE. Más específicamente, la orientación NS-N10°E es la que más se repite, seguida de la orientación N50°W-N70°W, como se puede observar en el diagrama de rosas.

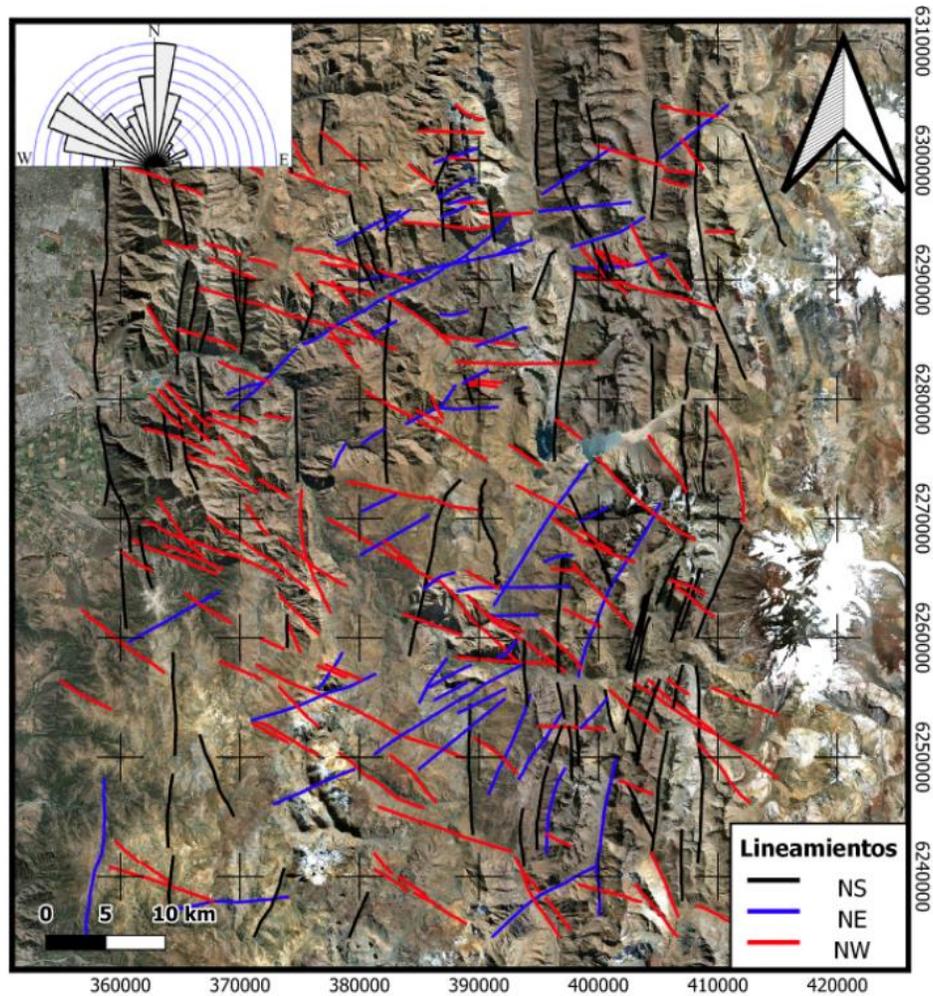


Figura 47: Mapa con lineamientos morfoestructurales con sus orientaciones aproximadas junto a Diagrama de rosas con orientación de red de lineamientos con separación de 10°.

A partir de esta red de lineamientos se continuó extrayendo los nodos y ramas mediante la herramienta NetworkGT (Nyberg et al., 2018). Se consiguieron 662 nodos, divididos en 507 nodos I, 35 nodos Y y 120 nodos X, y 525 ramas, divididas en 92 I-I, 305 C-I y 128 C-C (Figura 47).

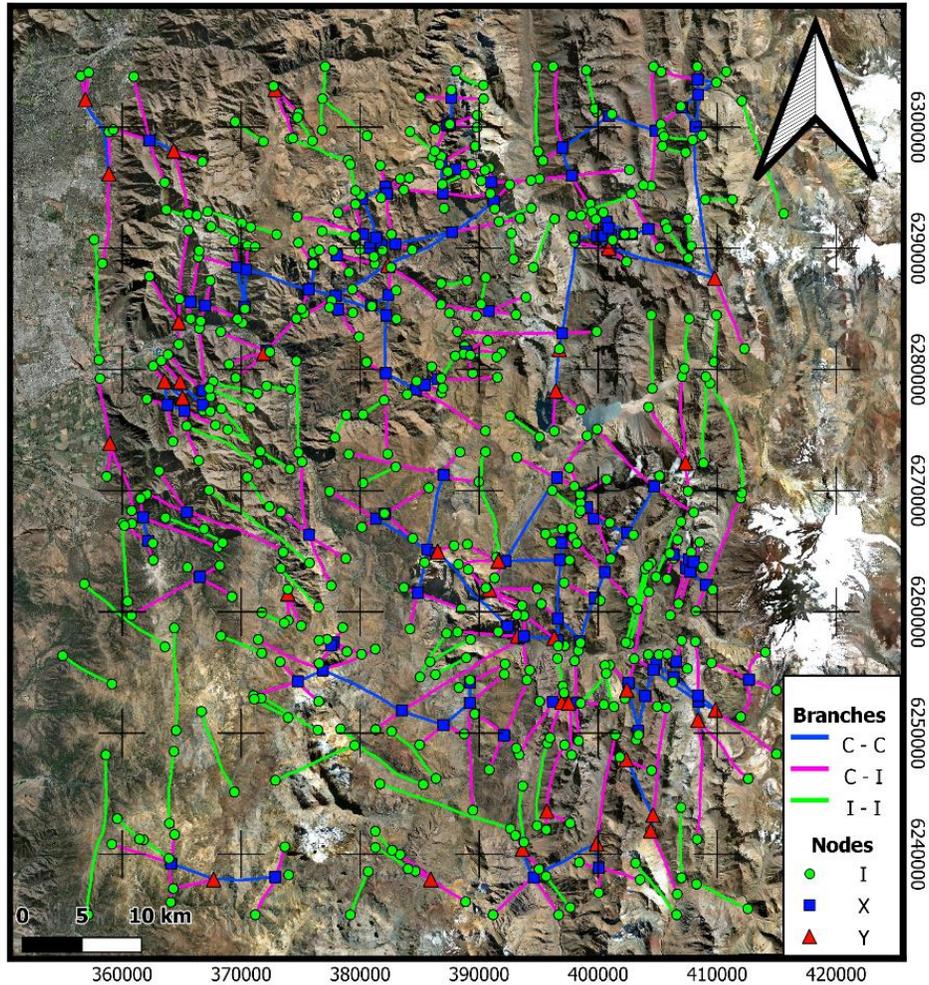


Figura 48: Mapa con caracterización topológica de la red de lineamientos.

Siguiendo con el análisis topológico, se obtuvieron tres mapas graduados cuantificando distintos parámetros: i) mapa con número de nodos, corresponde a la suma de los nodos I, Y y X dentro del área de influencia de cada celda (Figura 49), ii) mapa con número de conexiones, corresponde a la suma de nodos conectados, es decir, nodos Y y X en el área de influencia de cada celda (Figura 50), y iii) mapa con intensidad de fractura, corresponde a una razón entre la suma de las longitudes de los lineamientos dentro del área de influencia (Figura 51).

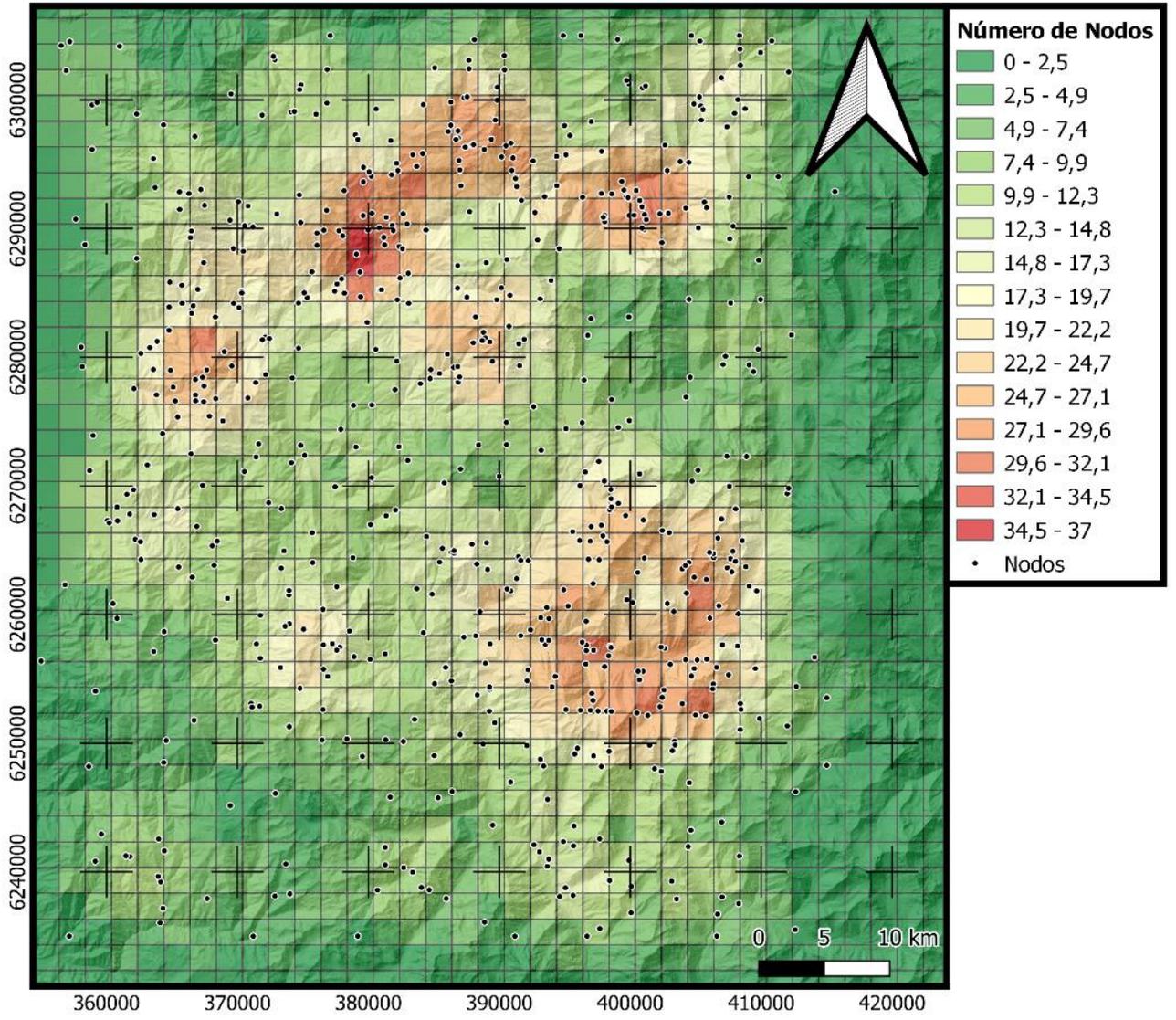


Figura 49: Mapa con análisis topológico: número de nodos (nodos I + nodos Y + nodos X).

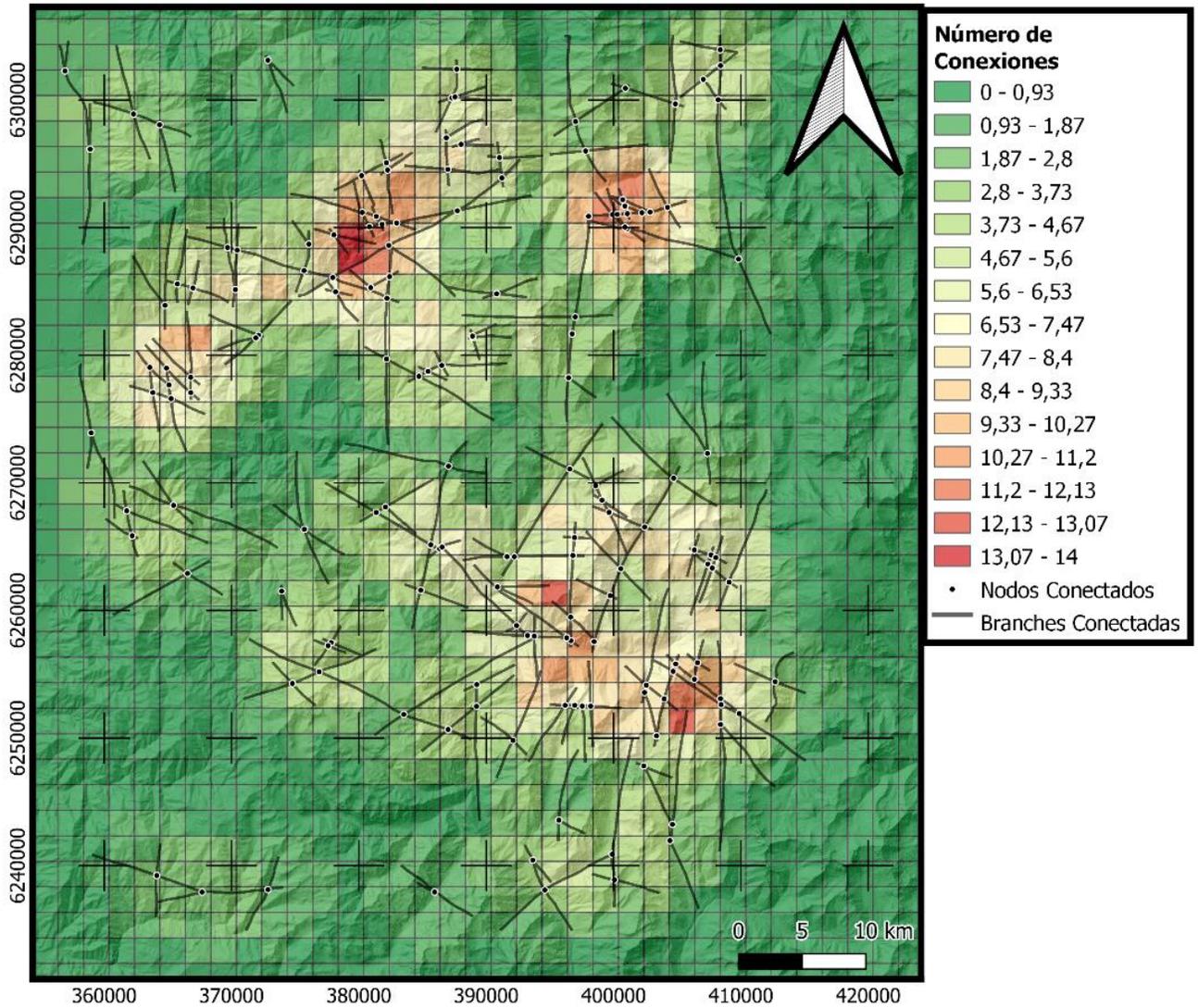


Figura 50: Mapa con análisis topológico: número de conexiones (nodos Y + nodos X).

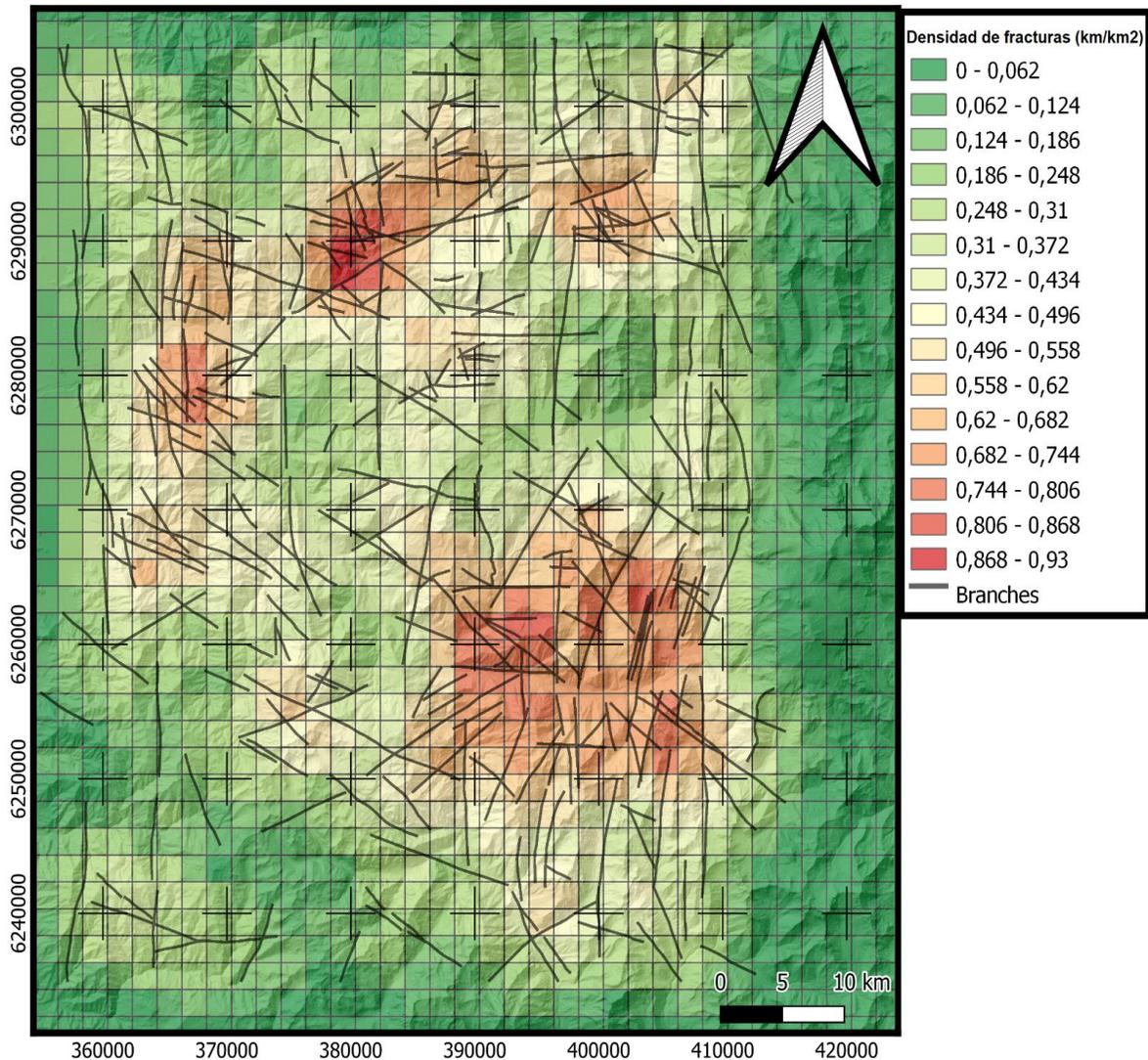


Figura 51: Mapa con análisis topológico: densidad de fracturas, razón entre la suma de las longitudes de los lineamientos y el área de influencia.

Para los resultados obtenidos del análisis topológico de la red de lineamientos, se debe considerar que el mapeo de estos se realizó totalmente de forma remota. A pesar de la ausencia de una corroboración en terreno de la red mapeada, la resolución espacial de la imagen satelital y del Modelo de Elevaciones Digitales (DEM) utilizados es de 2,38 m x 2,38 m y 12,5 m x 12,5 m respectivamente, lo que se considera adecuado para la escala de mapeo, considerando que los lineamientos mapeados son de una longitud mínima de 2 kilómetros. Sumado a esto, los resultados del análisis geométrico de los lineamientos son claros (Figura 47), las direcciones N-S y NW son cuantitativamente las preferentes como indica la moda, lo que tiene sentido geológico y estructural considerando el contexto de la zona de estudio. De hecho, esta se encuentra la Faja Corrida y Plegada del Aconcagua, ejemplo de un cinturón Andino de piel fina (Ramos, 1988; Kozlowski et al., 1993; Cegarra y Ramos, 1996; Ramos et al., 1996), y sus estructuras, principalmente fallas y

planos axiales, tiene una orientación dominante de N-S en la Cordillera Principal Oriental (Armijo et al., 2010; Farias et al., 2010), incluso en el frente de la Cordillera Principal Occidental se tiene una orientación preferente N-S con la falla San Ramón (Vargas et al., 2014). Respecto a la dirección NW se tienen varios antecedentes, en primer lugar, el área de estudio se encuentra próximo al norte de un sistema de falla a escala litosférica llamado Sistema de Fallas Piuquencillo (Piquer et al., 2021). Además, este sistema de forma parte de una estructura de margen-transversal más grande, la zona de deformación del Maipo, una discontinuidad a escala continental que atraviesa todo el margen continental chileno y ha estado activa al menos desde el Jurásico y está asociada a la dorsal de Juan Fernandez (Yañez et al., 2002; Piquer et al., 2020), esta zona se caracteriza por estructuras NW y NE de gran escala, las que se han identificado incluso bajo la cuenca de la Depresión Central mediante métodos de exploración geofísica (Yañez et al., 2015).

La presencia de estructuras oblicuas en Chile Central y su relación con la circulación de algún tipo de flujo ha sido estudiada por diversos autores. Oyarzun et al. (2017) en la Región de Coquimbo mediante métodos gráficos, estadísticos y geoestadísticos relaciona patrones estructurales, de orientación NW y NE, con la presencia de pozos y manantiales; Piquer et al. (2019) halló en la Cordillera de Chile Central zonas de daño cortical, mediante estudios geofísicos y datos estructurales demuestra que la arquitectura de la Cordillera Principal en esta latitud está definida por sistemas de fallas oblicuas, de orientación NW y NE, que interceptan al eje del arco magmático N-S, generando zonas de daño con una alta permeabilidad que permite el flujo ascendente de fluidos hidrotermales y magmas en la corteza superior, estas zonas constituyen el sitio de emplazamiento de complejos intrusivos en el Neógeno, de pórfidos de Cu-Mo de gran tamaño, centros volcánicos activos e incluso define la ubicación de sismos corticales, Taucare et al. (2020b) relaciona parámetros topológicos entre los manantiales de la Zona de Falla de Pocuro (ZFP), en la cuenca del Aconcagua, con fracturas detectadas de manera remota y comprobadas en terreno, demostró que la ZFP en el Frente de la Cordillera Occidental representa una zona de circulación, y que las fallas oblicuas del basamento permiten el drenaje de agua subterránea desde la Cordillera Principal hacia el acuífero aluvial adyacente de la Depresión Central, estos resultados se plasman en un nuevo modelo hidrogeológico en el Frente Andino Occidental (Figura 52) en el cual la impermeabilidad de la Cordillera Andina es puesta en duda. Dado estos antecedentes, la posibilidad de que existan zonas de alta densidad de fracturas en la Cordillera Principal que permitan la infiltración, circulación y un posible almacenamiento en rocas fracturadas no son nulas.

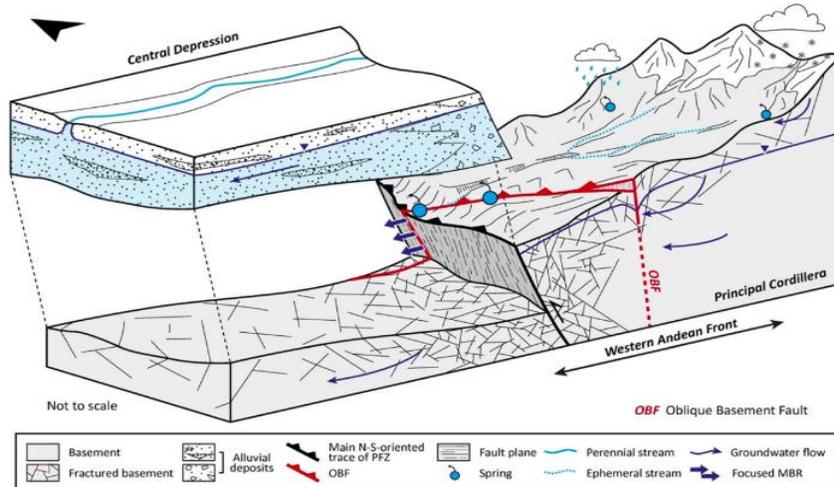


Figura 52: Diagrama hidrogeológico del Frente Andino Occidental, se destaca el rol de las fallas oblicuas del basamento en la circulación de las aguas subterráneas provenientes de la Cordillera Principal y la recarga de los acuíferos aluviales adyacentes. Tomado de Taucare et al. (2020b).

Los resultados del análisis topológico, número de conexiones y densidad de fracturas, han identificado algunas zonas de interés, donde ambos parámetros coinciden. Estas zonas han sido aisladas y mapeadas en las Figuras 53 y 54, junto a las muestras de aguas subterráneas de los túneles de la hidroeléctrica Alto Maipo y fallas identificadas en el área de estudio.

En los mapas se pueden identificar a grandes rasgos dos zonas de interés, la primera al norte del área de estudio asociada a la traza NE que genera el río Colorado, y la segunda al sur, en los alrededores del río Volcán.

La primera zona asociada al río Colorado, forma un área alargada de dirección NE con el río al centro, para el parámetro de densidad de fracturas esta forma se aprecia de mejor manera (Figura 54), mientras que el número de conexiones muestra áreas aisladas (Figura 53), esta zona no pareciera estar afectada por el cambio de Formaciones geológicas o fallas identificadas, sino más bien la intersección de lineamientos NW, los que dominan la zona, con la traza NE que genera el valle del río Colorado.

Por otro lado, la zona de interés ligada al río Volcán estaría asociada a un control estructural, esto se puede deducir a partir de la diferencia entre los mapas (Figura 53 y 54), los lineamientos en esta zona en su mayoría son NS y desconectados entre sí, pero si abundan y están asociados a la Faja Corrida y Plegada del Aconcagua, que posee fallas y planos axiales en esta dirección, como los sistemas de Fallas Chacayes-Yesillo y El Diablo.

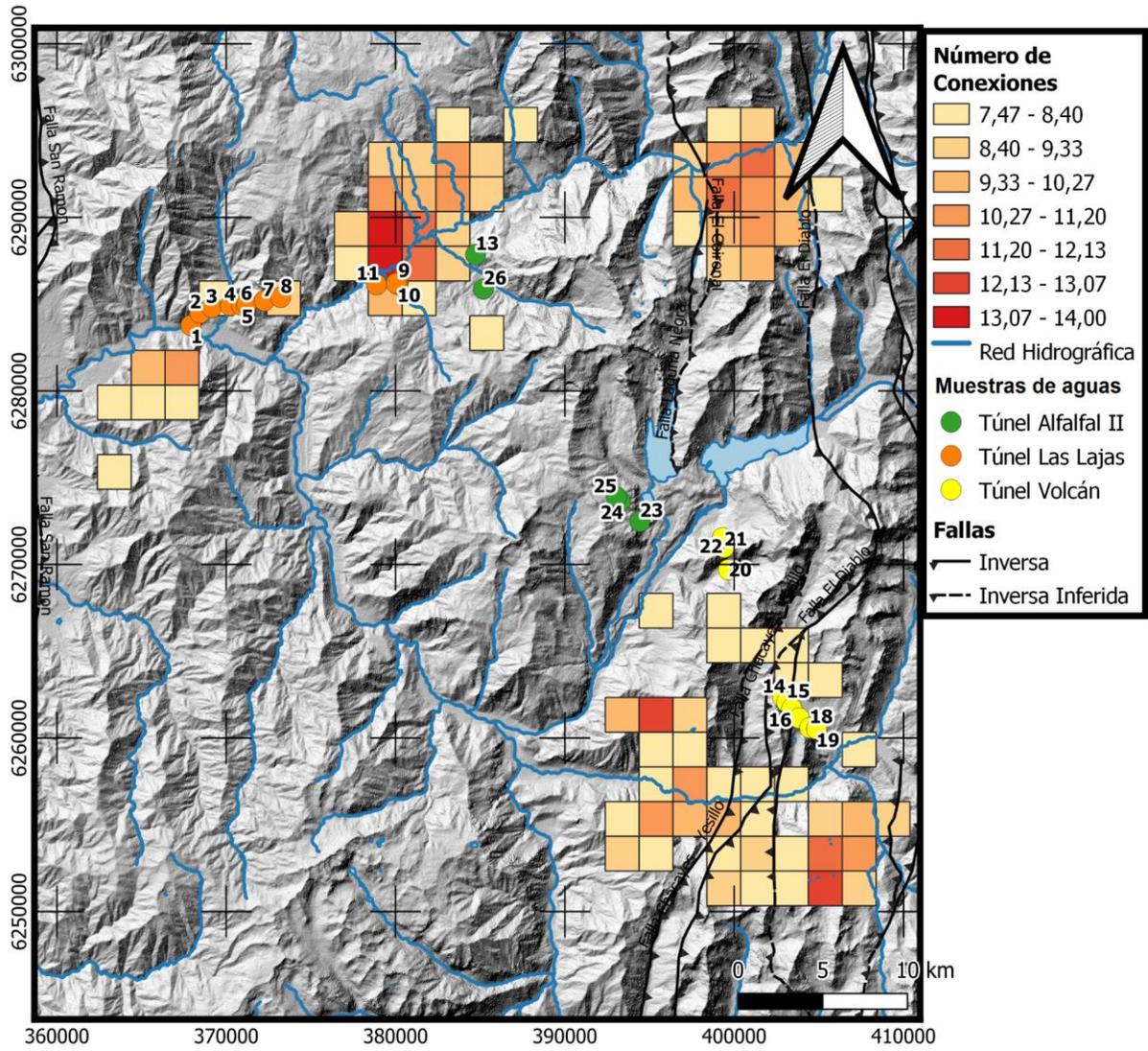


Figura 53: Mapa con zonas de interés a partir de número de conexiones, muestras de aguas subterráneas en túneles de hidroeléctrica Alto Maipo y fallas identificadas en la zona de estudio.

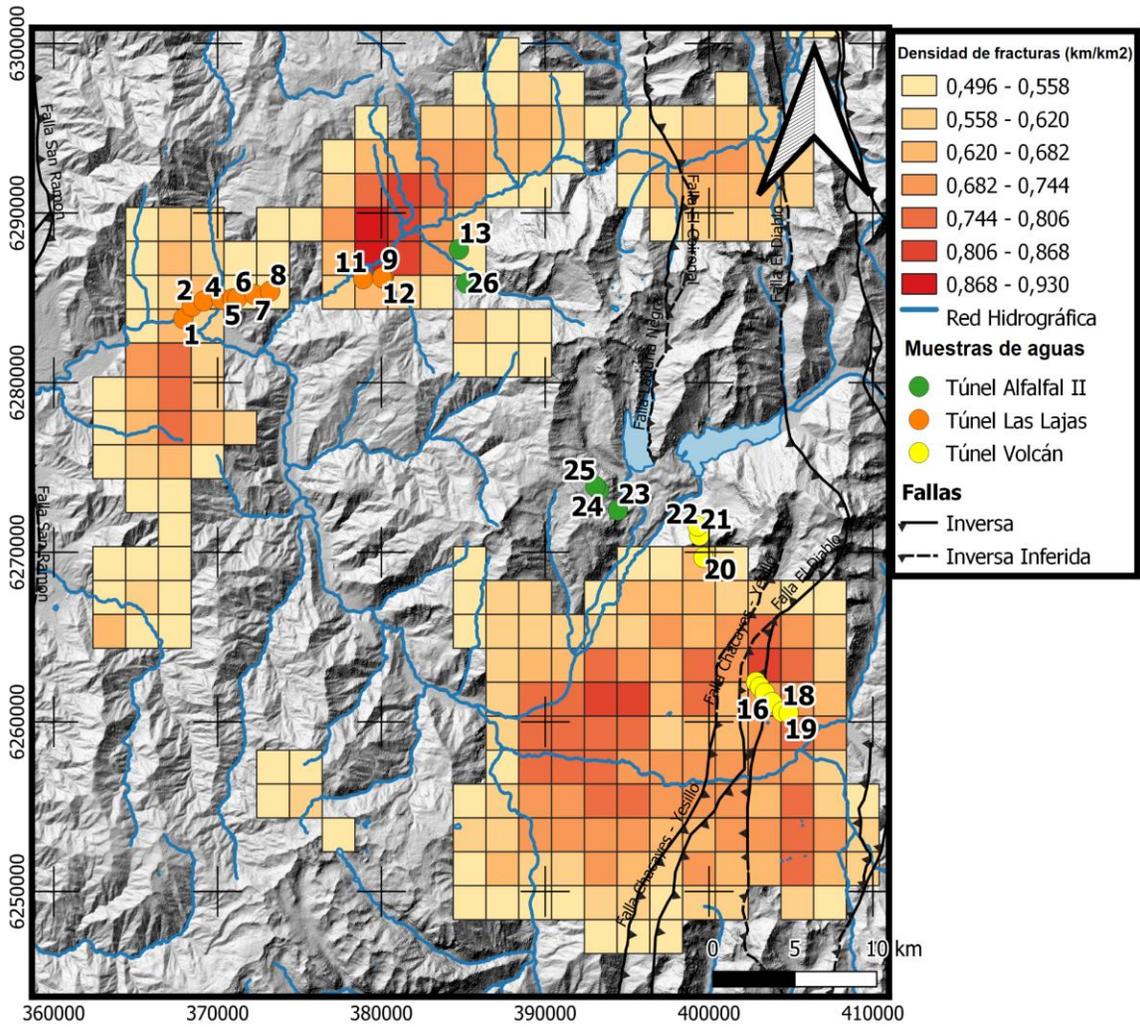


Figura 54: Mapa con zonas de interés a partir de intensidad de fracturas, muestras de aguas subterráneas en túneles de hidroeléctrica Alto Maipo y fallas identificadas en la zona de estudio.

## 6. CONCLUSIONES

Esta memoria de título ha analizado los antecedentes disponibles de la principal zona de abastecimiento de agua a la ciudad de Santiago, el Cajón del Maipo, con el fin de evaluar la posible circulación y almacenamiento en las rocas fracturadas. En primera instancia, se analizaron las condiciones hidroclimáticas de la zona de estudio entre los años 1991 a 2021 considerando especialmente el contexto de sequía por la cual está pasando la zona norte y centro del país. Los resultados muestran que la precipitación medida en los últimos 10 años, ha disminuido más del 40%, la cobertura de nieve a disminuido en un 26,6%, la isoterma 0 ha ascendido más de 200 metros y el caudal de la cuenca Maipo Alto ha bajado un 37% considerando los mismos periodos.

Los datos físicoquímicos disponibles corroboran la existencia de un sistema hidrogeológico complejo, donde las muestras de agua tomadas en los túneles, en superficie y en pozos forman un amplio espectro composicional que sugiere la conexión entre diferentes ambientes hídricos estudiados.

Los valores de conductividad eléctrica medidos son inferiores a 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para todas las muestras de agua, con la anomalía de las muestras 24 y 25 del túnel Alfalfal II que tienen valores de 5450 y 7690  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente. La conductividad eléctrica de las muestras de agua revela la tendencia a aumentar a medida que disminuye la cota (muestras de aguas superficiales y de pozo) o aumente la profundidad (muestras de agua en los túneles), aunque existen muestras que no siguen esta pauta revelando un esquema de circulación de diferentes patrones.

Los diagramas de Piper y Stiff señalan que las muestras de agua superficial y de pozo tienen una clara tendencia a ser del tipo sulfatada cálcica, con algunas excepciones del tipo clorurada. En cambio, las muestras de los túneles poseen diferencias químicas a pesar de estar próximas, por ejemplo, en la sección oeste del túnel Las Lajas se tienen muestras de agua del tipo sulfatada cálcica y bicarbonatada cálcica. Lo mismo sucede en el túnel Volcán con aguas del tipo bicarbonatada cálcica y sulfatada sódica en la sección noroeste y sulfatada cálcica y bicarbonatada sódica en la sección sureste. Mientras que en la sección este del túnel Las Lajas y noroeste del túnel Alfalfal II las aguas mantienen su huella química del tipo bicarbonatada/clorurada sódica.

Los isótopos estables del agua  $\delta\text{D}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  de las muestras de los túneles, solo las muestras n° 9, 10, 11, 12,13 y 14 han sido afectadas por la evaporación antes de infiltrarse en rocas fracturadas. Se pueden diferenciar dos grupos que relacionan el empobrecimiento isotópico con su distribución espacial como una consecuencia de las distintas cotas a las que fueron precipitadas. El isótopo radiactivo tritio revela la existencia de aguas con edades superiores a los 60 años (muestras con valores de UT bajo el límite de detección) y otras con distintos rangos de edades entre los 20 y 50 años, esto corrobora la complejidad del sistema hidrogeológico al tener una circulación por roca fracturada con distintos flujos y tiempos de tránsito.

La zona de estudio presenta un sistema hidrogeológico complejo donde el rol del agua subterránea no se conoce en detalle. La presencia de agua subterránea en roca fracturada se da en diferentes zonas y a distinta profundidad tal como lo evidencian los afloramientos de agua al interior de los túneles de la hidroeléctrica Alto Maipo donde se han interceptado flujos en diferentes puntos, a una profundidad entre los 100 y 900 m.

Esto confirma la existencia de una circulación de agua en las rocas fracturadas de la Cordillera Principal de Los Andes, que ocurre por la permeabilidad secundaria que adquieren las litologías fisuradas y fracturadas. Estas características hidrogeológicas, históricamente no han sido consideradas para estudios de detalle y han sido poco exploradas llevando a una extrema simplificación de los modelos conceptuales que han afectado a la comprensión exacta de los mecanismos de recarga de los acuíferos.

Mediante el análisis topológico de redes de fracturas se logró identificar dos zonas potenciales de recarga, identificadas por su alta densidad de y/o conectividad de fracturas. La primera, se encuentra al norte del área de estudio asociada al cauce del río Colorado de dirección NE, y la segunda zona de mayor amplitud, está al sur del área de estudio asociada al dominio estructural de la Faja Corrida y Plegada del Aconcagua entre los ríos Yeso y el Volcán. Se ha encontrado una relación espacial entre las zonas identificadas y los flujos encontrados en los túneles, específicamente los túneles Las Lajas y Volcán.

En conclusión, la presencia de agua subterránea en la Cordillera Principal con diferencia en la composición química e isotópica a pesar de la cercanía entre muestras revela una circulación por roca fracturada con distintos flujos y tiempos de tránsito que permite una diferenciación fisicoquímica en la mineralización de las aguas probablemente debido a los diferentes patrones y tiempos de interacción con la roca. Esta circulación ocurriría por las zonas de la Cordillera donde la densidad y/o conectividad de fracturas es tal que permitiría la recarga y/o circulación de agua por medio de roca fracturada.

Finalmente, si bien se requieren comprobaciones de terreno, que no han sido posibles para la realización de esta memoria, el Cajón del Maipo presenta una hidrogeología compleja que aún no se conoce en detalle. Esta zona es el área de suministro más importante del país, en cuanto a población y es necesario realizar estudios para determinar el funcionamiento real del conjunto agua superficial y agua subterránea para asegurar el suministro de agua en el futuro, como lo sería un estudio detallado en terreno para corroborar los resultados de esta memoria, además de un muestreo más exhaustivo que permita entender la evolución en el tiempo de las aguas de este importante sector cordillerano.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Aguirre, L., 1960. Geología de los Andes de Chile central. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, 9, 70.

Aguirre, R., 1999. Depositación y deformación de la secuencia volcánica terciaria en el sector cordillerano de Pata del Diablo, Cajón del Maipo. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 60 p.

Alvarez, P. P., Aguirre-Urreta, M. B., Godoy, E., & Ramos, V. A., 1997. Estratigrafía del Jurásico de la Cordillera Principal de Argentina y Chile (33° 45'–34° 00' LS). In Vol. 1. VIII Congreso Geológico Chileno, Antofagasta (pp. 425-429).

Álvarez, P.P., Godoy, E., Sellés, D., 2000. Geología de la región del río Colorado, Andes principales de Chile (33° 25' S). Actas IX Congreso Geológico Chileno, Puerto Varas, Vol. 1, p. 736-740.

Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Ayala, A., 2018. The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies—Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 5817-5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>.

Araneda C., M., Avendaño R., M. S., & Díaz Del Río, G., 2019. Modelo estructural de la cuenca de Santiago, Chile y su relación con la hidrogeología. *Revista Geofísica*, (62), 29-48. Recuperado a partir de <https://revistasipgh.org/index.php/regeofi/article/view/541>.

Araneda, M., Avendaño, M., & Merlo, C., 2000. Modelo gravimétrico de la Cuenca de Santiago, etapa III final. In Congreso Geológico Chileno (No. 9, pp. 404-408).

Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., & Kausel, E., 2010. The West Andean thrust, the San Ramon fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2). <https://doi.org/10.1029/2008TC00242>

Barazangi, B., & Isacks, B., 1976. Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca Plate beneath South America. *Geology*, 4, 686-692. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1976\)4<686:SDOEAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1976)4<686:SDOEAS>2.0.CO;2).

Boisier, J.P., Rondanelli, R., Garreaud, R.D. and Muñoz, F., 2016. Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in Central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43, 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>.

Boisier, J.P., Alvarez-Garreton, C., Cordero, R.R., Damian, A., Gallardo, L., Garreaud, R.D., Lambert, F., Ramallo, C., Rojas, M. and Rondanelli, R., 2018. Anthropogenic drying in Central-Southern Chile evidenced by long term observations and climate model simulations. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6, 74. <https://doi.org/10.1525/elementa.328>.

Benavente, O., 2015. Origen y naturaleza de los fluidos de los sistemas volcánicos e hidrotermales activos de los Andes de Chile Central (32.5-36° S)(Tesis de Doctorado). Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

- Benavente, O., Tassi, F., Reich, M., Aguilera, F., Capecchiacci, F., Gutiérrez, F., Rizzo, A., 2016. Chemical and isotopic features of cold and thermal fluids discharged in the Southern Volcanic Zone between 32.5 S and 36 S: Insights into the physical and chemical processes controlling fluid geochemistry in geothermal systems of Central Chile. *Chemical Geology*, 420, 97-113. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2015.11.010>.
- Bustamante, M. A., 2001. El contacto entre la Formación Abanico y las unidades mesozoicas, valle del río Volcán, Región Metropolitana. Memoria, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 54 p.
- Bustamante, M., Silva, C., Vivallos, J., Cortés, R., Pincheira, W., Ortiz, M., Wall, R., 2010. Exploración geológica para el fomento de la energía geotérmica: Área Termas del Plomo, Región Metropolitana de Santiago. Informe Inédito, Subdirección Nacional de Geología, SERNAGEOMIN, Santiago, Chile, Diciembre.
- CADE-IDEPE, 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cuenca del Río Maipo. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Santiago.
- Cegarra, M. I., & Ramos, V. A., 1996. La faja plegada y corrida del Aconcagua. *Geología de la región del Aconcagua, provincias de San Juan y Mendoza*, 24, 387-422.
- Charrier, R., Munizaga, F., 1979. Edades K-Ar de volcanitas Cenozoicas del sector Cordillerano del Río Cachapoal (34° 15' Lat. Sur). Instituto de Investigaciones Geológicas, *Revista Geológica de Chile*, N° 7, p. 41-51.
- Charrier, R., & Muñoz, N., 1994. Jurassic Cretaceous Palaeogeographic evolution of the Chilean Andes at 23–24 S latitude and 34–35 S latitude: A comparative analysis. In *Tectonics of the southern Central Andes* (pp. 233-242). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-77353-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-642-77353-2_16).
- Charrier, R., Wyss, A., Flynn, J. J., Swisher III, C. C., Norell, M. A., Zapatta, F., ... & Novacek, M. J., 1996. New evidence for late Mesozoic-early Cenozoic evolution of the Chilean Andes in the upper Tinguiririca valley (35 S), central Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 9(5-6), 393-422. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(96\)00035-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(96)00035-1).
- Charrier, R., Baeza, O., Elgueta, S., Flynn, J. J., Gans, P., Kay, S. M., Zurita, E., 2002. Evidence for Cenozoic extensional basin development and tectonic inversion south of the flat-slab segment, southern Central Andes, Chile (33–36 SL). *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), 117-139. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00009-3](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00009-3)
- Charrier, R., Álvarez, P., Zurita, E., 2002b. Hallazgo de Jurásico marino en la Faja Plegada y Corrida del Río Las Leñas, Alta Cordillera de Chile (34° 30'S). In *Proceedings 15th Congreso Geológico Argentino*.
- Charrier, R., Bustamante, M., Comte, D., Elgueta, E., Flynn, J., Iturra, I., Muñoz, N., Pardo, M., Thiele, R., Wyss, A., 2005. The Abanico extensional basin: Regional extension, chronology of tectonic inversion, and relation to shallow seismic activity and andean uplift. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abh.* 236, (1-2): 43-77. <https://doi.org/10.1127/njgpa/236/2005/43>.
- Clark, I. D., & Fritz, P., 2013. *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC press.

- Clark, I., 2015. *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. 1st ed. CRC Press <https://doi.org/10.1201/b18347>.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science* 133 (3465), 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>.
- Cornejo, P. C., & Mahood, G. A., 1997. Seeing past the effects of re-equilibration to reconstruct magmatic gradients in plutons: La Gloria Pluton, central Chilean Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127(1), 159-175. <https://doi.org/10.1007/s004100050273>.
- Dansgaard, W., 1964. Stable isotopes in precipitation. *tellus*, 16(4), 436-468. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v16i4.8993>.
- Davidson, J., 1971. Tectónica y paleogeografía de la Cordillera Principal en el área de las Nacientes del Teno, Curicó, Chile. Memoria de Título, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- DGA, 1986. Mapa Hidrogeológico de Chile. Escala 1: 2.500.000. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile.
- DGA, 2004. Determinación de la disponibilidad de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en la cuenca del río Maipo hasta la confluencia con el estero Puangue. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile.
- DGA, 2020. Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile. <https://snia.mop.gob.cl/BNAConsultas/reportes>
- DGA, 2021. Derechos de aprovechamiento de aguas registrados en DGA. Dirección General de Aguas (DGA), Santiago, Chile.
- DPRH, 2015. Política Nacional para los Recursos Hídricos. Santiago, Chile.
- Farías, M., Comte, D., Charrier, R., Martinod, J., & David, C. (2010). Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building. *Tectonics*, 29, TC3006. <https://doi.org/10.1029/2009TC002480>.
- Fock, A., 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile Central entre los 33° y los 34°S (Tesis optar al grado de Doctor). Facultad De Ciencias Físicas y Matemáticas Departamento De Geología; Universidad de Chile.
- Fock, A., Charrier, R., Farías, M., & Muñoz, M., 2006. Fallas de vergencia oeste en la Cordillera Principal de Chile Central: Inversión de la cuenca de Abanico (33-34 S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina, Publicación Especial*, 6, 48-55.
- Gana, P., & Wall, R., 1997. Evidencias geocronológicas  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  y K-Ar de un hiatus cretácico superior-eoceno en Chile central (33-33° 30'S). *Andean Geology*, 24(2), 145-163. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV24n2-a02>.
- Gana, P., Sellés, D., & Wall, R., 1999. Mapa geológico area Tiltill-Santiago, región metropolitana, Mapas Geol.11, scale 1:100,000, Serv. Nac. de Geol. y Miner., Santiago.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garretón, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., 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>.

Geoestudios Ltda., 2011. Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile Central.

Giambiagi, L., 2000. Estudio de La evolución tectónica de la Cordillera Principal de Mendoza en el sector comprendido entre los 33°30'0 y los 33°45'0 Latitud Sur (PhD thesis), Universidad de Buenos Aires (255 p).

Giambiagi, L. B., Tunik, M. A., & Ghiglione, M., 2001. Cenozoic tectonic evolution of the Alto Tunuyán foreland basin above the transition zone between the flat and normal subduction segment (33 30'–34 S), western Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 14(7), 707-724. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00059-1](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00059-1).

Giambiagi, L. B., & Ramos, V. A., 2002. Structural evolution of the Andes in a transitional zone between flat and normal subduction (33 30'–33450S), Argentina and Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), 101–116

Giambiagi, L. B., 2003. Deformación cenozoica de la faja plegada y corrida del Aconcagua y Cordillera Frontal: entre los 33° 30'y 33° 45'S. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58(1), 85-96.

Giambiagi, L. B., Alvarez, P. P., Godoy, E., & Ramos, V. A., 2003b. The control of pre-existing extensional structures on the evolution of the southern sector of the Aconcagua fold and thrust belt, southern Andes. *Tectonophysics*, 369(1-2), 1-19. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00171-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00171-9).

Godoy, E., Yáñez, G., Vera, E., 1999. Inversion of an Oligocene volcano-tectonic basin and uplifting of its superimposed Miocene magmatic arc in the Central Chilean Andes: first seismic and gravity evidences. *Tectonophysics*, Vol. 306, N° 2, p. 217-236. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00046-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00046-3).

González, O. L., 1963. Observaciones geológicas en el valle del río Volcán (No. 3).

Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A., 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>.

Hauser, A., 1997. Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile (No. 50). Servicio Nacional de Geología y Minería.

HIDROMAS, 2018. Modelo hidrogeológico Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo.

IAEA/WMO, 2021. Global network of isotopes in precipitation. The GNIP Database <http://nucleus.iaea.org/wiser>.

IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S.

- Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
- Jing, L., & Stephansson, O., 1997. Network topology and homogenization of fractured rocks. In Fluid flow and transport in rocks (pp. 191-202). Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-94-009-1533-6\\_11](https://doi.org/10.1007/978-94-009-1533-6_11).
- Kay, S. M., & Kurtz, A., 1995. Magmatic and tectonic characterization of the El Teniente region. Unpublished report, CODELCO.
- Klohn, C., 1960. Geología de la Cordillera de los Andes de Chile Central, Provincia de Santiago, Colchagua y Curicó. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Boletín N° 8, 95 p.
- Kozłowski, E., R. Manceda y V. A. Ramos, 1993. Estructura. En V. A. Ramos (Ed.): Geología y Recursos Naturales de Mendoza. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso Exploración de Hidrocarburos, Relatorio 1 (18): 235-256.
- Lucas, L. L., & Unterweger, M. P., 2000. Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. Journal of research of the National Institute of Standards and Technology, 105(4), 541. <https://doi.org/10.6028/jres.105.043>.
- Martini, S., 2008. Sistemas estructurales y recursos geotermales en la Cordillera Principal de Chile Central: 32° 30' - 34° 00' de Latitud Sur. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile, Santiago.
- Mardones, V., 2016. Análisis estructural de los depósitos mesozoicos y cenozoicos de la Cordillera Principal en el valle del río Volcán, Región Metropolitana, Chile (33°44'-33°56'S). (Tesis para optar al título de geólogo). Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Mardones, V., 2019. Evolución tectónica meso-cenozoica de la Cordillera Principal de los Andes de Chile central, 33°30'S-34°S. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Martinez, R., & Osorio, R., 1963. Consideraciones preliminares sobre la presencia de Carófitas fósiles en la Formación Colimapu.
- Markovich, K.H., Manning, A.H., Condon, L.E., McIntosh, J.C., 2019. Mountain-block recharge: a review of current understanding. Water Resour. Res. 55. <https://doi.org/10.1029/2019WR025676>.
- Mason, A. S., Hut, G., Telegadas, K., 1982. Stratospheric HTO and 95Zr residence times. Tellus, 34(4), 369-375. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1982.tb01826.x>.
- Montecinos, A., Aceituno, P., 2003. Seasonality of the ENSO-related rainfall variability in central Chile and associated circulation anomalies. J. Clim. 16, 281–296. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016b0281:SOTERRN2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016b0281:SOTERRN2.0.CO;2).
- Mu, Q., Zhao, M., & Running, S. W., 2005. Brief introduction to MODIS evapotranspiration data set (MOD16). Water Resources Research, 45, 0-4.
- Munizaga, F., Vicente, J.C., 1982. Acerca de la zonación plutónica y del volcanismo mioceno en los Andes del Aconcagua (La. 32-33° S): Datos radiométricos K-Ar. Revista Geológica de Chile. N° 16, p. 3-21. <http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV9n2-a01>.

- NOAA/National Weather Service, 2021. El Niño Southern Oscillation (ENSO): Historical El Niño/La Niña Episodes (1950-Present).
- Nyberg B., Nixon C.W., Sanderson D.J., 2018. NetworkGT: a GIS tool for geometric and topological analysis of two-dimensional fracture networks. *Geosphere* 14(4):1618–1634. <https://doi.org/10.1130/GES01595.1>
- Oyarzún, R., Oyarzún, J., Fairley, J.P., Núñez, J., Gómez, N., Arumí, J.L., Maturana, H., 2017. A simple approach for the analysis of the structural-geologic control of groundwater in an arid rural, mid-mountain, granitic and volcanic-sedimentary terrain: the case of the Coquimbo Region, North-Central Chile. *J. Arid Environ.* 142, 31–35. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2017.03.003>.
- Piquer, J., Berry, R. F., Scott, R. J., & Cooke, D. R., 2016. Arc-oblique fault systems: their role in the Cenozoic structural evolution and metallogenesis 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., Yañez, G., Rivera, O., Cooke, D.R., 2019. Long-lived crustal damage zones associated with fault intersections in the high Andes of Central Chile. *Andean Geol.* 46, 223–239. <https://doi.org/10.5027/andgeoV46n2-3106>.
- Piquer, J., Rivera, O., Yañez, G., & Oyarzún, N., 2021. The Piuquencillo fault system: a long-lived, Andean-transverse fault system and its relationship with magmatic and hydrothermal activity. *Solid Earth*, 12(1), 253-273. <https://doi.org/10.5194/se-12-253-2021>.
- Pincetti, G., 2016. Hidrogeoquímica e hidrodinámica de las fuentes termales del río Yeso y río Volcán, Cordillera de Los Andes, Región Metropolitana (Tesis para optar al título de geólogo). Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Polanski, J., 1964. Carta geológico económica de la República Argentina escala 1:200000, Hoja 25 a-b- Volcán de San José, provincia de Mendoza. Descripción geológica de la hoja, Bol. 98, pp. 1–92, Dir. Nac. de Geol. y Min., Buenos Aires.
- Polanski, J., 1972. Carta Geológico Económica de la República Argentina escala 1:200,000, Hoja 24 a-b- Cerro Tupungato, provincia de Mendoza. Descripción geológica de la hoja, Bol. 128, pp. 1–110, Dir. Nac. de Geol. y Min., Buenos Aires.
- Ramos, V. A. The tectonics of the Central Andes: 30 to 33 S latitude, 1988. *Processes In Continental Lithospheric Deformation*, 218. Geological Society of America, GSA, Boulder. Special Paper, 31-54.
- Ramos, V. A., Cegarra, M., & Cristallini, E., 1996. Cenozoic tectonics of the High Andes of west-central Argentina (30–36 S latitude). *Tectonophysics*, 259(1-3), 185-200. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(95\)00064-X](https://doi.org/10.1016/0040-1951(95)00064-X).
- Riesner, M., R. Lacassin, M. Simoes, R. Armijo, R. Rauld, and G. Vargas, 2017. Kinematics of the active West Andean fold-and-thrust belt (central Chile): Structure and long-term shortening rate, *Tectonics*, 36, 287–303. <https://doi.org/10.1002/2016TC004269>.
- Riesner, M., Lacassin, R., Simoes, M., Carrizo, D., & Armijo, R., 2018. Revisiting the crustal structure and kinematics of the Central Andes at 33.5°S: Implications for the mechanics of Andean mountain building. *Tectonics*, 37, 1347–1375. <https://doi.org/10.1002/2017TC004513>

- Risacher, F., Hauser, A., 2008. Catastro de las principales fuentes de aguas termales de Chile. Informe Inédito. SERNAGEOMIN, Santiago, Chile.
- Rivano, S., Sepúlveda, P., Boric, R., & Espiñeira, D., 1993. Hojas Quillota y Portillo, Escala 1:250.000: Santiago, Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, n° 73.
- Rozanski, K., Gonfiantini, R., & Araguas-Araguas, L., 1991. Tritium in the global atmosphere: Distribution patterns and recent trends. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 17(S), S523. <https://doi.org/10.1088/0954-3899/17/S/053>.
- Salazar, C., & Stinnesbeck, W., 2015. Redefinition, stratigraphy and facies of the Lo Valdés Formation (Upper Jurassic-Lower Cretaceous) in central Chile. *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural, Chile*, 64, 41-68.
- SRK Consulting, 2020. Estudio de origen de aguas. Túneles Proyecto Alto Maipo.
- Sellés, D. y Gana, P., 2001, Geología del área Talagante-San Francisco de Mostazal. Escala 1:100.000. Servicio Nacional de Geología y Minería, Serie Geología Básica, v. 4
- Sanderson D.J., Nixon C.W., 2015. The use of topology in fracture network characterization. *J Struct Geol* 72:56–66. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.01.005>.
- Sanderson D.J., Nixon C.W., 2018 Topology, connectivity and percolation in fracture networks. *J Struct Geol* 115:167–177. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.07.011>.
- SEGEMAR, 2000. Carta Geológica a escala 1:250.000, Hoja 3369-I Cerro Aconcagua, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires.
- SEGEMAR, 2010. Carta Geológica a escala 1:250.000, Hoja 3369-III Cerro Tupungato, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires.
- SERNAGEOMIN, 2002. Mapa Geológico de Chile, escala 1: 1.000. 000.
- SERNAGEOMIN, 2003, Carta Geológica de Chile (escala 1:1.000.000): Servicio Nacional de Geología y Minería, v. Publicación Geológica Digital 4.
- Sruoga, P., Etcheverría, M. P., Folguera, A., Repol, D., Zanettini, J. C. M., & Fauqué, L. E., 2000. Hoja Geológica 3569-I Volcán Maipo.
- Taniguchi, M., Endo, A., Gurdak, J. J., & Swarzenski, P., 2017. Water-energy-food nexus in the Asia-Pacific region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 11, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.06.004>.
- Tassara, A., & Yáñez, G., 2003. Relación entre el espesor elástico de la litosfera y la segmentación tectónica del margen andino (15-47 S). *Revista geológica de Chile*, 30(2), 159-186. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082003000200002>.
- 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, 137824. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137824>.
- Taucare, M., Viguier, B., Daniele, L., Heuser, G., Arancibia, G., & Leonardi, V., 2020b. Connectivity of fractures and groundwater flows analyses into the Western Andean Front by means

of a topological approach (Aconcagua Basin, Central Chile). *Hydrogeology Journal*, 28(7), 2429-2438. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02200-3>.

Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Treidel, H., 2013. Ground water and climate change. *Nature climate change*, 3(4), 322-329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>

Thiele, R., & Katsui, Y., 1969. Contribución al conocimiento del volcanismo post-miocénico de los Andes en la Provincia de Santiago, Chile. Universidad de Chile, Departamento de Geología, Publicación, (35), 23.

Thiele, R., 1980. Hoja Santiago, Región Metropolitana: Servicio Nacional de Geología y Minería. v. Carta Geológica de Chile (Vol. 29).

Vargas, G., Klinger, Y., Rockwell, T. K., Forman, S. L., Rebolledo, S., Baize, S., & Armijo, R., 2014. Probing large intraplate earthquakes at the west flank of the Andes. *Geology*, 42(12), 1083-1086. <https://doi.org/10.1130/G35741.1>.

Vergara, M., Charrier, R., Munizaga, F., Rivano, S., Sepulveda, P., Thiele, R., Drake, R., 1988. Miocene volcanism in the central Chilean Andes (31 30' S–34 35' S). *Journal of South American Earth Sciences*, 1(2), 199-209. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(88\)90038-7](https://doi.org/10.1016/0895-9811(88)90038-7).

Wall, R., Sellés, D., Gana, P., 1999, Geología de la Hoja Santiago, área de Tiltill-Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Mapa Geológico, v. 11.

Wyss, A. R., Norell, M. A., Flynn, J. J., Novacek, M. J., Charrier, R., McKenna, M. C., Jin, M., 1990. A new early Tertiary mammal fauna from central Chile: implications for Andean stratigraphy and tectonics. *Journal of vertebrate Paleontology*, 10(4), 518-522. <https://doi.org/10.1080/02724634.1990.10011835>.

Wyss, A. R., Flynn, J. J., Norell, M., Swisher, C. C., Novacek, M. J., McKenna, M. C., Charrier, R., 1994. Paleogene mammals from the Andes of central Chile: a preliminary taxonomic, biostratigraphic, and geochronologic assessment. *American Museum novitates*; no. 3098.

Yáñez, G., Cembrano, J., Pardo, M., Ranero, C., & Selles, D., 2002. The Challenger–Juan Fernández–Maipo major tectonic transition of the Nazca–Andean subduction system at 33–34 S: geodynamic evidence and implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(1), 23-38. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00004-4).

Yáñez, G., Muñoz, M., Flores-Aqueveque, V., & Bosch, A., 2015. Gravity derived depth to basement in Santiago Basin, Chile: implications for its geological evolution, hydrogeology, low enthalpy geothermal, soil characterization and geo-hazards. *Andean Geology*, 42(2), 147-172. <https://doi.org/10.5027/andgeoV42n2-a01>.

## ANEXO

### Anexo A: Parámetros hidrometeorológicos

A partir de datos de precipitación, temperatura y caudal obtenidos del sitio web de la Dirección General de Aguas (DGA, 2020), estos fueron trabajados para analizar las condiciones climáticas e hidrológicas de la zona de estudio.

#### A.1. Precipitaciones y temperatura

##### A.1.1. Estaciones meteorológicas

Para la recopilación de datos de precipitación se revisaron las estaciones meteorológicas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA) presentes en el área de estudio, se tomó en cuenta el año 1991 como inicio de un periodo representativo de la zona, por lo que se utilizaron las estaciones con mayor registro.

Estación	Código	Cuenca	SubCuenca	Subsubcuenca	Código Subsubcuenca	UTM N	UTM E	Área drenaje [km <sup>2</sup> ]	Altitud (m.s.n.m.)	Periodo de datos
Maitenes Bocatoma	05707003-K	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Colorado entre Río Olivares y Río Maipo	5707	6289120	382834	0,00	1143	1991-2020
Pirque	05711003-1	Río Maipo	Río Maipo Medio	Río Maipo entre Río Colorado y Río Clarillo	5710	6272884	352897	0,00	659	2011-2020
Río Colorado antes junta Río Olivares	05705001-2	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Colorado antes junta Río Olivares	5705	6293256	394359	834,00	1500	2013-2020
Río Maipo en El Manzano	05710001-K	Río Maipo	Río Maipo Medio	Río Maipo entre Río Colorado y Río Clarillo	5710	6281633	372019	4968,00	850	2010-2020
Río Maipo en Queltehues	05701009-6	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Maipo entre Río Negro y Río Volcán	5701	6257467	386757	0,00	1317	2017-2020
Río Maipo en San Alfonso	05704002-5	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Maipo entre Río Volcán y Río Colorado	5704	6266472	379470	2850,00	1092	2010-2020
Río Olivares antes junta Río Colorado	05706001-8	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Olivares	5706	6293472	394357	531,00	1500	2014-2020
Río Volcán en Queltehues	05702001-6	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Volcán	5702	6258289	387971	523,00	1365	2014-2020
San Gabriel	05704004-1	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Maipo entre Río Volcán y Río Colorado	5704	6261273	385249	0,00	1266	1991-2020
San José de Maipo reten	05704006-8	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Maipo entre Río Volcán y Río Colorado	5704	6277328	374166	0,00	943	1991-2020
Valle Olivares	05706003-4	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Olivares	5706	6327380	396313	0,00	2787	2017-2020

El Yeso Embalse	05703008-9	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Yeso	5703	6273246	399081	0,00	2475	1991-2020
Glaciar San Francisco en Aguas Panimavida	05702011-3	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Volcán	5702	6258861	400956	9,00	2220	2015-2020
La Obra Recinto Emos	05710007-9	Río Maipo	Río Maipo Medio	Río Maipo entre Río Colorado y Río Clarillo	5710	6282161	362190	0,00	796	1995-2020
Las Melosas	05701005-3	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Maipo entre Río Negro y Río Volcán	5701	6248289	389224	0,00	1527	1991-2000

### A.1.2. Precipitación mensual promedio

Usando los datos de precipitación mensual promedio de la base de datos de la DGA se promedió el valor para cada mes durante los años 1991 a 2020.

Precipitación Mensual Promedio [mm] 1991-2020				
Mes	Los Maitenes	San Gabriel	San José de Maipo	Embalse El Yeso
Enero	2,05	3,57	1,70	6,77
Febrero	3,52	2,75	2,75	7,44
Marzo	6,32	7,05	5,69	9,54
Abril	25,59	35,33	29,68	36,61
Mayo	59,97	85,17	73,15	85,12
Junio	104,60	144,26	123,70	160,85
Julio	52,71	80,39	76,46	95,15
Agosto	61,22	79,51	66,03	89,30
Septiembre	35,06	51,26	39,89	58,30
Octubre	17,87	22,26	18,08	17,59
Noviembre	10,36	13,89	9,60	17,34
Diciembre	4,80	5,06	6,52	6,91

### A.1.3. Climograma Embalse El Yeso

Datos correspondientes al climograma del sector Embalse El Yeso, precipitación mensual promedio y la temperatura media mensual promedio durante 1991 a 2020. Además de una columna con el porcentaje de aporte de cada mes en razón con la precipitación anual promedio.

Climograma Embalse El Yeso 1991-2020			
Mes	Precipitación [mm]	Temperatura [°C]	% Pp mensual / Pp anual
Enero	6,77	15,40	1,15
Febrero	7,44	15,28	1,26
Marzo	9,54	13,89	1,61
Abril	36,61	10,60	6,20

Mayo	85,12	6,94	14,41
Junio	160,85	3,32	27,22
Julio	95,15	2,37	16,10
Agosto	89,30	3,55	15,11
Septiembre	58,30	5,46	9,87
Octubre	17,59	7,95	2,98
Noviembre	17,34	10,73	2,93
Diciembre	6,91	13,37	1,17
Precipitación anual	590,90	Periodo de lluvias	72,84

#### A.1.4. Precipitación anual

A partir de datos de precipitación mensual promedio entre los años 1991 a 2020 se prosiguió a calcular la precipitación para cada año. Se incluye la precipitación anual promedio para el periodo 1991-2020 en cada sector.

Precipitación Anual [mm]				
Año	Maitenes	San Gabriel	San José de Maipo	Embalse El Yeso
1991	109,4	878,4	751,5	927,5
1992	33,7	383,8	561	545
1993	330,3	714,1	499,5	688,8
1994	43,3	559,7	378,5	524,9
1995	269,5	319,5	332,3	397,5
1996	157,6	135,6	213	158,8
1997	981	1339,2	1022	1201,4
1998	116,7	269,9	151	233,4
1999	328,2	568,1	383	473,3
2000	623,5	872	735,5	1154,7
2001	525,9	829	559	853,5
2002	732,5	1009,6	854	1206,2
2003	327,1	528,2	376,1	545,8
2004	379,3	565,4	456	473,9
2005	762,7	1040,9	791,4	1229,5
2006	378,7	436,1	472	667,3
2007	240,9	297	330	468,6
2008	550,2	809,5	700	980,2
2009	431,3	522,4	532	648,6
2010	343,4	340,3	307,1	445,5
2011	200,9	304,5	224,5	323,1
2012	368,2	437	480,5	501,5
2013	268,5	357,3	346,7	484,6
2014	264,8	277,1	260,8	302,3
2015	283,7	391,2	391,4	515,8

2016	409,4	387,9	373,2	402,3
2017	222,1	157,3	245,9	237,1
2018	163,2	0	141,5	201,7
2019	54,8	72	82,2	123,9
2020	193	227,8	296,8	273
<i>Precipitación Promedio [mm]</i>	336,5	501,0	441,6	573,0

### A.1.5. Comparación precipitación y temperaturas

Comparativa entre los periodos 1991-2010 y 2011-2020 de las precipitaciones y su diferencia porcentual, en los sectores de San José de Maipo y Embalse El Yeso, a este último sector se le agrega una comparativa de temperaturas y su diferencia gradual. En color azul los meses de mayor aporte de precipitación y en color rojo los meses con mayor diferencia de temperatura.

Precipitación Mensual Promedio [mm]			
Mes	San José de Maipo		Disminución %
	1991-2010	2011-2020	
Enero	2,18	0,64	70,37
Febrero	3,70	0,84	77,30
Marzo	7,08	2,73	61,42
Abril	31,03	27,11	12,64
Mayo	86,55	46,37	46,42
Junio	143,94	83,22	42,18
Julio	91,88	45,64	50,32
Agosto	75,38	45,27	39,94
Septiembre	47,28	18,80	60,23
Octubre	17,92	18,44	-2,91
Noviembre	11,65	3,76	67,75
Diciembre	5,38	9,79	-82,06
<i>Promedio % meses fríos =</i>			44,72

Precipitación Mensual Promedio [mm]			
Mes	Embalse El Yeso		Disminución %
	1991-2010	2011-2020	
Enero	7,60	5,13	32,46
Febrero	7,18	7,96	-10,94
Marzo	11,26	6,09	45,91

Abril	42,41	25,01	41,02
Mayo	101,30	52,77	47,90
Junio	201,37	79,81	60,37
Julio	116,17	53,13	54,26
Agosto	98,97	65,13	34,20
Septiembre	63,22	41,88	33,75
Octubre	16,01	22,09	-37,95
Noviembre	20,23	9,07	55,16
Diciembre	5,53	10,84	-96,07
Promedio % meses fríos =			49,18

Temperatura Mensual Promedio en Embalse El Yeso [°C]			
Mes	1991-2010	2010-2020	Diferencia
Enero	15,10	16,00	0,90
Febrero	15,17	15,48	0,31
Marzo	14,03	13,61	-0,41
Abril	10,37	11,06	0,69
Mayo	6,83	7,37	0,54
Junio	3,28	3,40	0,12
Julio	2,09	2,92	0,84
Agosto	3,25	4,20	0,95
Septiembre	5,09	6,29	1,21
Octubre	8,21	7,36	-0,85
Noviembre	10,65	10,92	0,27
Diciembre	13,19	13,76	0,57

## A.2. Escorrentía

### A.2.1. Estaciones fluviométricas

Para la recopilación de datos de caudales se revisaron las estaciones fluviométricas pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA) presentes en el área de estudio, se tomó en cuenta el año 1991 como inicio de un periodo representativo de la zona, por lo que se utilizaron las estaciones con mayor registro.

Estación	Código	Cuenca	SubCuenca	Subsubcuenca	Código Subsubcuenca	UTM N	UTM E	Área drenaje [km <sup>2</sup> ]	Altitud (m.s.n.m.)	Periodo de datos
Río Maipo en el Manzano	05710001-K	Río Maipo	Río Maipo Medio	Río Maipo entre Río Colorado y Río Clarillo	5710	6281633	372019	4968	850	1991-2020
Río Maipo en San Alfonso	05704002-5	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Maipo entre Río Volcán y Río Colorado	5704	6266472	379470	2850	1092	1991-2016
Río Maipo en Hualtatas	05701001-0	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Maipo entre Río Negro y Río Volcán	5701	6239628	394176	843	1820	1991-2013

Río Maipo en Melosas	05701002-9	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Maipo entre Río Negro y Río Volcán	5701	6253617	389153	1488	1527	1991-1993,2014-2015
Río Maipo en Queltehues	05701009-6	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Maipo entre Río Negro y Río Volcán	5701	6257467	386757	0	1317	2017-2020
Canal Queltehues	05705002-0	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Maipo entre Río Negro y Río Volcán	5701	6250719	389226	0	3080	2013-2020
Río Volcán en Queltehues	05702001-6	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Volcán	5702	6258289	387971	523	1365	1991-2020
Río Colorado antes junta Río Maipo	05707002-1	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Colorado entre Río Olivares y Río Maipo	5707	6282122	372847	1713	890	1991-2020
Río Colorado antes junta Río Olivares	05705001-2	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Colorado antes junta Río Olivares	5705	6293256	394359	834	1500	1991-2020
Río Olivares antes junta Río Colorado	05706001-8	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Olivares	5706	6293472	394357	531	1500	1991-2020
Estero Glaciar Echaurren	05703006-2	Río Maipo	Río Maipo Alto	Río Yeso	5703	6283273	396423	4	3000	1991-2004

## A.2.2. Caudal anual

Caudal Medio Anual 1991-2020 [m3/s]					
Año	Río Maipo en El Manzano	Río Colorado antes junta Río Maipo	Río Volcán en Queltehues	Río Colorado antes junta Río Olivares	Río Olivares antes junta Río Colorado
1991	1413,05	415,85	87,87	153,09	120,27
1992	1678,57	456,85	136,22	119,23	111,17
1993	1755,55	438,02	101,97	137,41	64,42
1994	1402,9	396,49	66,95	107,2	43,56
1995	1254,89	351,13	86,39	75,23	22,33
1996	774,67	234,38	36,38	43,68	14,33
1997	1281,28	360,6	87,01	85,65	37,91
1998	1377,61	355,96	101,89	111,67	47,16
1999	882,19	287,58	46,18	31,62	20,81
2000	1393,38	370,72	85,83	98,48	26,45
2001	1782,86	447,65	133,13	127,79	63,02
2002	1703,32	500,51	130,14	85,84	38,34
2003	1673,51	467,62	120,27	186,94	53,14
2004	1060,95	304,09	66,84	33,59	24,04
2005	1630,87	449,08	103,55	60,92	50,36
2006	2068,21	437,78	143,77	76,25	58,5
2007	1133,03	258,88	89,96	46,33	17,87
2008	1412,63	381,89	84,79	93,26	31,03
2009	1257,81	250,21	75,04	69,22	23,6
2010	1100,77	209,31	60,36	30,22	17,94
2011	732,52	260,08	27,88	20,46	11,74
2012	834,81	263,16	35,78	29,54	25,1
2013	945,65	256,8	81,06	34,77	21,26

2014	879,37	216,56	20,91	73,79	15,56
2015	841,13	237,99	40,03	54,01	21,38
2016	1269,24	305,3	77,18	75,93	25,12
2017	1110,89	274,52	51,86	50,08	23,09
2018	769,05	230,66	27,95	26,16	35,45
2019	655,76	194,96	20,14	23,53	22,71
2020	326,66	126,91	9,35	22,68	32,54
Caudal Promedio	1213,43767				

### A.2.3. Comparación caudal medio mensual

Mes	Río Maipo en El Manzano		
	1991-2010	2011-2020	Disminución %
Enero	214,406	118,802	44,59
Febrero	153,46	97,31	36,59
Marzo	106,63	69,99	34,36
Abril	75,67	58,47	22,73
Mayo	76,92	46,22	39,91
Junio	68,14	44,24	35,07
Julio	67,66	41,26	39,02
Agosto	68,62	43,44	36,69
Septiembre	78,03	51,65	33,81
Octubre	106,06	68,75	35,18
Noviembre	164,26	105,74	35,62
Diciembre	222,05	125,84	43,33
<i>Promedio disminución</i>			36,41

### A.3. Derechos de agua

#### A.3.1. Catastro derecho de agua

Catastro Derechos de Agua				
Tipo	Derechos Otorgados	Superficial	Subterránea	Caudal Anual [m3/s]
Consuntivo	134	105	29	36,42
No consuntivo	163	163	0	123342,9

#### A.3.2. Usos

Usos Derechos Consuntivos		
	Caudal [m3/s]	%
Agua potable	21,39	58,74
Energía hidroeléctrica	0,03	0,08

Minería	0,97	2,65
Riego	2,11	5,81
Uso doméstico	0,03	0,08
No específica	11,89	32,64

Usos Derechos No Consuntivos		
	Caudal [m3/s]	%
Energía hidroeléctrica	119917	97,22
Riego	2,0	0,00162
Industrial	88,1	0,07
Medicinal	0,01	0,00001
No específica	3335,8	2,70

## Anexo B: Datos hidroquímicos

### B.1. Índice de datos

ID	Muestra	Fuente	Tipo punto	Fecha muestreo	UTM Este	UTM Norte	Elementos mayores	Elementos menores y trazas	Análisis isotópico	Análisis tritio
1	L1-60	SRK (2020)	Túnel	03-01-2020	367.906	6.283.779	X	X	X	X
2	L1-973	SRK (2020)	Túnel	03-01-2020	368.428	6.284.489	X	X	X	X
3	L1-1750	SRK (2020)	Túnel	03-01-2020	369.136	6.284.809	X	X	X	X
4	L1-2850	SRK (2020)	Túnel	03-01-2020	370.222	6.284.928	X	X	X	X
5	L1-3525	SRK (2020)	Túnel	03-01-2020	370.897	6.284.937	X	X	X	X
6	L1-3825	SRK (2020)	Túnel	03-01-2020	371.193	6.284.986	X	X	X	X
7	L1-4895	SRK (2020)	Túnel	19-12-2019	372.242	6.285.198	X	X	X	X
8	L1-5875	SRK (2020)	Túnel	19-12-2019	373.202	6.285.393	X	X	X	X
9	VL4-A1-250	SRK (2020)	Túnel	18-12-2019	380.158	6.286.293	X	X	X	X
10	VL4-A1-105	SRK (2020)	Túnel	18-12-2019	380.106	6.286.159	X	X	X	X
11	VL4-760	SRK (2020)	Túnel	18-12-2019	378.878	6.286.127	X	X	X	X
12	VL4-A2-165	SRK (2020)	Túnel	18-12-2019	380.038	6.286.200	X	X	X	X
13	VL7-2830	SRK (2020)	Túnel	18-12-2019	384.726	6.287.853	X	X	X	X
14	V1-3080	SRK (2020)	Túnel	07-01-2020	402.868	6.262.344	X	X	X	X
15	V1-2718	SRK (2020)	Túnel	07-01-2020	403.096	6.262.063	X	X	X	X
16	V1-2242	SRK (2020)	Túnel	07-01-2020	403.396	6.261.694	X	X	X	X
17	V1-1540	SRK (2020)	Túnel	07-01-2020	403.838	6.261.149	X	X	X	X
18	V1-695	SRK (2020)	Túnel	07-01-2020	404.457	6.260.592	X	X	X	X
19	V1-290	SRK (2020)	Túnel	07-01-2020	404.854	6.260.520	X	X	X	X
20	V5-2880	SRK (2020)	Túnel	08-01-2020	399.659	6.269.695	X	X	X	X
21	V5-1565	SRK (2020)	Túnel	08-01-2020	399.407	6.270.986	X	X	X	X
22	V5-1005	SRK (2020)	Túnel	08-01-2020	399.300	6.271.536	X	X	X	X
23	VA4-567	SRK (2020)	Túnel	09-01-2020	394.428	6.272.474	X	X	X	X
24	VA4-2205	SRK (2020)	Túnel	09-01-2020	393.283	6.273.645	X	X	X	X
25	VA4-2535	SRK (2020)	Túnel	09-01-2020	393.052	6.273.881	X	X	X	X
26	VA1-883	SRK (2020)	Túnel	10-01-2020	385.185	6.285.867	X	X	X	X
27	SAM-10	SRK (2020)	Pozo	02-01-2020	380.116	6.287.108	X	X	X	
28	SAM-14B	SRK (2020)	Pozo	02-01-2020	378.041	6.286.164	X	X	X	
29	SAM-12	SRK (2020)	Pozo	02-01-2020	367.968	6.283.659	X	X	X	

30	SAM-04	SRK (2020)	Pozo	08-01-2020	395.174	6.271.938	X	X	X
31	APR-MEL	SRK (2020)	Pozo	07-01-2020	376.191	6.271.565	X	X	X
32	APR-SA	SRK (2020)	Pozo	10-01-2020	377.995	6.266.668	X	X	X
33	AUCAYES	SRK (2020)	Superficial	19-12-2019	382.565	6.288.482	X	X	X
34	VEN07	SRK (2020)	Superficial	30-12-2019	394.873	6.296.739	X	X	X
35	RIO-01	SRK (2020)	Superficial	30-12-2019	395.089	6.296.175	X	X	X
36	ELR-01	SRK (2020)	Superficial	30-12-2019	396.912	6.293.280	X	X	X
37	RCO-01	SRK (2020)	Superficial	30-12-2019	390.135	6.292.724	X	X	X
38	RCO-02	SRK (2020)	Superficial	30-12-2019	372.858	6.282.123	X	X	X
39	RCO-03	SRK (2020)	Superficial	30-12-2019	380.488	6.287.227	X	X	X
40	RCO-04	SRK (2020)	Superficial	30-12-2019	396.918	6.293.307	X	X	X
41	RMA-01	SRK (2020)	Superficial	30-12-2019	375.923	6.272.275	X	X	X
42	EEM	SRK (2020)	Superficial	02-01-2020	369.327	6.283.469	X	X	X
43	CMA	SRK (2020)	Superficial	02-01-2020	374.384	6.284.430	X	X	X
44	CEM	SRK (2020)	Superficial	02-01-2020	373.350	6.283.149	X	X	X
45	QEA	SRK (2020)	Superficial	03-01-2020	369.180	6.284.085	X	X	X
46	CMO	SRK (2020)	Superficial	03-01-2020	376.765	6.276.131	X	X	X
47	ESJ	SRK (2020)	Superficial	03-01-2020	376.845	6.276.140	X	X	X
48	CSJ	SRK (2020)	Superficial	03-01-2020	375.681	6.275.015	X	X	X
49	RVO-01	SRK (2020)	Superficial	06-01-2020	407.934	6.257.317	X	X	X
50	ELE-01	SRK (2020)	Superficial	06-01-2020	406.015	6.258.746	X	X	X
51	BM	SRK (2020)	Superficial	06-01-2020	401.640	6.257.006	X	X	X
52	LME	SRK (2020)	Superficial	06-01-2020	387.967	6.254.763	X	X	X
53	RYE-01	SRK (2020)	Superficial	06-01-2020	406.802	6.279.317	X	X	X
54	RYE-02	SRK (2020)	Superficial	06-01-2020	388.234	6.260.195	X	X	X
55	EMY	SRK (2020)	Superficial	06-01-2020	401.789	6.276.566	X	X	X
56	CCR	SRK (2020)	Superficial	07-01-2020	374.825	6.275.099	X	X	X
57	LN	SRK (2020)	Superficial	08-01-2020	395.123	6.275.111	X	X	X
58	LLE	SRK (2020)	Superficial	08-01-2020	395.261	6.273.382	X	X	X
59	EMTO	SRK (2020)	Superficial	08-01-2020	396.091	6.272.421	X	X	X
60	VRY	SRK (2020)	Superficial	09-01-2020	399.436	6.273.270	X	X	X
61	EPA	SRK (2020)	Superficial	31-01-2020	382.216	6.275.884	X	X	X
62	ELQ	SRK (2020)	Superficial	01-02-2020	382.824	6.276.872	X	X	X
63	EDM	SRK (2020)	Superficial	02-02-2020	382.862	6.276.844	X	X	X
64	ECO	SRK (2020)	Superficial	03-02-2020	382.841	6.276.724	X	X	X
65	VPP	SRK (2020)	Superficial	04-02-2020	388.379	6.279.308	X	X	X
66	TP-M1	Pincetti (2016)	Termas	abr-15	415.555	6.279.862	X	X	
67	TP-M2	Pincetti (2016)	Termas	abr-15	415.556	6.279.864	X	X	
68	BM-M1	Pincetti (2016)	Termas	abr-15	401.922	6.256.824	X	X	
69	BM-M2	Pincetti (2016)	Termas	abr-15	401.921	6.256.826	X	X	
70	BC-M1	Pincetti (2016)	Termas	abr-15	409.199	6.253.651	X	X	
71	BC-M2	Pincetti (2016)	Termas	abr-15	409.271	6.253.749	X	X	
72	TP-M1	Pincetti (2016)	Termas	abr-15	415.564	6.279.859	X	X	
73	TP-vert	Pincetti (2016)	Superficial	abr-15	415.189	6.279.994	X	X	
74	El Plomo	Risacher y Hauser (2008)	Termas		414.726	6.278.468	X	X	
75	Baños Morales	Risacher y Hauser (2008)	Termas		407.534	6.247.777	X	X	
76	Colina Maipo	Risacher y Hauser (2008)	Termas		409.164	6.253.549	X	X	
77	El Plomo	Bustamante et al. (2010)	Termas		415.545	6.279.834	X	X	
78	El Plomo	Bustamante et al. (2010)	Termas		425.552	6.279.872	X	X	
79	Termas del Plomo	Benavente (2015)	Termas		415.546	6.279.865	X	X	
80	Baños Morales P1	Benavente (2015)	Termas		401.927	6.256.821	X	X	
81	Baños Morales P2	Benavente (2015)	Termas		401.927	6.256.821	X	X	

## B.2. Parámetros fisicoquímicos

ID	T°C	pH	EC [uS/cm]	Altura (m.s.n.m.)	ID	T°C	pH	EC [uS/cm]	Altura (m.s.n.m.)
1	-	7,92	952	814	42	-	8	707	910
2	-	7,8	102	815	43	-	8,04	727	1020
3	-	7,92	227	816	44	-	8	710	970
4	-	8,02	417	817	45	-	7,97	291	1000
5	-	7,23	685	818	46	-	8,12	282	1180
6	-	7,84	771	819	47	-	8,08	294	1190
7	-	7,81	230	820	48	-	7,93	1280	1090
8	-	7,86	196	821	49	-	7,94	1290	2410
9	-	11,1	644	850	50	-	7,88	533	2300
10	-	8,88	352	1000	51	-	8,17	557	1880
11	-	8,12	364	1000	52	-	7,96	2040	1440
12	-	8,14	231	1000	53	-	7,91	1340	2650
13	-	8,84	204	1259	54	-	8,11	647	1370
14	-	7,93	1000	1476	55	-	7,91	1320	2600
15	-	8,01	837	2400	56	-	7,94	731	1030
16	-	7,75	1630	2450	57	-	7,74	172	2750
17	-	8,16	279	2477	58	-	7,94	227	2530
18	-	8,13	849	2477	59	-	8,06	230	2480
19	-	8,14	428	2480	60	-	8,27	398	2550
20	-	7,97	1480	2483	61	-	7,95	387	1870
21	-	8,31	1870	2485	62	-	8,32	385	1970
22	-	8,3	487	2486	63	-	8,06	261	1960
23	-	7,87	901	2487	64	-	8,13	241	1960
24	-	7,22	5450	2489	65	-	8,06	220	2880
25	-	7,51	7690	2495	66	44,8	6,7	*	3000
26	-	7,87	2310	2498	67	40,9	6,8	29480	3000
27	-	8,09	1360	1120	68	17,7	*	16240	1860
28	-	7,91	969	1070	69	23,7	*	29700	1860
29	-	7,94	973	860	70	32,1	*	36600	2540
30	-	7,89	1200	2450	71	50,8	*	52000	2560
31	-	7,98	1160	1050	72	25	6,9	14126	3000
32	-	8,26	570	1120	73	5,7	7,7	1640	2980
33	-	7,89	281	1230	74	44	6,8	19860	2950
34	-	8,11	831	1760	75	23	6,31	36900	3560
35	-	8,02	770	1710	76	52	6,52	40700	2530
36	-	7,29	167	1630	77	48,2	7,06	22600	3000
37	-	7,94	1340	1400	78	22,6	7,18	12420	3160
38	-	7,99	826	930	79	26,8	7,1	16150	3000
39	-	7,96	1760	1120	80	15,2	6,2	15680	1860
40	-	7,75	1650	1630	81	28,2	6,2	60000	1860
41	-	7,63	175	1040					

### B.3. Elementos mayores

ID	SiO2 [mg/L]	Cl [mg/L]	SO4 [mg/L]	HCO3 [mg/L]	Na [mg/L]	K [mg/L]	Ca [mg/L]	Mg [mg/L]
1	14,61	54	270	45,14	23,3	3,51	142	18,3
2	17,55	<1	6	23,18	9,7	0,395	9,5	0,189
3	28,71	1	34	42,09	18,8	0,412	23,2	3,13
4	40,28	22	77	67,71	25,8	0,833	38,8	14,3
5	17,14	3	300	4,88	38,4	0,244	106	0,044
6	21,19	3	320	27,45	45,2	0,31	118	0,773
7	20,64	1	52	27,45	27,3	0,276	17,2	0,148
8	27,21	1	10	50,02	15	0,405	18,7	3,92
9	32,78	45	30	94,55	109	6,66	19,2	0,042
10	24,00	54	9	36,6	64	0,205	2,52	0,031
11	13,50	27	38	48,8	47,1	0,646	18,5	0,69
12	25,07	3	9	60,39	46,3	5,25	7,12	0,293
13	17,49	7	20	39,04	38,3	24,4	1,92	0,041
14	18,26	19	340	46,36	147	0,766	64,6	3,29
15	8,76	3	290	66,49	17	1,28	174	16,2
16	27,43	3	510	347,7	25,1	1,68	501	25,1
17	15,00	<1	19	68,32	36	0,789	22,4	2,73
18	12,79	8	240	129,32	26,9	2,66	147	16,2
19	9,60	<1	97	64,66	24,1	1,04	58,5	5,28
20	87,43	11	150	451,4	117	2,41	218	126
21	56,57	250	240	276,33	297	2,15	67,6	58,3
22	24,00	6	29	132,98	29,1	0,648	53,9	22,3
23	16,07	1	400	42,09	13,9	0,759	184	6,3
24	11,85	920	1900	9,15	757	1,94	705	18
25	12,81	1700	2200	20,74	1080	2,46	764	50,9
26	19,05	720	35	34,16	261	1,67	177	5,35
27	32,14	85	270	204,35	56,9	2,58	217	41
28	24,21	81	130	153,11	106	1,75	120	2,88
29	22,71	79	240	76,25	49,5	3,4	150	13
30	11,87	320	36	43,31	12,4	3,25	144	29,2
31	26,57	150	270	82,96	43,2	1,15	173	20,7
32	30,00	24	56	114,07	25	1,38	78,8	9,46
33	6,51	13	43	34,77	8,64	0,585	32,4	2,94
34	17,94	39	240	75,64	93,7	2,9	75	12,8
35	7,44	150	65	55,51	74,9	2,78	65,5	9,28
36	11,68	2	52	7,32	3,56	0,786	22,2	1,49
37	11,40	250	240	53,68	142	3,66	129	14,3
38	7,22	57	250	50,63	38,1	2,45	116	13,3
39	13,39	320	330	56,73	182	4,32	164	17,7
40	10,03	280	370	56,12	155	4,4	175	13,8
41	20,64	5	22	31,11	11,1	0,765	17,8	3
42	4,69	33	230	48,8	21,9	2,33	101	10,6
43	4,69	36	250	69,54	23,7	2,56	106	10,9
44	5,49	30	250	50,02	20,3	3,13	98,7	12,3
45	15,43	8	29	61,61	11,9	0,776	37,4	6,65
46	15,81	8	29	61,61	11,4	0,742	36,8	6,45
47	22,93	7	33	61	13,5	0,898	35,3	6,78

48	13,71	42	570	50,63	27,6	2,2	265	11,9
49	14,89	42	420	49,41	26,1	2,21	276	11,9
50	12,30	7	160	56,73	13,3	3,25	79	10,1
51	8,44	1	140	82,96	6,21	1,16	99,5	13,3
52	11,53	390	440	53,68	220	5,11	195	16,5
53	10,09	93	470	45,75	57,9	3,26	213	20,4
54	12,81	36	160	63,44	32,3	2,56	77,8	18
55	6,77	80	480	50,63	49,4	4,06	226	21,3
56	23,36	140	29	51,85	57,8	0,546	80,2	5,6
57	2,70	<1	40	18,91	2,35	0,439	24,3	1,44
58	4,99	3	47	32,94	4,24	0,366	31	4,68
59	4,76	2	44	30,5	4,02	0,355	30,1	4,5
60	15,00	2	41	100,65	10,8	3,1	63,2	18,7
61	21,64	71	14	38,43	20,2	0,476	46,9	3,71
62	13,54	<1	50	90,28	12,7	1,26	51,8	12,7
63	12,13	6	41	45,75	9,51	0,469	33,9	5,91
64	12,75	5	30	46,97	10,4	0,446	29,7	5,61
65	13,33	2	31	43,31	10,1	0,527	27,2	5,19
66	34,20	7957	2439	137	5400	42,7	929	101
67	31,40	7846	2417	138	6000	40,2	892	99
68	47,00	4743	520	801	3000	96	421	78
69	56,50	9024	750	1092	6875	170	719	141
70	95,00	10548	2735	669	7050	270	1047	180
71	141,00	15806	2824	955	11300	412	1112	267
72	18,80	3752	1415	136	2350	20,6	517	63
73	7,60	2,82	534	93	5,4	5,1	226	22,9
74	13,80	6850	2380	141	82,7	31,6	870	92,1
75	45,90	14600	1100	1440	87,6	242	986	223
76	73,90	14900	3090	1050	87,5	391	1100	267
77		7490	2485	2,59	4850	26	1045	100
78		3875	1234	2,6	2300	14,2	595	64
79	29,00	3763,4	1610,1	142,2	2707	14	518	91
80	61,30	20,7	806,9	2862,9	2024	83	461	72
81	46,00	3785,3	426,5	540	9125	279	1093	231

#### B.4. Elementos menores y trazas

ID	Li [mg/L]	B [mg/L]	Al [mg/L]	As [mg/L]	Ba [mg/L]	Bi [mg/L]	Cd [mg/L]	Co [mg/L]	Cr [mg/L]
1	0,0013	0,121	0,006	0,0004	0,0117	0,00001	0,000104	0,000801	0,00072
2	0,0007	0,02	0,03	0,002	0,00066	0,000019	0,000005	0,000695	0,00065
3	0,001	0,028	0,011	0,0024	0,00086	0,000012	0,000032	0,000749	0,00028
4	0,0027	0,025	0,011	0,0037	0,00131	0,00002	0,00001	0,00121	0,00108
5	0,0203	0,236	0,024	0,032	0,0014	0,000017	0,000008	0,000827	0,00154
6	0,0101	0,055	0,013	0,0106	0,00138	0,000013	0,000016	0,000791	0,00117
7	0,0027	0,012	0,014	0,0037	0,00127	0,000013	0,000012	0,00113	0,00103
8	0,0023	0,037	0,011	0,0018	0,0022	0,000013	0,000051	0,00105	0,0005
9	0,0115	0,479	1,54	0,0509	0,012	<0,000007	0,000032	0,000811	0,00084
10	0,0111	0,438	0,068	0,0371	0,00151	<0,000007	0,000007	0,000776	0,00097
11	0,0096	0,238	0,083	0,0121	0,00532	0,000008	0,000065	0,000985	0,00082
12	0,0054	0,118	0,022	0,0199	0,00334	0,000007	0,000026	0,000724	0,0005
13	0,011	1,09	0,038	0,0302	0,0188	0,000008	0,00003	0,000935	0,00055
14	0,0262	1,83	0,01	0,349	0,00733	0,000022	0,000036	0,000792	0,0014
15	0,0131	0,134	0,008	0,0045	0,0254	0,00002	0,00007	0,000881	0,00066
16	0,0292	0,318	0,005	0,0094	0,0492	0,000015	0,000136	0,00579	0,00062
17	0,01	0,14	0,008	0,0536	0,0401	0,000017	0,000007	0,000936	0,00196

18	0,0179	0,258	0,005	0,0158	0,0168	<0,000007	<0,000003	0,000517	0,00046
19	0,0113	0,407	0,006	0,0019	0,00661	0,000014	0,000017	0,00064	0,00045
20	0,143	3,71	0,006	0,486	0,0194	0,000012	0,000013	0,00175	0,00207
21	0,132	7,92	0,012	0,85	0,0255	0,000018	0,000037	0,000737	0,00051
22	0,0215	0,643	0,006	0,0932	0,054	0,000015	0,000017	0,000765	0,00048
23	0,0072	0,641	0,007	0,0046	0,013	0,000014	0,000016	0,000865	0,00039
24	0,0649	5,88	0,017	0,0007	0,0136	0,000023	0,000017	0,00103	0,00511
25	0,0645	4,62	0,009	0,0101	0,0125	0,000033	0,000025	0,000916	0,00116
26	0,0646	0,308	0,009	0,0053	0,153	0,000017	0,000152	0,000613	0,00089
27	0,0129	0,449	0,013	0,0029	0,0339	0,000017	0,000034	0,000816	0,00156
28	0,0084	0,438	0,024	0,113	0,0657	0,000008	0,000153	0,000875	0,00397
29	0,0131	0,135	0,007	0,0018	0,0298	0,000016	0,000044	0,000664	0,00095
30	0,0038	0,066	0,011	0,0006	0,195	0,000012	0,000032	0,000718	0,0009
31	0,0051	0,182	0,008	0,0017	0,0158	0,000017	0,000032	0,000612	0,00155
32	0,0105	0,222	0,009	0,0074	0,0126	0,000017	0,000064	0,000616	0,00068
33	0,0031	0,165	0,025	0,0043	0,0114	0,000012	0,00004	0,001003	0,00076
34	0,0289	0,712	0,027	0,0446	0,0198	0,000015	0,000029	0,000634	0,0016
35	0,0483	0,447	0,032	0,0023	0,0679	0,000015	0,000038	0,000993	0,00087
36	0,0009	0,042	0,01	0,0023	0,0195	0,000011	0,000044	0,000902	0,00055
37	0,0354	0,242	0,035	0,013	0,0534	0,000019	0,000021	0,000768	0,00039
38	0,0156	0,149	0,038	0,0056	0,0376	0,00002	0,000023	0,000751	0,0003
39	0,0418	0,242	0,032	0,0202	0,0334	0,000018	0,000042	0,00107	0,00065
40	0,0741	0,4	0,066	0,0022	0,0308	0,000018	0,000027	0,00146	0,00146
41	0,0004	0,033	0,012	0,0017	0,00292	0,000025	0,000022	0,00106	0,00251
42	0,0092	0,101	0,084	0,0028	0,036	0,000015	0,000029	0,00103	0,00071
43	0,0094	0,109	0,093	0,0032	0,0358	0,000016	0,000036	0,00106	0,00077
44	0,0085	0,108	0,059	0,0038	0,0399	0,000016	0,000033	0,000963	0,00139
45	0,0009	0,13	0,017	0,0029	0,0278	0,000027	0,000026	0,00127	0,00099
46	0,0008	0,12	0,011	0,0028	0,0273	0,000015	0,000029	0,000797	0,00067
47	0,0005	0,114	0,013	0,0028	0,024	0,000014	0,000019	0,000824	0,00071
48	0,0213	0,107	0,015	0,0005	0,0197	0,000016	0,000052	0,00142	0,00258
49	0,0258	0,109	0,015	0,0006	0,0204	0,000019	0,00005	0,00121	0,00083
50	0,0086	0,096	0,037	0,0062	0,031	0,000023	0,000026	0,00064	0,00084
51	0,0059	0,1	0,016	0,0008	0,0398	0,000015	0,000028	0,000761	0,00034
52	0,0888	0,503	0,047	0,0029	0,028	0,000023	0,000021	0,00227	0,00116
53	0,0373	0,269	0,057	0,0006	0,0214	0,000014	0,000031	0,00452	0,00058
54	0,0214	0,5	0,01	0,0117	0,0213	0,000018	0,000015	0,000982	0,001
55	0,0271	0,244	0,022	0,0009	0,0158	0,000013	0,000035	0,00174	0,00091
56	0,0153	0,31	0,008	0,0065	0,0132	0,00002	0,000022	0,000751	0,00074
57	0,0003	0,036	0,013	0,0034	0,0149	0,000016	0,000016	0,000833	0,00069
58	0,0013	0,075	0,016	0,0034	0,0171	0,00002	0,000015	0,000874	0,00235
59	0,0009	0,104	0,018	0,0033	0,013	0,000014	0,000012	0,000832	0,00054
60	0,0088	0,306	0,01	0,0022	0,0845	0,000013	0,000014	0,000778	0,00054
61	0,0005	0,166	0,008	0,0013	0,0117	0,000021	0,000036	0,00112	0,00066
62	0,0001	0,03	0,009	0,0008	0,0274	0,000023	0,000024	0,00127	0,00215
63	0,0016	0,149	0,006	0,0038	0,0289	0,000016	0,000023	0,00101	0,00044
64	0,0009	0,146	0,007	0,0021	0,0141	0,000013	0,000023	0,000881	0,00127
65	0,0041	0,136	0,01	0,0094	0,0305	0,00002	0,000028	0,00119	0,00083
66	0,48	3,98	0,0035	0,0333	0,026	*	0,000005	0,00071	0,0019
67	0,482	4,041	0,0035	0,0326	0,0079	*	0,000005	0,00069	0,0007
68	1,058	3,36	0,0035	0,691	0,0386	*	0,0014	0,0029	0,0012
69	2,1	6,251	0,0035	2,119	0,0525	*	0,0028	0,0058	0,00075
70	7,418	24,275	0,035	0,0057	0,0401	*	0,00005	0,0015	0,00075
71	11,035	36,234	0,035	0,0084	0,0412	*	0,00005	0,00077	0,0148
72	0,272	1,851	0,0035	0,0095	0,0176	*	0,000005	0,00043	0,00008
73	0,0084	0,0699	0,003	0,0008	0,0088	*	0,000005	0,00014	0,00011
74	0,568	2,97	*	*	*	*	*	*	*
75	3,54	7,29	*	*	*	*	*	*	*
76	12	31,6	*	*	*	*	*	*	*
77	0,54	5,78	*	*	*	*	*	*	*
78	0,28	2,79	*	*	*	*	*	*	*
79	3,97	0,83	*	*	*	*	*	*	*
80	0,44	1,77	*	*	*	*	*	*	*
81	3,67	3,34	*	*	*	*	*	*	*

ID	Cu [mg/L]	Fe [mg/L]	Mn [mg/L]	Mo [mg/L]	Ni [mg/L]	P [mg/L]	Pb [mg/L]	Sb [mg/L]	Se [mg/L]
1	0,0012	0,009	0,00089	0,00323	0,0012	0,067	0,00019	0,255	0,00058
2	0,0007	0,013	0,00063	0,0016	0,0007	0,06	0,00016	0,251	0,00018
3	0,001	0,017	0,001	0,0036	0,0008	0,087	0,00015	0,236	0,0014
4	0,0022	0,021	0,00113	0,00064	0,0022	0,095	0,00042	0,442	0,00025
5	0,0012	0,02	0,00283	0,00495	0,0011	0,049	0,00036	0,273	<0,00004
6	0,0016	0,027	0,0764	0,00409	0,002	0,057	0,00032	0,207	<0,00004
7	0,0017	0,02	0,00095	0,00552	0,0016	0,086	0,00037	0,486	0,00011
8	0,002	0,014	0,00128	0,00311	0,0014	0,095	0,00036	0,435	0,00018
9	0,0008	0,034	0,0009	0,0348	0,0023	0,06	0,00052	0,179	0,00028
10	0,0023	0,024	0,00176	0,00272	0,0016	0,052	0,00049	0,239	<0,00004
11	0,0072	0,031	0,0045	0,00628	0,0026	0,066	0,0018	0,406	0,00037
12	0,0017	0,012	0,00171	0,00087	0,0014	0,058	0,00038	0,187	<0,00004
13	0,0032	0,018	0,00136	0,00355	0,0019	0,077	0,0006	0,25	0,00005
14	0,001	0,062	0,0431	0,00483	0,0011	0,053	0,00029	0,293	<0,00004
15	0,0099	0,015	0,00198	0,0116	0,0025	0,036	0,0002	0,324	0,00102
16	0,0017	5,42	4,72	0,00029	0,0046	0,045	0,00031	0,357	0,00004
17	0,0016	0,062	0,123	0,00817	0,0016	0,06	0,00029	0,343	<0,00004
18	<0,0002	0,098	0,0307	0,00138	0,0005	0,039	0,00003	0,0352	<0,00004
19	0,0015	0,018	0,00149	0,0117	0,0006	0,043	0,00013	0,243	0,00034
20	0,0017	0,045	0,367	0,00249	0,0016	0,045	0,00028	0,289	<0,00004
21	0,0012	0,018	0,0879	0,0381	0,0008	0,073	0,00017	0,257	<0,00004
22	0,0011	0,023	0,0766	0,0213	0,0007	0,058	0,00015	0,259	<0,00004
23	0,0012	0,083	0,0666	0,00297	0,0009	0,033	0,0002	0,19	<0,00004
24	0,0014	0,162	0,2	0,00756	0,0013	0,055	0,00041	0,305	<0,00004
25	0,0009	0,36	0,299	0,0159	0,0015	0,046	0,00017	0,324	0,00005
26	0,0015	0,015	0,0396	0,0137	0,0014	0,042	0,00019	0,158	<0,00004
27	0,0031	0,02	0,00427	0,00162	0,0014	0,069	0,0005	0,286	0,0167
28	0,002	0,1	0,0809	0,00268	0,0041	4,81	0,00124	0,0706	0,00011
29	0,0028	0,02	0,00451	0,00172	0,0016	0,071	0,00049	0,217	0,00049
30	0,0053	0,019	0,00374	0,00362	0,002	0,047	0,00021	0,193	0,00043
31	0,0043	0,028	0,00179	0,00084	0,001	0,053	0,00029	0,234	0,00042
32	0,0019	0,014	0,00106	0,00091	0,0011	0,054	0,00038	0,201	0,00019
33	0,0031	0,016	0,0073	0,00201	0,0021	0,076	0,00054	0,304	0,00016
34	0,0032	0,023	0,00306	0,00862	0,0015	0,051	0,00067	0,156	0,00144
35	0,0022	0,02	0,0394	0,00314	0,0018	0,118	0,00044	0,348	0,00045
36	0,0032	0,017	0,00333	0,0127	0,0011	0,041	0,0002	0,15	0,00023
37	0,0009	0,016	0,0256	0,00517	0,0009	0,057	0,00023	0,212	0,00069
38	0,0008	0,012	0,0507	0,00361	0,001	0,12	0,0002	0,215	0,00051
39	0,0013	0,015	0,0233	0,00557	0,0018	0,076	0,00049	0,383	0,00088
40	0,0031	0,045	0,0485	0,00371	0,0032	0,084	0,00079	0,477	0,0007
41	0,0021	0,062	0,0213	0,00133	0,0016	0,085	0,00039	0,452	0,00006
42	0,0022	0,067	0,0586	0,00351	0,002	0,132	0,00053	0,29	0,00052
43	0,0018	0,063	0,0629	0,00366	0,0024	0,151	0,00037	0,318	0,0005
44	0,0019	0,048	0,0471	0,00507	0,0017	0,119	0,00027	0,264	0,0005
45	0,0025	0,026	0,00833	0,00151	0,0018	0,102	0,00056	0,482	0,00008
46	0,0022	0,016	0,0118	0,0015	0,0013	0,055	0,00044	0,253	0,00007
47	0,0031	0,013	0,00742	0,00154	0,0014	0,077	0,00028	0,252	0,00007
48	0,0016	0,028	0,0399	0,00355	0,0034	0,056	0,00025	0,472	0,00089
49	0,0015	0,015	0,0412	0,00361	0,003	0,062	0,00025	0,338	0,00081
50	0,0011	0,018	0,00993	0,00567	0,0011	0,06	0,0002	0,208	0,00052
51	0,001	0,008	0,0758	0,00099	0,0006	0,029	0,00013	0,166	0,00023
52	0,0009	0,034	0,135	0,0034	0,0034	0,049	0,00017	0,258	0,00065
53	0,0012	0,016	0,223	0,00355	0,008	0,066	0,00019	0,254	0,00092
54	0,0017	0,017	0,00319	0,00982	0,0016	0,061	0,00024	0,377	0,00061
55	0,0017	0,017	0,268	0,00418	0,004	0,054	0,00022	0,257	0,00116
56	0,0018	0,016	0,0154	0,00252	0,0012	0,073	0,00031	0,233	0,00007
57	0,0016	0,018	0,0075	0,0076	0,001	0,05	0,00023	0,226	0,00021
58	0,0019	0,034	0,00642	0,00543	0,0012	0,07	0,00035	0,357	0,00021
59	0,0017	0,02	0,00239	0,00579	0,0008	0,065	0,0007	0,308	0,00019
60	0,0012	0,014	0,00272	0,00663	0,0008	0,072	0,0002	0,249	0,00098
61	0,0018	0,014	0,00495	0,00203	0,0009	0,053	0,0002	0,248	<0,00004
62	0,0019	0,026	0,00243	0,00066	0,0012	0,062	0,00029	0,381	<0,00004
63	0,001	0,012	0,00672	0,00115	0,0006	0,035	0,00015	0,221	0,00008

64	0,0017	0,02	0,00211	0,00175	0,0012	0,048	0,00025	0,199	0,00009
65	0,0023	0,016	0,00487	0,00125	0,001	0,049	0,00022	0,35	0,00015
66	0,0292	1,683	0,333	0,0064	0,0059	*	0,000014	0,000008	0,0061
67	0,003	1,604	0,335	0,0066	0,0059	*	0,000014	0,000008	0,0071
68	0,0194	2,2	0,68	0,0011	0,0045	*	0,000014	0,000008	0,0007
69	0,0421	6,18	1,307	0,00045	0,009	*	0,00014	0,00008	0,007
70	0,0435	0,135	0,127	0,00045	0,009	*	0,000014	0,00008	0,007
71	0,0931	0,135	0,0059	0,00045	0,009	*	0,000014	0,00008	0,007
72	0,0144	0,279	0,144	0,0053	0,0043	*	0,00014	0,000008	0,0007
73	0,00059	0,00135	0,00015	0,0055	0,0018	*	0,00014	0,000008	0,002
74	*	*	*	*	*	*	*	*	*
75	*	*	*	*	*	*	*	*	*
76	*	*	*	*	*	*	*	*	*
77	*	*	*	*	*	*	*	*	*
78	*	*	*	*	*	*	*	*	*
79	*	*	*	*	*	*	*	*	*
80	*	*	*	*	*	*	*	*	*
81	*	*	*	*	*	*	*	*	*
ID	Sn [mg/L]	Sr [mg/L]	Ti [mg/L]	Tl [mg/L]	U [mg/L]	V [mg/L]	W [mg/L]	Y [mg/L]	Zn [mg/L]
1	0,00008	0,814	0,00019	<0,000005	0,00041	0,00172	0,00043	0,00001	0,06
2	0,00009	0,0243	0,00028	<0,000005	0,000025	0,0076	0,00004	0,000004	0,01
3	0,00007	0,077	0,00027	<0,000005	0,000073	0,0068	0,0007	0,000003	0,011
4	0,00017	0,158	0,00031	<0,000005	0,000081	0,00347	0,00005	0,000006	0,025
5	0,0003	0,277	0,00103	<0,000005	0,000004	0,00024	0,0646	0,000014	0,022
6	0,00016	0,635	0,00034	<0,000005	0,000007	0,00015	0,0164	0,000013	0,016
7	0,00022	0,0587	0,00033	<0,000005	0,00002	0,00203	0,00007	0,00001	0,015
8	0,00017	0,0428	0,00034	<0,000005	0,000038	0,00391	0,00003	0,000011	0,029
9	0,0003	0,185	0,0004	<0,000005	0,000013	0,00697	0,0005	0,000005	0,014
10	0,00014	0,0227	0,00082	<0,000005	0,000011	0,00028	0,00027	0,00001	0,013
11	0,00021	0,16	0,00061	0,000005	0,00007	0,00178	0,00006	0,000054	0,042
12	0,00014	0,0785	0,00041	<0,000005	0,000091	0,00351	0,00005	0,000013	0,012
13	0,00021	0,0169	0,00035	0,000005	0,000007	0,00043	0,00034	0,000011	0,019
14	0,00008	0,696	0,00034	<0,000005	0,000047	0,00007	0,00005	0,000012	0,024
15	0,00006	8,34	0,00033	0,000072	0,00309	0,0001	0,00002	0,000027	0,031
16	0,00007	4,61	0,00041	0,000013	0,00086	0,0002	0,00007	0,000411	0,036
17	0,00007	0,193	0,00037	<0,000005	0,000102	0,00007	0,00003	0,000026	0,02
18	<0,00006	1,04	0,00026	<0,000005	0,000115	0,00004	<0,00002	0,000016	0,004
19	<0,00006	0,341	0,00015	<0,000005	0,000169	0,00314	0,00007	0,000009	0,007
20	<0,00006	2,8	0,00046	0,00001	0,00193	0,00019	<0,00002	0,00003	0,013
21	0,00007	1,56	0,0005	0,000005	0,00093	0,00017	0,00002	0,000028	0,011
22	<0,00006	1,37	0,00026	<0,000005	0,000964	0,00006	0,00002	0,000017	0,009
23	0,00006	2,66	0,00036	<0,000005	0,000012	0,00005	<0,00002	0,000017	0,009
24	0,00038	11,5	0,00095	<0,000005	0,000009	0,00012	0,00022	0,000039	0,022
25	0,0001	14,5	0,00031	<0,000005	0,000006	0,0002	0,00003	0,000051	0,008
26	0,00009	2,04	0,00036	<0,000005	0,00002	0,00044	0,00002	0,000015	0,01
27	0,00012	1,52	0,00072	0,000015	0,00493	0,00485	0,00019	0,000035	0,038
28	0,00036	1,35	0,00116	0,000007	0,00012	0,00153	0,00532	0,000905	0,026
29	0,0001	1,09	0,00022	0,000021	0,000789	0,00247	0,00206	0,000019	0,031
30	0,00019	0,962	0,0005	<0,000005	0,00149	0,00044	0,00213	0,000041	0,018
31	<0,00006	0,52	0,00029	0,000006	0,000555	0,00222	<0,00002	0,000055	0,023
32	0,00006	0,411	0,00033	<0,000005	0,000498	0,0031	0,00002	0,000022	0,017
33	0,00018	0,176	0,00041	0,000009	0,000066	0,00063	<0,00002	0,000016	0,027
34	0,00059	1,51	0,00107	0,000009	0,000629	0,00153	0,00033	0,000083	0,047
35	0,00011	0,665	0,00055	0,00001	0,000299	0,0006	0,0004	0,00004	0,021
36	0,00009	0,0855	0,00032	0,000005	0,000164	0,00056	0,00024	0,000009	0,015
37	0,00006	1,39	0,00049	0,000089	0,000772	0,001	0,0001	0,000014	0,011
38	<0,00006	1,16	0,00059	0,000048	0,000652	0,00057	0,00006	0,000019	0,012
39	0,00011	1,76	0,00041	0,00015	0,000842	0,0013	0,00006	0,000021	0,018
40	0,00025	1,4	0,00118	0,000074	0,000464	0,00045	0,00008	0,000027	0,021
41	0,00009	0,048	0,00043	<0,000005	0,000012	0,00135	0,00005	0,000042	0,014
42	<0,00006	0,983	0,00183	0,000045	0,000391	0,00038	0,00017	0,000043	0,02
43	0,00017	0,993	0,00231	0,000058	0,0004	0,0004	0,00185	0,00004	0,02
44	0,00006	1,09	0,00125	0,000047	0,000448	0,00061	0,00011	0,000035	0,028
45	0,00011	0,233	0,00053	0,000006	0,000221	0,00281	0,00004	0,00003	0,017

46	0,00007	0,232	0,0003	0,000006	0,000208	0,00272	<0,00002	0,000022	0,02
47	0,00009	0,184	0,00022	0,000007	0,000205	0,00507	<0,00002	0,000023	0,011
48	0,0001	2,15	0,00036	0,000011	0,000321	0,00066	0,00003	0,000057	0,014
49	0,00008	2,12	0,00031	0,000008	0,000336	0,00072	0,00003	0,000051	0,015
50	0,00024	0,654	0,00058	0,000013	0,000448	0,00279	0,00006	0,000033	0,022
51	<0,00006	0,857	0,00022	<0,000005	0,000201	0,00015	<0,00002	0,000041	0,006
52	0,00007	1,55	0,00079	0,000064	0,000355	0,00053	<0,00002	0,000034	0,009
53	0,00008	1,83	0,00035	0,000051	0,000935	0,00036	<0,00002	0,000041	0,011
54	0,00008	0,785	0,00034	0,000005	0,00138	0,00121	0,00002	0,000012	0,012
55	0,0001	1,71	0,0003	0,000059	0,00116	0,00036	0,00008	0,000032	0,009
56	0,00008	0,48	0,00025	0,000006	0,000287	0,00316	0,00003	0,000023	0,017
57	0,00008	0,0669	0,00055	<0,000005	0,000116	0,00047	0,00011	0,000009	0,013
58	0,00013	0,237	0,00067	<0,000005	0,000156	0,00054	0,00004	0,000013	0,013
59	0,0001	0,214	0,00069	<0,000005	0,00019	0,00096	0,00004	0,000016	0,007
60	<0,00006	0,693	0,00035	<0,000005	0,0105	0,0004	0,00003	0,000018	0,007
61	0,00006	0,172	0,00026	<0,000005	0,000053	0,00221	0,00005	0,000025	0,011
62	0,00006	0,368	0,00025	<0,000005	0,000298	0,00231	<0,00002	0,00003	0,01
63	<0,00006	0,224	0,00019	<0,000005	0,000096	0,00146	<0,00002	0,000017	0,006
64	0,00008	0,238	0,00027	<0,000005	0,00025	0,00196	0,00003	0,000021	0,009
65	0,00008	0,218	0,0003	<0,000005	0,00012	0,00301	0,00003	0,000013	0,009
66	*	18,617	*	0,00017	0,00118	*	*	*	0,0135
67	*	18,443	*	3,5E-07	0,00054	*	*	*	0,0163
68	*	6,299	*	0,001902	0,001	*	*	*	0,129
69	*	10,605	*	0,003552	0,00111	*	*	*	0,29
70	*	21,53	*	0,000358	0,00028	*	*	*	0,0365
71	*	27,138	*	0,000352	0,00003	*	*	*	1,394
72	*	10,037	*	0,000036	0,0000425	*	*	*	0,0062
73	*	1,551	*	0,000036	0,0000425	*	*	*	0,0198
74	*	*	*	*	*	*	*	*	*
75	*	*	*	*	*	*	*	*	*
76	*	*	*	*	*	*	*	*	*
77	*	*	*	*	*	*	*	*	*
78	*	*	*	*	*	*	*	*	*
79	*	*	*	*	*	*	*	*	*
80	*	*	*	*	*	*	*	*	*
81	*	*	*	*	*	*	*	*	*

## B.5. Isótopos

ID	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta\text{D}$ ‰	ID	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	$\delta\text{D}$ ‰
1	-14,6	-111	34	-15,2	-113
2	-11,7	-83	35	-16,5	-124
3	-11,4	-82	36	-14	-103
4	-12,2	-89	37	-16,2	-122
5	-12	-88	38	-17,4	-131
6	-11,8	-86	39	-17,5	-131
7	-12,1	-88	40	-16,3	-122
8	-11,9	-89	41	-15,7	-117
9	-12,2	-96	42	-11,2	-84
10	-12,4	-97	43	-17,7	-133
11	-12,2	-96	44	-17,6	-133
12	-12,4	-97	45	-17,7	-132
13	-12,4	-97	46	-11,4	-87
14	-15,1	-111	47	-11,6	-88
15	-15,5	-115	48	-10	-81
16	-15,6	-116	49	-15,9	-117,5
17	-14,7	-108	50	-17	-127,9
18	-15,2	-112	51	-13,5	-97,2

19	-14,2	-105	52	-15,3	-112,6
20	-16,1	-120	53	-17,6	-132
21	-15,9	-120	54	-15,1	-114
22	-15,6	-118	55	-16,1	-123
23	-14,4	-108	56	-12,1	-91
24	-14,3	-105	57	-12,3	-100
25	-14	-102	58	-12,6	-99
26	-12,8	-97	59	-12,6	-98
27	-13,1	-101	60	-15,8	-120,2
28	-13,4	-102	61	-12,1	-92
29	-13,4	-99	62	-11,7	-91
30	-14	-106	63	-12,7	-95
31	-14,1	-105	64	-12,4	-93
32	-12,1	-91	65	-13,2	-98
33	-13,4	-99			

ID	Tritio (UT)	Error	ID	Tritio (UT)	Error
1	2,5	0,24	14	1,5	0,23
2	<0,5		15	1,5	0,21
3	<0,5		16	1,7	0,22
4	0,7	0,26	17	1,8	0,23
5	<0,5		18	2	0,22
6	<0,5		19	3	0,2
7	<0,5		20	<0,5	
8	<0,5		21	<0,7	
9	<0,5		22	1,1	0,18
10	<0,5		23	<0,9	
11	0,7	0,25	24	<0,5	
12	<0,5		25	<0,6	
13	<0,6		26	0,7	0,21

## Anexo C: QA/QC

Para determinar la confiabilidad de las mediciones

### C.1. Mediciones in situ v/s laboratorio

Este método busca comparar las mediciones realizadas en terreno con los resultados del análisis de laboratorio, para ello se compararon los parámetros pH y Conductividad Eléctrica utilizando la ecuación:

#### *Diferencia Porcentual Relativa*

$$DPR (\%) = \frac{|pH \text{ o } CE_{Lab} - pH \text{ o } CE_{terreno}|}{(pH \text{ o } CE_{Lab} + pH \text{ o } CE_{terreno})/2} * 100$$

Los resultados muestran que el DPR del pH están todos los datos bajo el 20%, siendo la muestra superficial ID 59 la de mayor diferencia con un 16.09%. Para el DPR del CE es distinto, existen 4

muestras con una diferencia mayor a 20%: ID 9 con un 39.4%, ID 13 con un 73.88%, ID 20 con un 30.13% y ID 61 con un 41.07%, para el caso de estas muestras debiese ser descartado el valor obtenido en terreno.

ID	pH in situ	pH	DPR PH (%)	CE in situ [uS/cm]	CE [uS/cm]	DPR CE (%)
1	7,76	7,92	2,04	879	952	7,97
2	8,65	7,8	10,33	89	102	13,61
3	8,25	7,92	4,08	216	227	4,97
4	7,61	8,02	5,25	414	417	0,72
5	8,11	7,23	11,47	682	685	0,44
6	7,74	7,84	1,28	764	771	0,91
7	7,72	7,81	1,16	238	230	3,42
8	7,84	7,86	0,25	187	196	4,7
9	11,66	11,1	4,92	960	644	39,4
10	9,49	8,88	6,64	360	352	2,25
11	7,38	8,12	9,55	354	364	2,79
12	7,67	8,14	5,95	227	231	1,75
13	9,41	8,84	6,25	443	204	73,88
14	8,61	7,93	8,22	956	1000	4,5
15	8,31	8,01	3,68	834	837	0,36
16	7,69	7,75	0,78	1.923	1630	16,49
17	8,5	8,16	4,08	252	279	10,17
18	8,33	8,13	2,43	831	849	2,14
19	8,47	8,14	3,97	398	428	7,26
20	8,12	7,97	1,86	2.005	1480	30,13
21	8,13	8,31	2,19	1.975	1870	5,46
22	8,09	8,3	2,56	488	487	0,21
23	6,87	7,87	13,57	810	901	10,64
24	7,01	7,22	2,95	4.860	5450	11,45
25	7,17	7,51	4,63	7.360	7690	4,39
26	7,63	7,87	3,1	2.320	2310	0,43
27	7,11	8,09	12,89	1.366	1360	0,44
28	7,46	7,91	5,86	875	969	10,2
29	6,99	7,94	12,73	889	973	9,02
30	7,93	7,89	0,51	1.189	1200	0,92
31	8,29	7,98	3,81	1.090	1160	6,22
32	7,8	8,26	5,73	540	570	5,41
33	7,72	7,89	2,18	260	281	7,76
34	8,27	8,11	1,95	778	831	6,59
35	8	8,02	0,25	683	770	11,98
36	7,9	7,29	8,03	169	167	1,19
37	8,12	7,94	2,24	1.289	1340	3,88
38	7,6	8,01	5,25	736	840	13,2
39	7,98	7,99	0,13	733	826	11,93
40	7,58	7,96	4,89	1.735	1760	1,43
41	7,8	7,75	0,64	1.533	1650	7,35
42	7,94	7,63	3,98	157	175	10,84
43	7,77	8	2,92	638	707	10,26
44	7,57	8,04	6,02	682	727	6,39
45	7,79	8	2,66	669	710	5,95
46	8,33	7,97	4,42	279	291	4,21
47	8,45	8,12	3,98	284	282	0,71

48	8,5	8,08	5,07	287	294	2,41
49	8,61	7,93	8,22	1.261	1280	1,5
50	8,87	7,88	11,82	494	533	7,59
51	8,81	8,17	7,54	552	557	0,9
52	8,57	7,96	7,38	2.149	2040	5,2
53	8,68	7,91	9,28	1.294	1340	3,49
54	8,88	8,11	9,06	647	647	0
55	8,6	7,91	8,36	1.360	1320	2,99
56	8,96	7,94	12,07	710	731	2,91
57	8,54	7,74	9,83	161	172	6,61
58	8,4	7,94	5,63	217	227	4,5
59	9,47	8,06	16,09	212	230	8,14
60	8,15	8,27	1,46	467	398	15,95
61	8,46	7,95	6,22	587	387	41,07
62	8,29	8,32	0,36	392	385	1,8
63	8,43	8,06	4,49	288	261	9,84
64	8,5	8,13	4,45	235	241	2,52
65	8,84	8,06	9,23	205	220	7,06

## C.2. Error del balance iónico

Este consiste en una verificación porcentual de la condición de electroneutralidad de las aguas. Se utilizan los iones mayoritarios de la muestra, en este caso se utilizaron los cationes Na, Mg, K, Ca y los aniones SO<sub>4</sub>, Cl, HCO<sub>3</sub>, CO<sub>3</sub>.

$$\text{Error del Balance Iónico EBI (\%)} = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}} * 100$$

Casi la totalidad de las muestras están bajo el 10% de error, teniendo 5 muestras sobre este porcentaje siendo la muestra ID 20 la que presenta el error mayor (19.1%), la siguen las muestras: ID 13 con 11,7%, ID 15 con 13,3%, ID 16 con 12,9% y ID 60 con 11,2%. Las muestras fueron consideradas para la interpretación de los resultados.

ID	Ca [mg/L]	Mg [mg/L]	Na [mg/L]	K [mg/L]	SO <sub>4</sub> [mg/L]	Cl [mg/L]	HCO <sub>3</sub> [mg/L]	CO <sub>3</sub> [mg/L]	Suma aniones [meq/L]	Suma cationes [meq/L]	BI (%)
1	142	18,3	23,3	3,51	270	54	87,7	0,2	8,593	9,709	6,1
2	10	0,19	9,7	0,4	6	<1	44,8	0,1	0,863	0,948	4,687
3	23	3,13	18,8	0,41	34	1	81,8	0,2	2,084	2,235	3,503
4	39	14,3	25,8	0,83	77	22	132,1	0,3	4,4	4,27	-1,504
5	106	0,04	38,4	0,24	300	3	8,7	0	6,477	6,979	3,729
6	118	0,77	45,2	0,31	320	3	53,1	0,1	7,625	7,937	2,001
7	17	0,15	27,3	0,28	52	1	53,1	0,1	1,985	2,056	1,759
8	19	3,92	15	0,41	10	1	97,2	0,2	1,837	1,935	2,615
9	19	0,04	109	6,66	30	45	25,9	80,3	4,996	5,863	7,986

10	3	0,03	64	0,21	9	54	70,2	1,4	2,908	2,94	0,55
11	19	0,69	47,1	0,65	38	27	95,5	0,3	3,129	3,071	-0,93
12	7	0,29	46,3	5,25	9	3	118,2	0,4	2,223	2,521	6,282
13	2	0,04	38,3	24,4	20	7	75,5	1,2	1,892	2,393	11,687
14	65	3,29	147	0,77	340	19	90,1	0,2	9,103	9,932	4,354
15	174	16,2	17	1,28	290	3	129,7	0,3	8,263	10,805	13,335
16	501	25,1	25,1	1,68	510	3	672	1	21,759	28,25	12,979
17	22	2,73	36	0,79	19	<1	133,9	0,5	2,608	2,91	5,483
18	147	16,2	26,9	2,66	240	8	253	0,8	9,4	9,921	2,697
19	59	5,28	24,1	1,04	97	<1	126,5	0,4	4,108	4,459	4,098
20	218	126	117	2,41	150	11	880,8	2,2	17,948	26,419	19,093
21	68	58,3	297	2,15	240	250	541,8	2,7	21,024	21,166	0,337
22	54	22,3	29,1	0,65	29	6	260,7	1,3	5,091	5,817	6,662
23	184	6,3	13,9	0,76	400	1	81,8	0,2	9,709	10,342	3,157
24	705	18	757	1,94	1.900	920	16,2	0	65,801	69,694	2,873
25	764	50,9	1.080	2,46	2.200	1.700	39	0	94,428	89,409	-2,73
26	177	5,35	261	1,67	35	720	66,4	0,1	22,131	20,681	-3,388
27	217	41	56,9	2,58	270	85	399,8	1,2	14,617	16,764	6,843
28	120	2,88	106	1,75	130	81	297,6	0,6	9,892	10,89	4,805
29	150	13	49,5	3,4	240	79	148,2	0,3	9,668	10,809	5,573
30	144	29,2	12,4	3,25	36	320	84,2	0,2	11,164	10,226	-4,387
31	173	20,7	43,2	1,15	270	150	161,9	0,4	12,524	12,261	-1,059
32	79	9,46	25	1,38	56	24	223,7	1,1	5,548	5,851	2,661
33	32	2,94	8,64	0,59	43	13	67,6	0,1	2,374	2,233	-3,069
34	75	12,8	93,7	2,9	240	39	148	0,5	8,543	8,952	2,335
35	66	9,28	74,9	2,78	65	150	108,3	0,3	7,371	7,391	0,139
36	22	1,49	3,56	0,79	52	2	13,3	0	1,358	1,398	1,446
37	129	14,3	142	3,66	240	250	104,3	0,2	13,769	13,894	0,455
38	102	11,5	31,9	2,36	230	57	98,8	0,2	8,026	7,494	-3,428
39	116	13,3	38,1	2,45	250	57	98,8	0,2	8,443	8,614	1,004
40	164	17,7	182	4,32	330	320	110,7	0,3	17,727	17,68	-0,131
41	175	13,8	155	4,4	370	280	108,5	0,2	17,392	16,737	-1,918
42	18	3	11,1	0,77	22	5	59,1	0,1	1,572	1,649	2,411
43	101	10,6	21,9	2,33	230	33	95,2	0,2	7,29	6,934	-2,501
44	106	10,9	23,7	2,56	250	36	135,7	0,3	8,458	7,293	-7,399
45	99	12,3	20,3	3,13	250	30	97,6	0,2	7,661	6,925	-5,048
46	37	6,65	11,9	0,78	29	8	120,2	0,3	2,81	2,935	2,164
47	37	6,45	11,4	0,74	29	8	120,5	0,4	2,819	2,895	1,345
48	35	6,78	13,5	0,9	33	7	119,4	0,4	2,856	2,918	1,08
49	265	11,9	27,6	2,2	570	42	98,4	0,2	14,68	15,486	2,672
50	79	10,1	13,3	3,25	160	7	110,3	0,2	5,346	5,443	0,899
51	100	13,3	6,21	1,16	140	1	162,6	0,6	5,63	6,394	6,352
52	195	16,5	220	5,11	440	390	104,7	0,3	21,894	20,804	-2,554
53	213	20,4	57,9	3,26	470	93	88,9	0,2	13,879	14,93	3,647
54	78	18	32,3	2,56	160	36	124,1	0,4	6,397	6,851	3,432
55	226	21,3	49,4	4,06	480	80	98,4	0,2	13,876	15,305	4,894
56	80	5,6	57,8	0,55	29	140	100,8	0,2	6,213	6,988	5,875
57	24	1,44	2,35	0,44	40	<1	36,3	0	1,428	1,432	0,123
58	31	4,68	4,24	0,37	47	3	64	0,1	2,116	2,129	0,299
59	30	4,5	4,02	0,36	44	2	59,7	0,2	1,958	2,054	2,39
60	63	18,7	10,8	3,1	41	2	197,4	1	4,18	5,238	11,233
61	47	3,71	20,2	0,48	14	71	75	0,2	3,531	3,546	0,215
62	52	12,7	12,7	1,26	50	<1	177	0,9	3,973	4,23	3,125
63	34	5,91	9,51	0,47	41	6	89,5	0,3	2,501	2,612	2,177

64	30	5,61	10,4	0,45	30	5	91,9	0,3	2,283	2,425	3,033
65	27	5,19	10,1	0,53	31	2	84,7	0,3	2,101	2,23	2,98

### C.3. Relación CE/SDT

Esta comparación entre los parámetros CE y SDT dada por la ecuación:

$$F1 = \frac{SDT \text{ calculados}}{CE \text{ laboratorio}}$$

El factor F1 debiese estar en el rango 0.55 a 0.7 idealmente, aunque para validar los valores F1 debe estar entre 0.5 y 1. Los resultados indican 7 muestras están levemente fuera del rango permitido, a estas muestras se le aplica otro factor, F2:

$$F2 = \frac{SDT \text{ calculados}}{CE \text{ terreno}}$$

De las 7 muestras, 3 de ellas tienen F2 entre el rango óptimo, por lo que para estas muestras se debería descartar los valores de CE de laboratorio. Para el caso de las otras 4 muestras, que tienen ambos factores fuera del rango, se debe descartar el valor de SDT.

ID	SDT [mg/L]	CE [uS/cm]	CE in situ [uS/cm]	F1	F2
1	555,51	952	879	0,5835	
2	49,09	102	89	0,4813	0,5516
3	121,74	227	216	0,5363	
4	245,53	417	414	0,5888	
5	452,48	685	682	0,6606	
6	514,28	771	764	0,667	
7	124,73	230	238	0,5423	
8	98,53	196	187	0,5027	
9	302,7	644	960	0,47	0,3153
10	166,24	352	360	0,4723	0,4618
11	180,44	364	354	0,4957	0,5097
12	130,24	231	227	0,5638	
13	130,14	204	443	0,6379	
14	620,66	1000	956	0,6207	
15	566,88	837	834	0,6773	
16	1407,88	1630	1923	0,8637	
17	147,72	279	252	0,5295	
18	567,96	849	831	0,669	
19	250,02	428	398	0,5842	
20	1068,41	1480	2005	0,7219	
21	1187,25	1870	1975	0,6349	
22	271,85	487	488	0,5582	
23	647,36	901	810	0,7185	
24	4310,94	5450	4860	0,791	

25	5817,76	7690	7360	0,7565	
26	1233,62	2310	2320	0,534	
27	873,48	1360	1366	0,6423	
28	592,23	969	875	0,6112	
29	609,9	973	889	0,6268	
30	587,45	1200	1189	0,4895	0,4941
31	739,65	1160	1090	0,6376	
32	307,04	570	540	0,5387	
33	134,37	281	260	0,4782	
34	537,8	831	778	0,6472	
35	422,56	770	683	0,5488	
36	89,04	167	169	0,5332	
37	831,76	1340	1289	0,6207	
38	484,56	840	736	0,5769	
39	526,65	826	733	0,6376	
40	1073,82	1760	1735	0,6101	
41	1053,4	1650	1533	0,6384	
42	90,47	175	157	0,517	
43	446,83	707	638	0,632	
44	497,56	727	682	0,6844	
45	463,93	710	669	0,6534	
46	153,93	291	279	0,529	
47	153,19	282	284	0,5432	
48	156,18	294	287	0,5312	
49	968,5	1280	1261	0,7566	
50	328,45	533	494	0,6162	
51	343,27	557	552	0,6163	
52	1319,41	2040	2149	0,6468	
53	902,56	1340	1294	0,6736	
54	389,26	647	647	0,6016	
55	910,56	1320	1360	0,6898	
56	363,95	731	710	0,4979	0,5126
57	86,83	172	161	0,5048	
58	122,69	227	217	0,5405	
59	114,88	230	212	0,4995	0,5419
60	237,6	398	467	0,597	
61	194,19	387	587	0,5018	
62	217,46	385	392	0,5648	
63	141,89	261	288	0,5436	
64	127,66	241	235	0,5297	
65	118,42	220	205	0,5383	