



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

# HIDROGEOLOGÍA DE LA ZONA COSTERA DE NAVIDAD REGIÓN DE O'HIGGINS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

MIGUEL ÁNGEL SILVA RÍOS

PROFESORA GUÍA:  
LINDA DANIELE

PROFESOR CO-GUÍA:  
MATÍAS TAUCARE TORO

COMISIÓN:  
VALENTINA FLORES AQUEVEQUE

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto The Water-Energy-Food nexus in urban areas of Central Chile (WEF Chile) ANID #ATE220029.

SANTIAGO DE CHILE  
2024

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:** Geólogo  
**POR:** Miguel Ángel Silva Ríos  
**FECHA:** 2024  
**PROFESORA GUÍA:** Linda Daniele

## **HIDROGEOLOGÍA DE LA ZONA COSTERA DE NAVIDAD REGIÓN DE O'HIGGINS**

La presente investigación busca comprender la influencia de los factores naturales y antrópicos en la dinámica y calidad del agua subterránea y superficial en el sector de Navidad, ofreciendo una perspectiva valiosa para el entendimiento del funcionamiento de los acuíferos costeros en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins aún poco estudiados y sometidos a una creciente presión antrópica debido al desarrollo urbano.

Este trabajo de título comprende un análisis detallado de los derechos de agua subterránea otorgados en el sector, el cual muestra que, en un período de 10 años (2010-2020) el promedio del caudal extraído en el área se ha cuadruplicado, y la suma de todos los derechos de extracción alcanza un caudal total que es nueve veces mayor en el año 2020 respecto al 2010. Se evalúa la composición, los procesos fisicoquímicos de las aguas y el cumplimiento de los estándares de calidad del recurso hídrico establecidos por las normas chilenas de agua potable y riego. Los resultados indican que 14 de los 26 muestras de pozos y norias exceden los límites permitidos en al menos uno de los parámetros evaluados.

Para entender mejor las relaciones subyacentes entre los iones y evaluar las posibles fuentes de los mismos así como los procesos de interacción con el medio se ha utilizado un análisis exploratorio estadístico, un análisis estudio de la variación espacial y se ha utilizado el método de análisis factorial. Los datos químicos indican una heterogeneidad en las composiciones. Aquellas muestras de agua que se encuentran cercanas a la costa son cloruradas-sódicas y las que se encuentran distribuidas al interior son en su mayoría bicarbonatadas-cálcicas. Los iones mayores  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  presentan una buena correlación entre sí y sorprende que el  $\text{HCO}_3^-$  no tenga relación con los otros iones analizados. Las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  oscilan entre 0,05 y 396,47 mg/L. Tres muestras superaron el límite de 50 mg/L establecido por la normativa chilena, con valores de 51,21, 129,93 y 396,47 mg/L. Estas aguas provenían de área con actividad agrícola.

Se han calculado 3 factores que explican el 91,15% de la varianza de los datos analizados. El primer factor, compuesto por  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y B, cuyas puntuaciones máximas se registran en las zonas cercanas a la costa, ha sido asociado a la posible influencia marina en las muestras analizadas. El segundo factor saturado por  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y Sr, se ha interpretado como la interacción agua-roca. El tercer factor saturado únicamente por el ión  $\text{HCO}_3^-$  ha sido interpretado como el aporte procedente del fenómeno de "seeping", donde la oxidación anaeróbica del  $\text{CH}_4$  y la reducción del  $\text{SO}_4^{2-}$ , genera sulfuros y precipitación de carbonato autigénico en la zona de estudio. Esta interpretación es coherente con la distribución de altas puntuaciones del tercer factor en la zona donde otros autores han identificado el paleo seep de Navidad.

Mediante el análisis isotópico se interpreta que en las muestras procedentes de zonas próximas al cauce principal del río Rapel, la recarga focalizada e indirecta inducida por este río puede ser predominante, mientras que en otras zonas, la recarga directa y difusa a través de lluvias y vaguada costera puede ser relevante.

Para resumir las conclusiones, se presenta un modelo hidrogeológico conceptual que integra los procesos hidrogeoquímicos involucrados en el agua subterránea del área de estudio.

*“Una pequeña tarea diaria,  
siempre que realmente sea diaria,  
sobrepasará los trabajos  
de un intermitente Hércules”*

*Anthony Trollope*

# Agradecimientos

Esta tesis forma parte del proyecto The Water-Energy-Food nexus in urban areas of Central Chile (WEF Chile) y ha sido financiado por ANID #ATE220029 y dirigido por la Dra. Linda Daniele.

Para comenzar, agradezco a mi profesora guía Linda Daniele por la oportunidad de haber realizado mi memoria en un área tan fascinante como la Hidrogeología. Desde que inicié esta tesis tengo muy presente una de sus típicas preguntas “¿Qué no os preguntais nada?” Y sí, mientras más aprendo, más vasto se hace el campo de incógnitas! Gracias por abrirme la puerta para conocer desde la Hidrogeología una pequeña parte de este mundo, del cual, sin duda, nos queda mucho que descubrir. Amplió mi gratitud a mi profesor co-guía Matías Taucare por su apoyo al responder mis consultas y a la profesora Valentina Flores por aceptar ser parte de la comisión. Al Isma que me brindó de su tiempo en muchas ocasiones para “una consulta rápida”, que finalmente terminaba en más de una hora, al Foncho por su compañía en la campaña de muestreo y disposición. Doy gracias a todas y todos quiénes integran el equipo WEF por su apoyo en los terrenos y en el trabajo, gracias por su buena disposición y calidad humana.

Quiero agradecer sinceramente al equipo de laboratorio que conforman Verónica, Samuel y Erika por siempre brindar lo necesario a los estudiantes del WEF. Gracias por compartir conmigo su espacio de trabajo y por su incalculable paciencia.

Dentro de estas líneas doy gracias a mis compañeras y compañeros de plan común, si no fuese por ellos, no estaría terminando mi carrera en esta universidad. Recuerdo con gran cariño nuestras maratones de estudio y cada momento que hemos pasado juntos. Agradezco también a los chiquillos del CEG 2022 por confiar en mí ese año y por haber hecho muchas cosas bonitas para la Geocomunidad, espero que hayan quedado bellos recuerdos. Agradezco a los “geopanas” y a cada una/o de las personas que compartí en las aulas y en los terrenos. El cansancio, trabajo y esfuerzo se hacía ameno entre las risas y la calidez de todas/os ustedes.

Gracias a la Blanquis y a Tonya por su gran apoyo y su buena disposición de ayudarme, no sé qué haríamos como estudiantes sin ustedes. Quiero expresar mi aprecio a todas y todos quiénes frecuentan los pasillos del Departamento de Geología; a Rosita, Mariela y Julio por su labor que posibilita un montón de cosas que damos por sentadas. A Don Pedro por recibirme siempre con una sonrisa en la entrada. A Don Jaime, Luis y a todas/os que nos brindan un espacio grato para estudiar.

Aprovecho este espacio de agradecer a mi profesora Catalina Munzenmayer quién fue una de las principales impulsoras en mi infancia de mi amor por la ciencia. Pese a los años que han pasado, nunca olvidaré su apoyo.

Gracias a la Feña, mi pachamámica amiga que conocí en el sendero de Cochamó. La Feña que andaba con apuntes de Geología en la mochila. La que ama tanto las rocas, los minerales y la naturaleza, que hasta caminaba descalza para sentir sus pies en la tierra. Agradezco tus palabras de aliento y buena onda en estos años.



Agradezco a mi primo Cote que hablamos de vez en cuando, pero que siempre mantenemos contacto. También doy gracias a la señora Anita que me tuvo una enorme paciencia en mi infancia.

A mis tatas; a mi abuela Sofía que afortunadamente sigue aquí y a quiénes ya no se encuentran en este plano. Me encantaría ver que el primer hombre que me tomó en sus brazos cuándo nací, pudiera ver ahora que su nieto está cumpliendo uno de sus sueños. Te recuerdo con mucho cariño tata.

Hago una mención especial a mi pareja, amiga y confidente María Paz. Gracias por acompañarme en estos últimos dos años con tu amor y gran corazón. Encontrarnos ha sido uno de los regalos más bellos que me ha brindado la existencia. Has sido quién más ha sabido de mi proceso en este tiempo. Agradezco inmensamente tu atención, tus consejos y tus reconfortantes abrazos en aquellos momentos que las palabras no hacían falta. Te amo mucho mi Pachi. Y por supuesto, no puedo dejar de agradecer a tu familia que siempre me ha recibido con los brazos abiertos.

Manifiesto mi profundo agradecimiento a mi mamá Soledad y mi papá Hernán. Hay quiénes dicen que las almas eligen a sus padres antes de nacer, y, de ser así, he hecho la mejor elección en este mundo. Les agradezco por guiarme en esta vida, por inculcarme los valores que me mueven día a día y por enseñarme a no claudicar en cada una de mis batallas. Hemos pasado por situaciones complejas y he visto como se han esforzado por criarme a mí, a mis hermanas y a mí hermano. Me enseñaron que la vida no es fácil y han sido capaces de brindarme las herramientas necesarias para batir con las inclemencias de este camino. Gracias papás por ser la justa combinación entre cariño y racionalidad, por su infinita paciencia con el bebé de interminables llantos nocturnos, del inquieto niño que a los segundos de perder de vista se encaramaba como un monito en los árboles, a ese niño que a 25 años de nacer, hoy es un hombre que está logrando terminar una importante etapa de su vida.

Extiendo mis agradecimientos a cada una de mis hermanas y hermanos. A la Chusi que siempre me ha apoyado en todo lo que está a su alcance. A mi hermana Dharma que se esmeraba en enseñarme las materias en el colegio. A los “Pollos”: mi hermano Alan, compañero de mil aventuras, y a mis hermanos no sanguíneos Bruno y Eliseo que siempre están ahí en las buenas y en las malas.

Tengo la fortuna de que mi familia también es mi hogar. Son a ellos a quiénes debo dónde estoy y por quiénes daría todo de mí en esta vida. Se me anuda la garganta de tan sólo pensar en cuánto los amo y aprecio.

Finalmente, gracias a todas las personas de Navidad. A Yuri, por permitirme instalar un atrapanieblas al frente del balcón de su casa, y a todas/os quiénes me permitieron llevar a cabo este estudio. Un agradecimiento especial a Raúl, por su amabilidad y dedicación por ayudar desde el inicio. Ha sido un privilegio estudiar un área que hasta el día de hoy se mantiene hermosa. Espero que así sea por muchos años más.

# Tabla de Contenido

<b>Capítulo 1 Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2. Hipótesis.....	1
1.3 Objetivos .....	2
1.3.1 Objetivo general .....	2
1.3.2 Objetivos específicos.....	2
<b>Capítulo 2 Área de estudio .....</b>	<b>3</b>
2.1. Ubicación y accesos .....	3
2.2. Marco Geológico.....	4
2.2.1 Geología Regional .....	4
2.2.2. Geología área de estudio.....	4
2.3. Clima y recursos hídricos.....	9
2.3.1. Vaguada costera .....	11
2.3.2. Dinámica de mareas y procesos estuarinos.....	11
<b>Capítulo 3 Metodología .....</b>	<b>12</b>
3.1 Recopilación y análisis de antecedentes.....	12
3.2. Toma de muestras de agua y análisis de laboratorio .....	12
3.3. Tratamiento de datos .....	13
3.4. Análisis de Isótopos Estables de Agua .....	15
<b>Capítulo 4 Resultados y discusión .....</b>	<b>16</b>
4.1. Derechos de agua y extracción.....	16
4.1.1. Evolución temporal.....	16
4.2. Hidrogeoquímica.....	19
4.2.1. Parámetros fisicoquímicos.....	19
4.2.2. Elementos mayoritarios .....	22
4.2.3. Clasificación de aguas .....	27
4.2.3.1. Diagrama de Piper .....	27
4.2.3.2. Diagrama de Stiff.....	28
4.4. Elementos traza .....	29
4.5. Relaciones iónicas .....	33
4.6. Análisis estadístico multivariante.....	38
4.6.1. Análisis jerárquico de clústeres .....	38
4.6.2. Análisis factorial .....	41
4.7. Interacción agua roca .....	44
4.8. Isótopos estables.....	47
4.9. Interacción vaguada costera .....	50
4.10. Comparativa entre normas .....	53

4.10.1. pH .....	53
4.10.2. Elementos mayores.....	54
4.10.3. Elementos traza.....	55
4.11. Modelo hidrogeológico conceptual.....	57
<b>Capítulo 5 Conclusiones .....</b>	<b>59</b>
Bibliografía .....	61
Anexos.....	68

## Índice de Figuras

Figura 1: Mapa de ubicación y puntos de acceso .....	3
Figura 2: Mapa geológico de la zona de estudio modificado de Encinas (2006), Carta geológica de San Antonio – Melipilla SERNARGEOMIN (1996), mapa geológico de Chile SERNAGEOMIN (2003) y Gutiérrez et al (2013) .....	5
Figura 3: Ubicación Paleoseep de Navidad y registro fotográfico del afloramiento.....	8
Figura 4: Promedio anual de lluvia. Extraído de Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia – CR2 Estación Rapel (DGA, 2024).....	9
Figura 5: Temperatura media anual. Extraído de Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia – CR2 Estación Santo Domingo (Dirección meteorológica de Chile, 2024) .....	9
Figura 6: Mapa de red hidrográfica. Se muestran los nombres de esteros y quebradas del sector de estudio .....	10
Figura 7: Atrapanieblas de 1,8m de longitud y 1,3m de alto .....	12
Figura 8: Diferentes tipos de muestras de agua tomadas durante la realización de la presente memoria de título .....	13
Figura 9: Evolución temporal de extracciones desde el año 2004 hasta el 2020. Fuente de datos: DGA .....	17
Figura 10: Mapa derechos de agua. Datos de derechos de la DGA. Polígonos de acuíferos extraídos de la Dirección de Administración de Recursos Hídricos de la DGA .....	18
Figura 11: Mapa de evolución espacio temporal año 2010 y año 2020.....	19
Figura 12: Diagrama de caja de parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua .....	20
Figura 13: Distribución espacial de parámetros fisicoquímicos .....	21
Figura 14: Diagrama de caja de aniones de las muestras de agua subterránea y superficial .....	23
Figura 15: Diagrama de caja de cationes y sílice de las muestras de agua subterránea y superficial .....	24
Figura 16: Variación espacial de aniones.....	25
Figura 17: Variación espacial de cationes .....	27
Figura 18: Diagrama de piper de las muestras de agua .....	28
Figura 19: Mapa geológico con diagramas de Stiff.....	29

Figura 20: Diagrama de caja de elementos traza .....	30
Figura 21: Distribución espacial de elementos traza: Li, B y Sr .....	31
Figura 22: Distribución espacial de elementos traza: Mo, As, Mn y Fe .....	33
Figura 23: Matriz de correlación de elementos. En celeste aquellos coeficientes que se sitúan entre ( $ 0,3  -  0,5 $ ), en naranja coeficientes entre ( $ 0,5  -  0,7 $ ) en verde ( $> 0,7 $ ).....	34
Figura 24: Gráfico bivariable cloruro y sodio.....	35
Figura 25: Gráfico bivariable cloruro y calcio.....	35
Figura 26: Gráfico bivariable cloruro y magnesio .....	36
Figura 27: Gráfico bivariable cloruro y potasio.....	36
Figura 28: Gráfico bivariable cloruro y sulfato .....	36
Figura 29: Gráfico bivariable cloruro y elementos traza .....	37
Figura 30: Dendograma de análisis jerárquico de conglomerados para muestras y variables.....	38
Figura 31: Diagramas de stiff y promedio de conductividad eléctrica por clúster .....	39
Figura 32: Diagrama de caja nitrato y elementos traza según clúster.....	40
Figura 33: Distribución espacial de clusters .....	41
Figura 34: Gráficos de cargas factoriales.....	42
Figura 35: Distribución y variación espacial de los tres factores calculados .....	44
Figura 36: Relación molar $\text{Na}^+$ y $\text{Cl}^-$ .....	45
Figura 37: Relación molar $\text{Na}^{2+}$ - $\text{Cl}^-$ y $\text{HCO}_3^-$ .....	46
Figura 38: Relación molar entre $\text{Ca}^{2+}$ y $\text{HCO}_3^-$ .....	46
Figura 39: Relación molar entre $\text{Ca}^{2+}$ y $\text{HCO}_3^-$ .....	47
Figura 40: Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ con los datos de las muestras de agua. Se grafica la línea de agua meteórica local (33°S Chile MWL), definida por Taucare et al (2020) y la línea meteórica mundial de Craig (1961) junto con los boxplot de variabilidad de los datos de la estación de Valparaíso de IAEA (2019). A la derecha, un zoom para observar algunos detalles .....	48
Figura 41. Efecto orográfico-continental en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ a 33°S. A la derecha, un zoom para observar algunos detalles .....	49
Figura 42: Gráficos de isótopos con incorporación de clústeres. A la derecha, un zoom para observar algunos detalles .....	50
Figura 44: Mapa referencial del área de incendio y ubicación de atrapanieblas. El perímetro del área afectada es estimativo.....	52
Figura 45: Gráfico comparativo del pH de cada muestra con los límites establecidos por la norma chilena .....	53
Figura 46: Concentración del sulfato, cloruro, magnesio y nitrato en muestras de pozos, norias y manantial con los límites de la NCh 1333/78 y NCh 409/1 .....	54
Figura 47: Concentración de litio, boro, vanadio y hierro en muestras de pozos, norias y manantial con el límite de la NCh 1333/78 específicamente para cítricos .....	55
Figura 48: Concentración de manganeso, arsénico, selenio y molibdeno en muestras de pozos, norias y manantial con los límites de la NCh 1333/78 y NCh 409/1.....	56
Figura 49: Modelo Hidrogeológico conceptual del sector de estudio. No está a escala.....	58
Figura 50: Gráfico de balance iónico con barras de error al 5%. .....	69

# Índice de Tablas

Tabla 1. Prueba de KMO y Bartlett y Matriz de componente rotado .....	42
Tabla 2. Reacciones de disolución .....	45
Tabla 3. Contenido de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ .....	48
Tabla 4. Datos de recolección de muestras de vaguada costera .....	51
Tabla 5. Balance iónico de las muestras de agua superficial y subterránea.....	68
Tabla 6. Resultados análisis químico para aniones en [mg/L].....	70
Tabla 7. Resultados análisis químico para cationes y $\text{SiO}_2$ en [mg/L].....	71
Tabla 8 Resultados análisis químico elementos traza parte 1 en [ $\mu\text{g/L}$ ].....	72
Tabla 9. Resultados análisis químico elementos traza parte 2 en [ $\mu\text{g/L}$ ].....	73
Tabla 10. Resultados isótopos estables de agua.....	74
Tabla 11. Resultados isótopos estables de agua de precipitaciones en Valparaíso (IAEA/WMO, 2019) .....	75
Tabla 12. Parámetros fisicoquímicos .....	76
Tabla 13. Concentraciones máximas admitidas en agua de riego.....	77
Tabla 14. Concentraciones máximas admitidas en agua potable .....	78

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Planteamiento del problema

A nivel mundial, el agua subterránea constituye el 99% del agua dulce (UNESCO, 2022), lo que la convierte en un recurso clave para la gestión sostenible del agua. En Chile, y especialmente en la Región de O'Higgins, el estrés hídrico se intensifica debido al aumento de la demanda, los factores climáticos, normativos y de gestión (SNU Chile, 2021; SRMA, 2020). El crecimiento demográfico, junto con la actividad agrícola e industrial, aumenta significativamente la demanda de agua, lo que subraya la importancia de entender la disponibilidad y el funcionamiento del agua subterránea.

Chile cuenta con cerca de 8,000 km de costa (BCN, 2024), y los estudios relacionados con la dinámica de las aguas subterráneas en acuíferos costeros son limitados. Esta escasez de información se debe a la falta de puntos de monitoreo e instalaciones adecuadas que permitan obtener datos relevantes de manera continua. En particular, en la región de O'Higgins, es necesario contar con un conocimiento detallado de los acuíferos existentes, los cuales suman un total de 49 (SRMA, 2020). Sin esta información, enfrentar los desafíos de la gestión hídrica en la zona se vuelve aún más complejo, ya que la disponibilidad y calidad de las aguas subterráneas influyen en actividades económicas y en el abastecimiento de las comunidades locales.

En el sector existe un auge en el desarrollo poblacional y un progresivo avance agrícola e industrial, y, en consecuencia, un aumento del consumo de los recursos hídricos, particularmente de los subterráneos. Es por ello que se hace necesario comprender las interacciones que existen entre el entorno y los recursos hídricos del sector, para tener una línea base al momento de implementar medidas que apoyen la gestión hídrica.

El presente estudio busca comprender el comportamiento de los recursos hídricos e identificar los factores que controlan su flujo a través del levantamiento de un modelo hidrogeológico conceptual que represente de manera simplificada el comportamiento del agua subterránea en el sector de Navidad, siendo potencialmente extrapolable y útil para comprender la dinámica de los acuíferos presentes en la zona costera de la Región de O'Higgins.

### 1.2. Hipótesis

La caracterización hidrogeológica en la zona de Navidad ofrece una valiosa perspectiva del comportamiento del agua subterránea en la zona costera de la Región de O'Higgins. En este estudio se sostiene que los sistemas hidrogeológicos costeros tienen una interacción directa con los esteros y la vaguada costera en la recarga de aguas subterráneas. Para contrastar esta hipótesis se analizarán los antecedentes y los nuevos datos obtenidos en diferentes campañas de muestreo.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Analizar y caracterizar los sistemas hidrogeológicos de la zona de Navidad (Región de O'Higgins) con el fin de comprender la interacción entre los sistemas subterráneos costeros, los esteros y la vaguada costera, mediante el estudio de antecedentes y la evaluación de datos obtenidos en campañas de muestreo específicas. Este objetivo general permite abarcar tanto el análisis detallado de datos previos como el uso de información de nuevas campañas de muestreo para comprender las dinámicas de recarga de agua subterránea en la zona costera de Chile Central.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar las fuentes y procesos fisicoquímicos que dan lugar a los iones disueltos en el agua subterránea.
- Determinar las probables cotas de las precipitaciones asociadas a los procesos de recarga mediante el uso de los isótopos estables de la molécula de agua

# Capítulo 2

## Área de estudio

Esta sección presenta toda la información relevante relacionada con el área de estudio, la cual se organiza en las siguientes categorías: localización y vías de acceso, marco geológico, clima y recursos hídricos.

En la Figura 1 se presenta el mapa con la ubicación y vías de acceso. Para acceder al área de estudio desde Santiago, se recomienda tomar la autopista 78 en dirección a San Antonio y luego tomar la salida en Puente Leyda/G-904 hacia Santo Domingo. Una vez en la G-904, se debe continuar recto y seguir por la misma vía. Posteriormente, se deberá girar a la izquierda en Avenida San Juan/G-904 y luego tomar el desvío a la izquierda en Puente Lo Gallardo/66. Continuando por Puente Lo Gallardo/66, se deberá mantener el carril derecho para luego tomar la G-80-I. Siguiendo por esta vía, se debe continuar por la derecha en Camino a Matanza/I-226 y seguir recto. Después, es necesario girar a la izquierda en Calle Pedro Aguirre Cerda/I-198 y luego nuevamente a la izquierda en Los Ruanos/I-196. Siguiendo por Los Ruanos/I-196, finalmente se llegará a Camino de Navidad a Rosario/I-196.

### 2.1. Ubicación y accesos

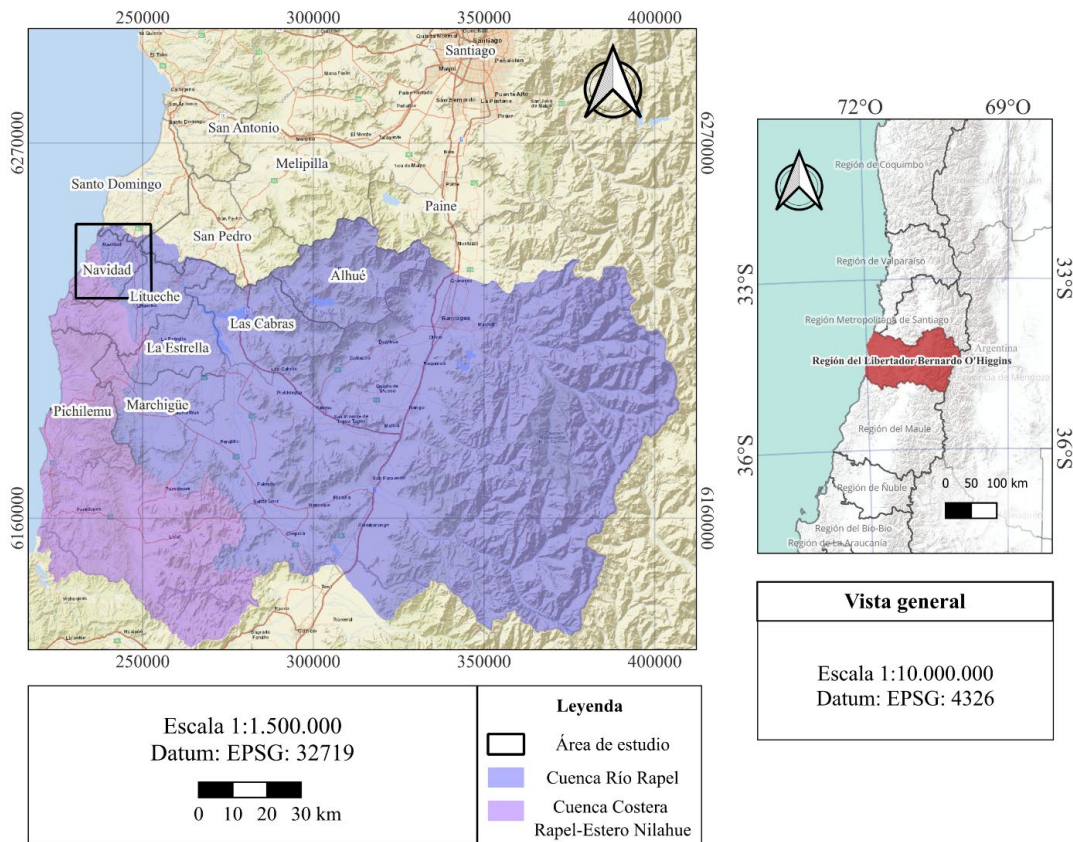


Figura 1: Mapa de ubicación y puntos de acceso



## 2.2. Marco Geológico

### 2.2.1 Geología Regional

Entre las latitudes 33°S y 35°S, la región de O'Higgins se caracteriza por la presencia de tres unidades morfoestructurales continentales significativas, que se organizan de oeste a este: la Cordillera de la Costa, la Depresión Central y la Cordillera Principal.

La Cordillera de la Costa está compuesta por un basamento del Paleozoico tardío al Triásico en su flanco occidental, y secuencias intra-arco del Jurásico al Cretácico con inclinación hacia el este en su flanco oriental (Farías, 2010). Estas secuencias se extienden hasta la mitad de la Depresión Central (Thomas, 1958).

Esta región se encuentra justo al sur de la zona de subducción de la dorsal Juan Fernández, que está aproximadamente frente a las costas de Valparaíso y marca el límite sur de una zona de subducción plana que se extiende entre los 28° y 33°S (Yañez et al., 2001)

### 2.2.2. Geología área de estudio

La Geología de la comuna de Navidad (Figura 2) presenta una variedad de formaciones geológicas que abarcan desde rocas ígneas y metamórficas en la Cordillera de la Costa, hasta sedimentos marinos y fluviales en las llanuras costeras.

La Formación Navidad no ha estado exenta de controversias en su origen y edad. Se atribuye al Mioceno temprano a medio, como un ambiente marino somero, en contraposición a la hipótesis de subsidencia profunda de Encinas et al. (2008). Encinas propone una rápida subsidencia de 1.500m en el Tortoniano (11,6 Ma), seguida por un levantamiento hacia los 5 Ma, pero evidencias recientes sugieren un entorno costero somero. Los fósiles de trazas, como *Ophiomorpha nodosa* y *Skolithos linearis*, junto a estructuras sedimentarias y abundante polen continental, apoyan un ambiente de plataforma exterior somera (Encinas, 2006). Aunque existen trazas de organismos de aguas profundas, como *Chondrites* y *Zoophycos*, estas no indican necesariamente profundidades mayores a 150-200 m, ya que también se encuentran en ambientes someros con alta materia orgánica (Vossler y Pemberton, 1988; Boucot y Theron, 2001).

Una transgresión marina en el Mioceno medio, iniciada hacia 15 Ma y alcanzando su máximo entre 12-11 Ma, cubrió aproximadamente 1,000 km de costa (30°S-40°S), acumulando sedimentos más finos en las unidades superiores de la formación (Le Roux et al., 2005; Le Roux y Elgueta, 2000). Esta transgresión fue seguida por un cambio regresivo en el Mioceno tardío, reflejado en la deposición de la Formación Licanheu, lo cual indica una elevación progresiva (Encinas, 2006).

El levantamiento tectónico de los Andes centrales también estuvo implicado con un incremento significativo de altitud desde el Mioceno tardío cercano a los 11 Ma en adelante, como lo

evidencian los cambios costeros de subsidencia y elevación en la región del Pacífico sudamericano (Gregory-Wodziki, 2000; Bissig et al., 2002).

El territorio está formado por suaves colinas de baja altura, características de formaciones costeras. En esta zona la desembocadura del Río Rapel contribuye al depósito de material sedimentario hasta La Boca (Börgel, 1983). Las unidades geomorfológicas que componen la zona costera son la plataforma litoral baja, que comprende costas de playa, costas rocosas bajas que se sitúan aledañas a las terrazas marinas hacia el Este, características de La Vega de Pupuya, Matanzas y Las Brisas, la planicie litoral en la desembocadura del Río Rapel, terrazas marinas y campos dunarios, destacando las dunas de la Vega de Pupuya, duna el Culenar, duna de Matanzas, dunas de Centinela, duna de las Brisas y duna de La Boca (Sitrual, 2021).

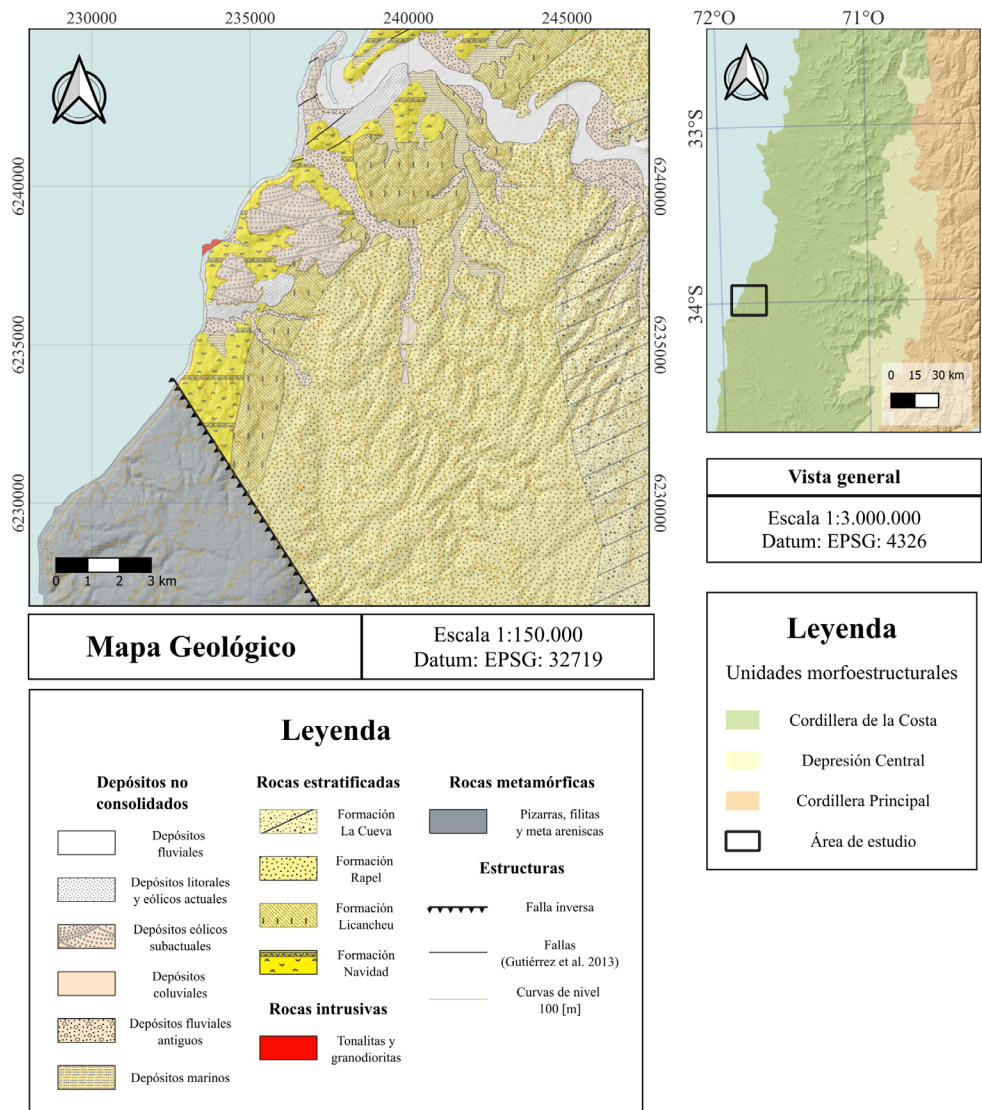


Figura 2: Mapa geológico de la zona de estudio modificado de Encinas (2006), Carta geológica de San Antonio – Melipilla SERNARGEOMIN (1996), mapa geológico de Chile SERNARGEOMIN (2003) y Gutiérrez et al (2013)

### 2.2.2.1. Depósitos no consolidados

Los depósitos no consolidados de la zona de estudio, basado en (SERNAGEOMIN, 1996) se clasifican como:

- Depósitos litorales y eólicos actuales (Qe): Corresponden a sedimentos no consolidados, compuestos por arenas y gravas de bolones bien redondeados, con estratificación horizontal predominante y estratificación cruzada de bajo ángulo: incluye láminas arenosas negras que concentran minerales pesados; a dunas activas compuestas por arenas grises de buena selección, con estratificación cruzada de gran ángulo y ondulitas superficiales. Morfología de dunas transversales indica dirección del viento predominante hacia el nor-noreste.
- Depósitos eólicos subactuales (Qd): Sedimentos no consolidados de paleodunas inactivas, compuestos por arenas grises bien seleccionadas, con estratificación cruzada de gran ángulo, cubiertos por vegetación y desarrollo urbano.
- Depósitos coluviales (Qc): Sedimentos no consolidados, ubicados en las cabeceras de las quebradas; comprenden principalmente depósitos gravitacionales correspondientes a flujos en masa, matriz-soportados, de muy mala selección granulométrica, que pueden incluir desde bloques hasta arcillas, interdigitados con lentes de arenas y gravas generados por pequeños cursos de agua, permanentes o esporádicos.
- Depósitos fluviales (Qf): Sedimentos no consolidados de cursos fluviales activos. Predominan facies de relleno de canal con base erosiva, constituidas por gravas clasto-soportadas, compuestas por bolones redondeados a bien redondeados, de baja esfericidad, en parte imbricados. Lentes de arenas con estratificación plana-horizontal y cruzada y escasos limos finamente laminados.
- Depósitos fluviales antiguos (Qfa): Sedimentos no consolidados que forman terrazas; compuestos por gravas, arenas y limos, ubicadas a alturas de 3-30m con respecto al curso fluvial actual y sedimentos no consolidados de cursos fluviales abandonados, compuestos por gravas, arenas y limos, con desarrollo de cubierta vegetal.
- Depósitos marinos (Qm): Sedimentos no consolidados, marinos a transicionales, constituidos por limos, arenas y gravas con niveles de roca coquina. En parte, estas formas han sido disectadas por procesos aluviales y cubiertas por sus depósitos.

### 2.2.2.2. Rocas estratificadas

- Formación Navidad: Esta formación está compuesta de areniscas, limolitas, conglomerados y coquinas. Se extiende desde la desembocadura del río Rapel, en la playa de Punta Perro, hasta llegar a Matanzas, con un promedio de grosor de 250 metros según

(Gutiérrez, 2011) La base de esta formación se encuentra en Punta Perro, sobre un monzogranito del Paleozoico (con una edad aproximada de  $289 \pm 7$  millones de años según la datación de biotitas y granodioritas biotita-anfibolita de Kenlace; Hervé et al., 1988). Su composición litológica incluye un estrato de conglomerado en su base, con unos 3 metros de espesor, sobre el cual se superponen capas alternadas de areniscas con lentes de fango (Encinas, 2006 y Gutiérrez, 2011). Su edad ha sido fuente de controversia, pero se establece un rango entre el Mioceno tardío al Mioceno temprano.

- Formación Licancheu: Se compone principalmente de areniscas, con conglomerados y limolitas en menor proporción. Se encuentra en contacto concordante (paraconformidad) con la Formación Navidad y en contacto discordante con el basamento granítico. Su contacto superior es concordante (paraconformidad) con la Formación Rapel. Su espesor máximo, medido en la localidad de Licancheu, es de 41 metros, aunque cerca de Rapel existe una zona donde la Formación Rapel se apoya directamente sobre el basamento. Esto indica que el grosor de la Formación Licancheu varía entre aproximadamente 40 y 0 metros. Los afloramientos de esta unidad son escasos y suelen encontrarse en los cerros cercanos a la costa, entre el río Rapel al norte y Boca Pupuya al sur. Los afloramientos más importantes se encuentran en la orilla sur del río Rapel en Licancheu y al norte del cementerio de Navidad (Encinas, 2006). Según las correlaciones estratigráficas, se establece una edad pliocena indeterminada.
- Formación Rapel: Está constituida principalmente por areniscas, con pocos conglomerados y limolitas. Se superpone en paraconformidad a la Formación Licancheu y de manera discordante al basamento granítico. Se encuentra en paraconformidad por debajo de la Formación La Cueva. La potencia de la Formación Rapel varía entre 154 y 0 metros. Al igual que la formación Licancheu, según las correlaciones estratigráficas, se establece una edad pliocena indeterminada.
- Formación La Cueva: Esta unidad está constituida de areniscas, escasos conglomerados y una cantidad mínima de limolitas. Sobreyace en paraconformidad a la Formación Rapel y discordantemente al basamento granítico. La edad se establece como pliocena indeterminada en base a estudios en fósiles de moluscos y dientes de tiburón y dataciones radiométricas (Herm, 1969).

### 2.2.2.3. Rocas intrusivas

- Tonalitas y granodioritas: Corresponden a plutones irregulares y alargados, descritos como rocas de color gris medio, verdoso, grano grueso, con texturas hipidiomórfica a alotriomórfica granular, con variedades porfídicas subordinadas. Incluyen cristales de plagioclasa, feldespato, reemplazo de piroxeno por anfíbol y biotita en los términos más básicos (SERNAGEOMIN, 1996).

#### 2.2.2.4. Rocas metamórficas

- Pizarras y filitas: Según (SERNAGEOMIN, 2003) las rocas metamórficas del sector corresponden a pizarras, filitas y meta areniscas con metamorfismo de bajo gradiente P/T (Serie Oriental) del Carbonífero temprano. También se refiere a esta unidad como un basamento ígneo - metamórfico indiferenciado, en el que se presentan afloramientos de rocas granodioríticas de manera local cercanos a la falla inversa (Lavenu y Encinas, 2005) o también en sectores reconocido como un basamento granítico (Tavera, 1979).

#### 2.2.2.5. Paleoseep de Navidad

Una particularidad geológica del sector es el registro de emanación de metano fósil en el Paleoseep de Navidad (Contardo-Berrios et al., 2017). Los paleoseeps o cold seeps fósiles, se encuentran en diferentes zonas del mundo en estratos marinos exhumados que conservan fauna y carbonatos autigénicos, lo que indica oxidación de metano termogénico (Campbell, 1992) como también biogénico (Claypool et al., 2006). Los paleoseeps confieren un paralelismo con las comunidades modernas de seeps de metano y brindan directrices para su identificación. En la actualidad a lo largo del margen chileno se han reportado sitios de cold seeps activos en Concepción (~33°S) (Sellanes et al., 2004), Taitao (~47°S) (Quiroga y Levin, 2010) y a 60km al Noreste de Navidad en el Quisco (~33°S) (Muñoz et al., 2016).

En cuanto a la composición mineralógica del Paleoseep de Navidad, está formada principalmente por calcita magnesiana, en su mayoría como micrita y en menor proporción como esparita. Entre los componentes minoritarios no carbonáticos se encuentran cuarzo, albita, anfíboles, ortoclasa y microclina, así como fragmentos de roca, principalmente volcánica. Este afloramiento alberga una diversidad de organismos como bivalvos, gasterópodos, teredos en madera fósil, microbialitas, entre otros. Las dataciones posibilitan correlacionar su edad con la Formación Navidad (Contardo-Berrios et al., 2017). En la Figura 3 se muestra la ubicación del afloramiento del Paleoseep de Navidad.

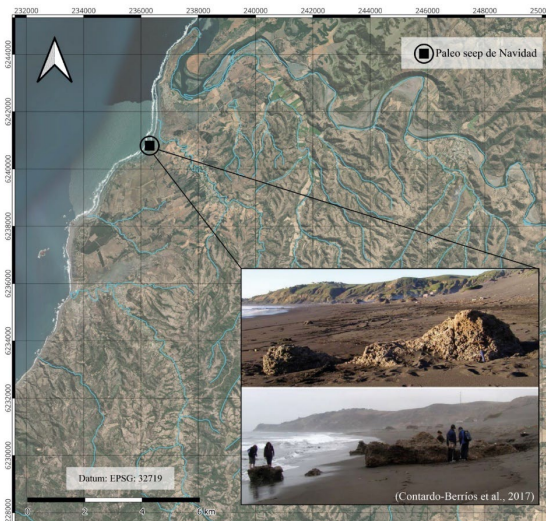


Figura 3: Ubicación Paleoseep de Navidad y registro fotográfico del afloramiento

## 2.3. Clima y recursos hídricos

La comuna de Navidad presenta un clima de características mediterráneas, con una marcada influencia oceánica que se refleja en las temperaturas costeras. Esta influencia resulta en una baja amplitud térmica diaria y estacional entre los períodos de sequía y lluvias.

En la Figura 3 se presenta la variabilidad de los promedios anuales de precipitación, utilizando los datos disponibles de la estación meteorológica Rapel de la DGA, correspondientes al período 1968-2018. Con un intervalo de cobertura de datos del 60%, se obtuvo un promedio anual de precipitación de 427,4 mm.

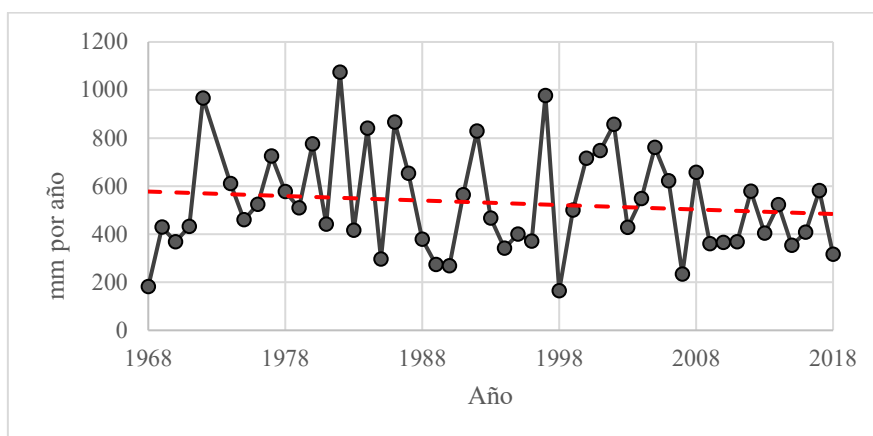


Figura 4: Promedio anual de lluvia. Extraído de Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia – CR2 Estación Rapel (DGA, 2024)

La temperatura media de la zona, como se observa en la Figura 4, varía entre 11°C y 13°C, con una tendencia al alza en las últimas décadas. Los datos abarcan el período 1968-2023, basado en un 60% de los datos reportados por la estación Santo Domingo de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), ubicada a 40 km al noreste de la localidad de Navidad.

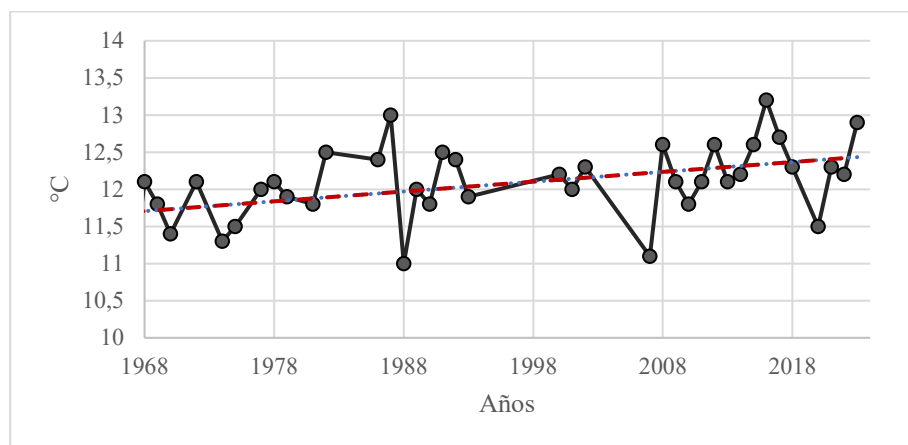


Figura 5: Temperatura media anual. Extraído de Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia – CR2 Estación Santo Domingo (Dirección meteorológica de Chile, 2024)



Dentro del área, se encuentran presentes la cuenca del Río Rapel y la cuenca costera Río Rapel – Estero Nilahue, siendo la primera la que más énfasis tendrá en el estudio.

La cuenca del Río Rapel es un sistema hidrográfico que sustenta diferentes usos del agua en la Región de O'Higgins. Dicho sistema incluye al Río Rapel y sus afluentes, los ríos Cachapoal y Tinguiririca, que se unen en Las Juntas en la Cordillera de la Costa (CSIRO, 2016).

La cuenca Costera Río Rapel Estero Nilahue es de origen pluvial y se localiza entre la línea costera y el borde oriental de la Cordillera de la Costa. Esta cuenca principalmente es alimentada del estero Los Coipos de la confluencia de los esteros Altos de Caune y El Parrón (Uribe, 2016).

En la Figura 5 se observa la red hidrográfica de Navidad, la cual, se compone principalmente por el Río Rapel, los esteros Pupuya, Navidad y El Maitén. El Río Rapel desemboca en el pueblo de La Boca mediante un cauce de aproximadamente 60 metros de ancho (Sitrural, 2021). En su recorrido no recibe afluentes relevantes, siendo el de mayor importancia el estero Alhué (DGA, 2004).

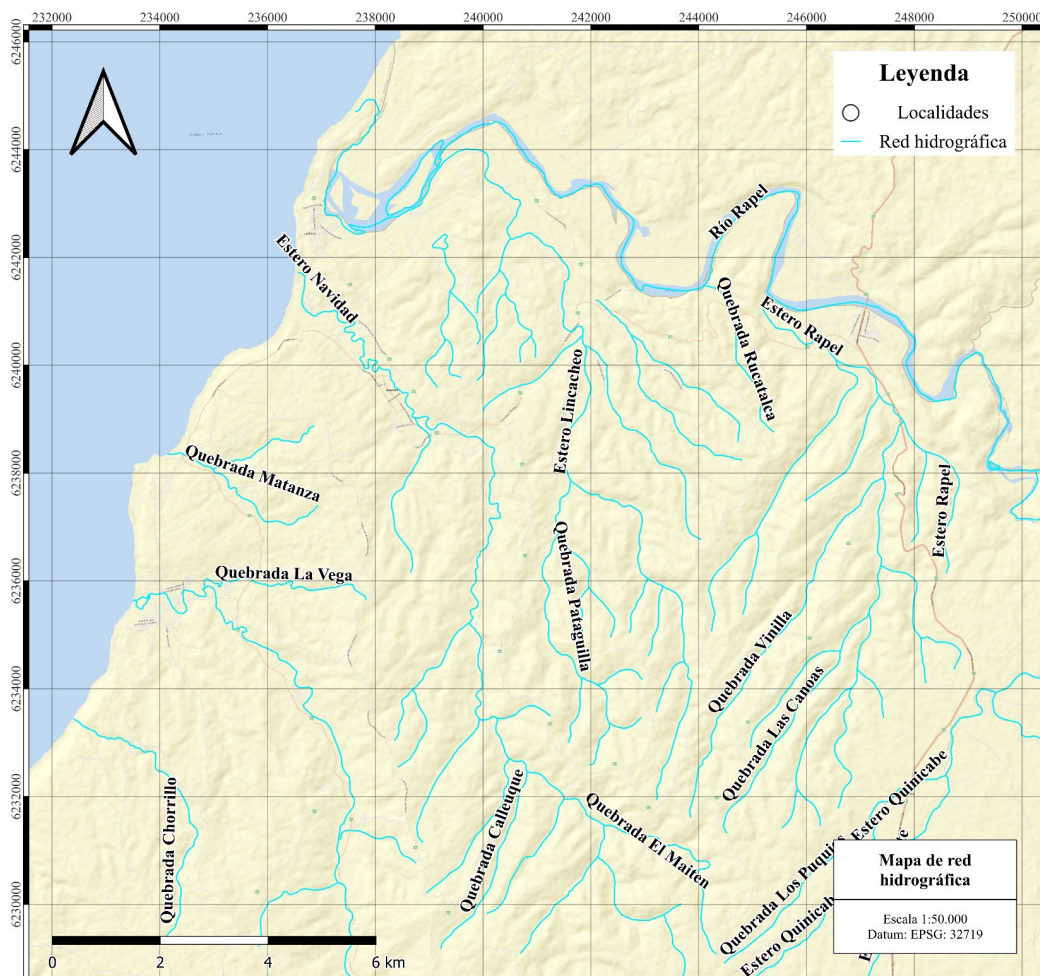


Figura 6: Mapa de red hidrográfica. Se muestran los nombres de esteros y quebradas del sector de estudio

### 2.3.1. Vaguada costera

La vaguada costera también denominada niebla marina o camanchaca, constituye un entorno acuoso con influencia marina. Durante su trayecto, experimenta una variedad de reacciones químicas que influyen en su composición. Este fenómeno se debe a la interacción de aire frío y húmedo del océano junto a condiciones atmosféricas óptimas tales como la inversión térmica, la temperatura superficial del mar y la subsidencia atmosférica o baja de presión e inclusive a la proximidad a cuerpos de agua, (Húnová et al., 2021), estos factores son los que en gran medida propician la formación de nubes bajas y niebla (Sarricolea et al., 2017).

La alta humedad de la zona centro-sur, que abarca el sector de Navidad, la ocurrencia y frecuencia de la vaguada costera pueden estar influenciadas por fenómenos como El Niño (ENSO). En particular, se ha sugerido que existe una correlación positiva entre las fases frías del ENSO y las condiciones climáticas en el centro-sur de Chile (Sarricolea et al., 2017).

### 2.3.2. Dinámica de mareas y procesos estuarinos

La dinámica de mareas en estuarios puede influir en procesos ecológicos y geológicos. Los estuarios, son zonas de transición entre ríos y océanos altamente sensibles a las variaciones en las mareas, que son impulsadas principalmente por las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol. Estas fuerzas generan movimientos verticales y horizontales del agua que controlan los niveles altos del mar e influyen en la erosión e inundaciones costeras (Pugh y Woodworth, 2014).

En los estuarios, la interacción entre las corrientes de marea, la mezcla del agua de mar y el flujo del río ayuda a determinar la extensión de la intrusión de salinidad (Jay, 1991; Geyer y MacCready, 2014). Esto afecta cómo se mueven los sedimentos, define la geomorfología del sistema y, en términos generales, es fundamental para comprender el volumen de agua, el movimiento y la energía en el sistema. (Burchard et al., 2018; Jay, 1991). Adicionalmente las interrupciones del caudal o las intervenciones de carácter antrópico pueden tener efectos locales significativos en este entorno, lo que puede afectar el funcionamiento natural de las tasas de sedimentación, niveles de salinidad y tiempos de residencia (Soto-Rivas et al., 2024).

En particular, el Río Rapel presenta un caudal variable que está regulado por la central hidroeléctrica Rapel. Su embalse forma un lago artificial de 8000 hectáreas y aproximadamente 40 km de largo, tributario de los ríos Cachapoal y Tinguiririca (Enel, 2020). El caudal promedio anual efectivo de esta hidroeléctrica es de 178 m<sup>3</sup>/s (Cade-Idepe, 2004). El control ejercido por esta represa influye directamente en las variaciones de las tasas de sedimentación, el curso del río y la interacción entre el río y el mar en la desembocadura del Río Rapel (Alcayaga et al., 2019).



# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1 Recopilación y análisis de antecedentes

Se recopilan antecedentes dispuestos de manera pública por organismos que trabajan con datos de los recursos hídricos de Chile.

En la recopilación de información, ésta se extraerá en parte desde la Dirección General de Aguas, institución que a través de su página web (DGA, 2024) permite visualizar e indagar sobre los derechos de agua presentes en la zona, además de bibliografía complementaria que permita comprender la geología del sector.

### 3.2. Toma de muestras de agua y análisis de laboratorio

Se llevó a cabo una campaña de terreno de 7 días, entre el 21 y el 27 de enero de 2024, durante la cual se recolectaron 31 muestras de agua, distribuidas en 26 muestras de agua subterránea y 5 muestras de agua superficial. Adicionalmente, se instaló un atrapanieblas a 60 m.s.n.m. (Ver Figura 6), en el que se recolectaron 2 muestras de vaguada costera; La primera botella fue instalada el 24 de marzo de 2024 y retirada el 4 de abril de 2024, mientras que la segunda se instaló el 15 de abril de 2024 y fue retirada el 20 de abril de 2024. Ambas muestras fueron enviadas para análisis isotópico, pero solo la primera botella (32) cuenta con análisis de composición química.



*Figura 7: Atrapanieblas de 1,8m de longitud y 1,3m de alto*

En el muestreo, se miden mediante tres sondas los parámetros fisicoquímicos de la muestra de agua. El multiparámetro portátil HACH HQ40D equipado con las sondas mide la conductividad eléctrica, el pH y el potencial de oxidación-reducción como Eh. Además de ello, con esta herramienta también se mide la T°. La alcalinidad (como HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) se determina en terreno mediante el método de valoración volumétrica utilizando HCl (0,1 N) y naranja de metilo como reactivos limitantes e indicadores. La muestra de agua se divide en cuatro botellas de polietileno de alta densidad de 125 ml previamente limpiadas: (i) isótopo estable del agua, (ii) aniones/sílice, (iii) cationes/oligoelementos y (iv) bicarbonatos. Para todos los análisis se recogen muestras de agua

filtrada con un tamaño de poro de 0,45  $\mu\text{m}$ . Para la correcta conservación de los cationes y oligoelementos, se acidifica la botella correspondiente con 1,50 ml de Suprapur® HNO<sub>3</sub> (4,0 N). Las botellas se enjuagan con la muestra filtrada y después se conservan a 4 °C en neveras portátiles. En la Figura 8 se visualizan las fuentes y las ubicaciones de las muestras de agua recolectadas.

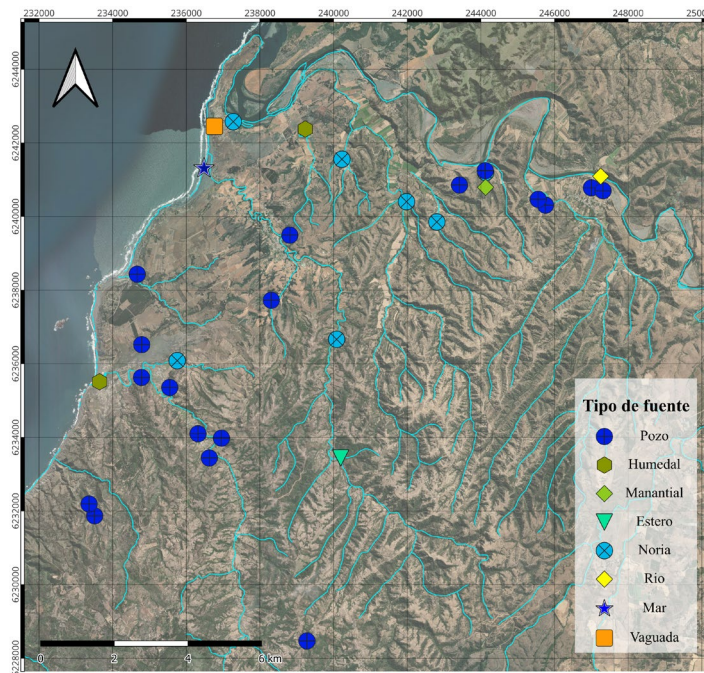


Figura 8: Diferentes tipos de muestras de agua tomadas durante la realización de la presente memoria de título

Conjuntamente, para el muestreo en pozos se extraen las muestras luego de bombear por 5 minutos el agua, para así, no sustraer agua estancada. A su vez, mediante una sonda LTC se mide la piezometría, la T °C, la conductividad  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y la variación de estos dos últimos parámetros conforme esta sonda descienda por el pozo.

Posterior a la toma de muestras de agua, se procede a efectuar su análisis en el laboratorio de Geoquímica de fluidos de la Universidad de Chile.

### 3.3. Tratamiento de datos

Para comprobar la precisión del análisis químico, se calcula manualmente el porcentaje de error del balance iónico. Este porcentaje se obtiene aplicando la siguiente fórmula, en donde las concentraciones de los elementos químicos se encuentran en [meq/L]:

$$Error(\%) = 100 \cdot \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones}$$

El principio de electroneutralidad establece que el error admisible debe ser inferior al 5% (Appelo & Postma, 2005).

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

Posterior a esta etapa, se utilizan técnicas típicas aplicadas al análisis hidrogeoquímico, tales como la elaboración de diagramas Piper y diagramas Stiff, realizados en Excel y Grapher.

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

Tras esta etapa, se emplearán los análisis estadísticos multivariantes con el fin de agrupar las muestras de agua de acuerdo con sus similitudes hidrogeoquímicas (análisis jerárquico de conglomerados o HCA), y para estudiar las correlaciones entre los iones disueltos analizados (análisis factorial o FA) responsables de las principales características químicas de las muestras analizadas. Esta metodología ha sido utilizada por diversos autores en estudios hidrogeológicos (Daniele et al., 2020; Moeck et al., 2016; Taucare et al., 2020), y se realizarán mediante el software IBM SPSS Statistics V26®. En cuanto a la etapa de procesamiento de los datos, se realizará un filtro como el explicado en Cloutier et al (2008), Este filtro consiste en eliminar características aditivas, como la conductividad eléctrica; variables con más del 20% de muestras por debajo del límite de detección; y variables que no se analizarán en todas las muestras en este estudio (por ejemplo,  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$ , temperatura y pH). Para el análisis estadístico multivariante, los parámetros con menos del 20% de datos bajo el límite de detección deberán ser reemplazados. Para el análisis estadístico multivariante, los parámetros que se utilizarán y que tienen  $<20\%$  de datos bajo el límite de detección tienen que ser reemplazados. Existen varios métodos para reemplazar estos datos (Güler et al., 2002), para este estudio se optará por sustituir los datos por la mitad del límite de detección (Farnham et al., 2022). Luego, para minimizar o eliminar la presencia de valores atípicos y el alto sesgo, típico de los datos de composición (Filzmoser, 2009) se aplicará la transformación logarítmica en los datos sin procesar antes del análisis multivariante. Finalmente, todos los análisis estadísticos se realizarán utilizando el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , B y Sr como variables.

Para el análisis jerárquico de conglomerados se utilizará como medida de distancia o medida de similitud entre los sitios de muestreo, la distancia euclidiana de los datos. En primer lugar, se

agrupan los sitios de muestreo con mayor similitud, luego estos grupos de muestras se unen con una regla de vinculación y los pasos se repiten hasta que se hayan clasificado todas las observaciones. Como regla de vinculación se utilizó el método de Ward (Ward, 1963), el cual, establece grupos de tal forma que la suma de los cuadrados de las desviaciones con respecto a la media de cada variable es mínima para todas estas (Castro Heredia, 2012). Al utilizar este método en las muestras correspondientes, se lograron formar grupos que son más o menos homogéneos y con características geoquímicas distintas. Otros estudios utilizaron el método de Ward como regla de ligamiento en su análisis de conglomerados (Güler et al., 2002; Taucare et al., 2020a) también encontraron que el uso de la distancia euclidiana como medida de distancia y el método de Ward como regla de vinculación produjeron los grupos más distintivos.

Para determinar los factores que explican la varianza de las variables geoquímicas se utilizará el test de Medida Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), el cual, indica la proporción de esta varianza. Se considera que valores altos (cerca de 1.0) indican un análisis factorial adecuado, valores menores a 0.5 se considera un resultado que no será útil. En este estudio el valor de KMO de 0.673 garantizará la aptitud del análisis para los datos. Para que el análisis sea preciso, los factores deben tener valores propios superiores a uno. Los factores se rotaron utilizando el método Varimax para maximizar la varianza de la carga al cuadrado de cada factor. Por último, el peso de las variables en cada factor es relevante si es  $> 0.50$ .

### 3.4. Análisis de Isótopos Estables de Agua

Los isótopos estables del agua han sido ampliamente empleados para analizar procesos hidrogeológicos, identificar las zonas que contribuyen a la recarga de acuíferos y evaluar los mecanismos de recarga (Custodio & Jódar, 2016; Daniele et al., 2020; Taucare et al., 2020a). En este estudio, se utilizarán los isótopos  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  para identificar las fuentes y áreas de recarga del agua subterránea en el sector de Navidad. Para ello, se compararán los resultados isotópicos con la línea meteórica local, que refleja las variaciones isotópicas de la precipitación en la región, y con el gradiente de elevación desarrollado en los Andes a la latitud  $33^\circ\text{S}$  ( $33^\circ\text{S}$  Chile MWL; Taucare et al., 2020a).

# Capítulo 4

## Resultados y discusión

### 4.1. Derechos de agua y extracción

En esta sección se expone acerca de las extracciones de agua existentes en la zona de estudio relativa al otorgamiento de derechos de agua. Estos derechos son brindados por la Dirección General de Aguas (DGA) y aparecen registrados en su base datos. La información recabada da una cantidad aproximada de la magnitud de la explotación de los acuíferos de la zona.

#### 4.1.1. Evolución temporal

En el área de estudio que comprende los acuíferos Río Rapel y Costeras Rapel – Estero Nilahue, se tiene registro del otorgamiento de derechos de agua a partir del año 2004. En el análisis se recaba la información disponible entre los años 2004 a 2020.

En la Figura 9a se observa la cantidad de derechos otorgados por año, destacando el 2009 con un número de 35. Posteriormente esta cifra decae incluso habiendo años sin inscripción, tales como el año 2010 y 2013. Desde el año 2014 se aprecia que se brindan derechos de manera consecutiva hasta el 2020.

En la Figura 9b se muestra información acerca de la suma total de los caudales otorgados por año, donde el año 2017 contrasta con los otros años de manera evidente, sumando un total de 125,765 L/s.

En el gráfico de la Figura 9c se muestran los caudales máximos otorgados por la DGA. Durante el año 2017 se otorga un derecho de 26 L/s.

Por último, en la Figura 9d se presenta un gráfico con la suma acumulada de los caudales, donde el año 2017 se distingue un quiebre en la curva, con una clara tendencia creciente.

En cuanto a las correlaciones entre los gráficos de la Figura 9, es posible observar que hay variables que no necesariamente están vinculadas, un ejemplo claro es el número de derechos en contraste con los caudales extraídos por año. Si bien, el 2009 fue el período en que hubo un mayor registro, este dista de ser el año en que más se extrae agua, ya que los derechos otorgados son de caudales pequeños. Si se compara con el resto de los años es posible distinguir que desde el año 2016 se inscriben extracciones de mayor envergadura.

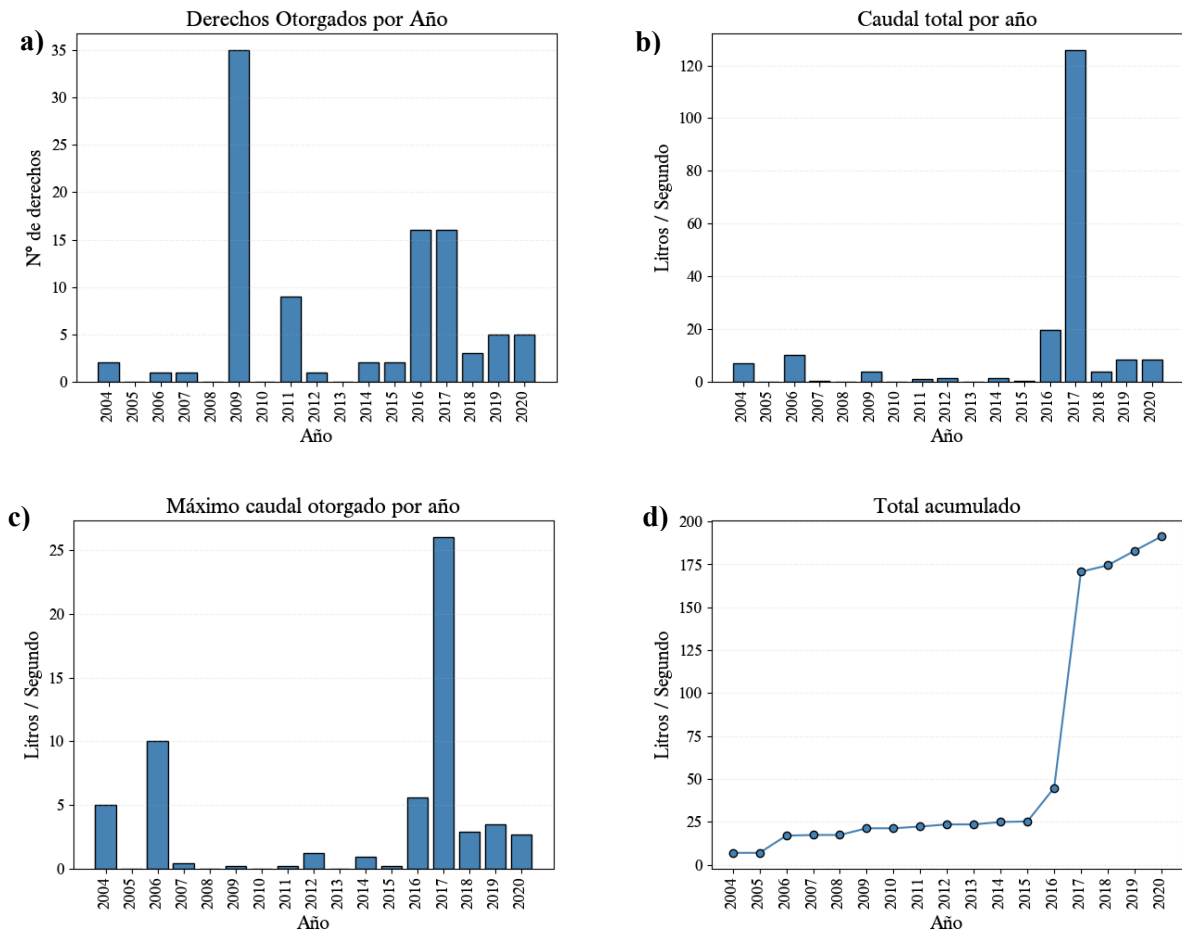


Figura 9: Evolución temporal de extracciones desde el año 2004 hasta el 2020. Fuente de datos: DGA

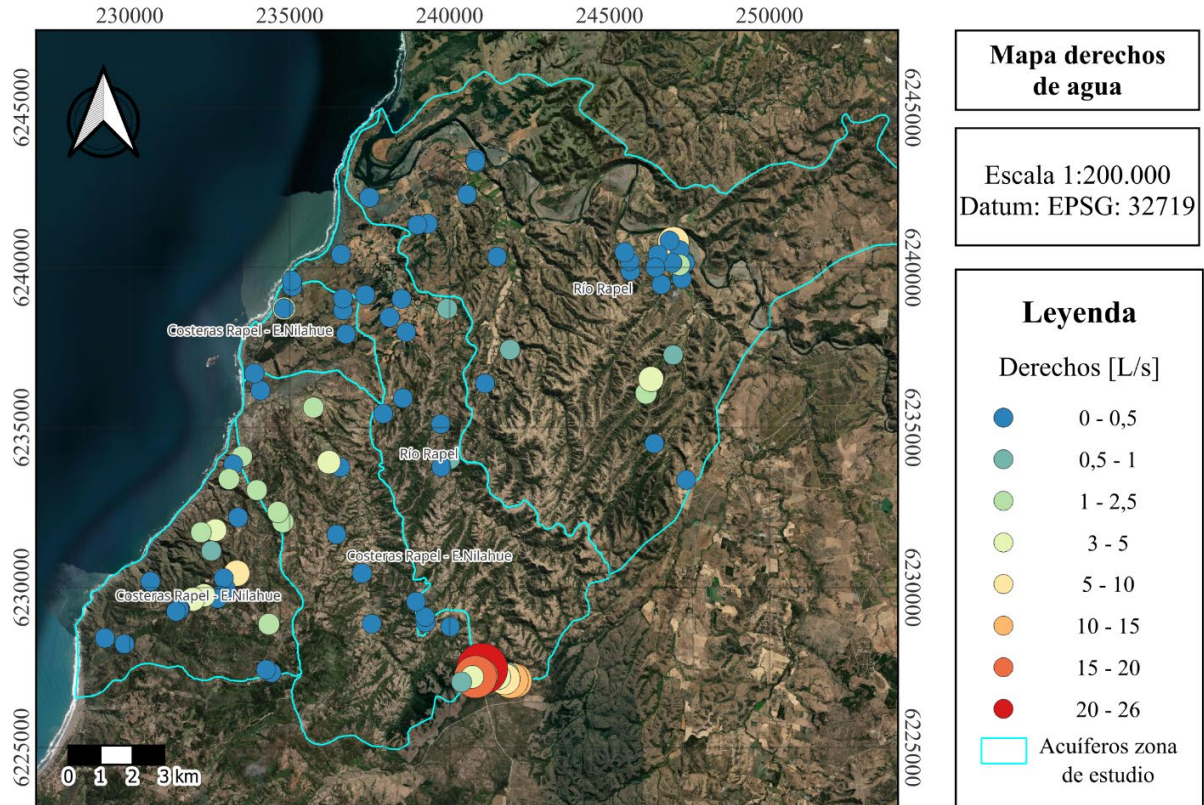
En síntesis, es posible ver un aumento de la explotación de los acuíferos desde el año 2017. Este crecimiento en la explotación se condice también con la mayor población en el sector, la cual, ha aumentado sus habitantes de manera progresiva (BCN, 2017) y se considera aún mayor en períodos estivales, donde la ocupación del sector es superior. La actividad industrial no es una característica que destaque en la zona, mucho menos a gran escala, en general, la actividad de la comuna de Navidad es referida a la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca (SII, 2024).

Se analiza el otorgamiento de derechos de agua en los acuíferos mostrados en la Figura 10. Dentro de esta zona se han brindado hasta el 2020 un total de 98 derechos desde la DGA. Donde los primeros registros datan del año 2004.

En la Figura 10 se clasifican con simbología de puntos las ubicaciones de estos derechos. Los intervalos de clasificación son pequeños, ya que según lo informado a mayoría de los caudales comprenden entre 0 a 0,5 litros / segundo. Los caudales descritos en el mapa se ordenan de menor a mayor desde color celeste hasta rojo a medida que aumenta el caudal donde también el tamaño de los círculos indica la magnitud del caudal del derecho.



En general no existen grandes caudales de extracción, donde el caudal promedio otorgado es de 1,95 L/s, ya que en su mayoría son personas naturales que se abastecen para su propio uso o regadío de pequeñas extensiones de tierra



*Figura 10: Mapa derechos de agua. Datos de derechos de la DGA. Polígonos de acuíferos extraídos de la Dirección de Administración de Recursos Hídricos de la DGA*

En cuanto a la evolución, en la Figura 11 se efectúa una comparación entre los años 2010 y 2020. Es posible observar que la cantidad de derechos en un intervalo de 10 años crece a más del doble, pasando de 38 a 98. En los caudales, hasta el año 2010 el caudal máximo otorgado era de 10 L/s, el caudal promedio de los derechos era de 0,55 L/s y el total de 21 L/s, mientras que en el año 2020 estas cifras aumentan, donde el caudal máximo concedido es de 26 L/s, el promedio es de 1,95 L/s y suman un total de 191,045 L/s.

En resumen, en una década se ha cuadruplicado el caudal promedio de todos los derechos y el caudal total es nueve veces mayor.

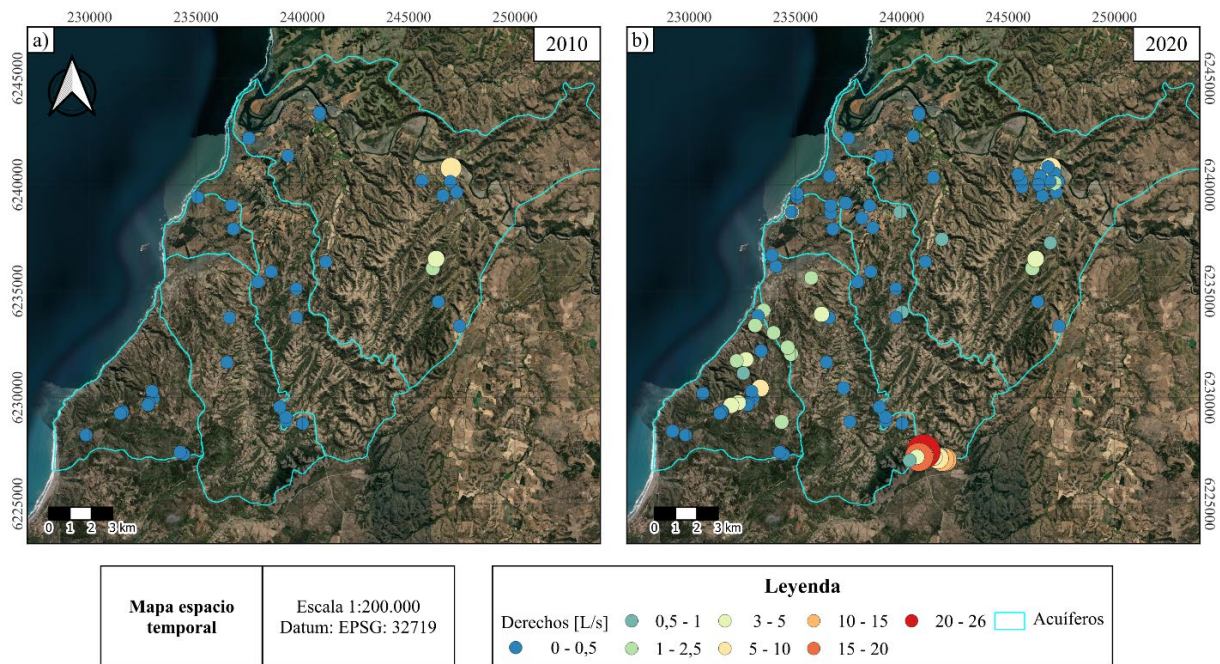


Figura 11: Mapa de evolución espacio temporal año 2010 y año 2020

## 4.2. Hidrogeoquímica

En el área de estudio se analizan un total de 32 muestras de agua, de las cuales 5 corresponden a agua superficial y 26 a agua subterránea y 1 de vaguada costera.

Las aguas superficiales son las muestras n°27, 28, 29, 30 y 31, las cuales, corresponden al estero Los Maitenes, Río Rapel, Humedal El Culenar, Humedal La Vega de Pupuya y la muestra de agua de mar, extraída en el sector de la playa Las Brisas. La muestra n°32 es la muestra de la captación de agua del atrapanieblas ubicada en la localidad de La Boca, obra que fue situada en la orilla de un acantilado apuntando su captación con dirección Oeste.

### 4.2.1. Parámetros fisicoquímicos

A continuación, se describen las principales características fisicoquímicas de las muestras de agua analizadas.

La Figura 12 muestra diagramas de caja que representan los parámetros fisicoquímicos de las 26 muestras de agua subterránea. Los valores correspondientes a las 4 muestras de agua superficial están superpuestas, simbolizadas con un círculo amarillo. Las muestras de agua subterránea que se consideran atípicas están rotuladas con su número de código en color azul y marcadas con un círculo negro. Cabe mencionar que en estos diagramas no se incluyen las muestras provenientes del mar (n°31) ni de vaguada costera (n°32).

La conductividad eléctrica (CE) varía entre 366  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 7165  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El valor más bajo corresponde a la muestra n°26, tomada de un pozo en el sector de La Palmilla, mientras que el





respectivos valores. Los valores se simbolizan con círculos que aumentan de tamaño a medida que los valores se aumentan.

La ubicación espacial y valores de conductividad eléctrica revelan una tendencia de aumento EW (Figura 13.a). Los valores de temperatura (Figura 13.b) varían entre 15,2°C y 23,4°C, donde los valores de las aguas someras y de pozos menos profundos tienden a ser más altos. En el pH (Figura 13.c) varían entre 6,76 y 8,65 siendo las aguas muestreadas levemente básicas. Para Eh (Figura 13.d) los valores varían entre -234,5 y 165 siendo la mayoría de las muestras con valor positivo, lo que sugiere un ambiente predominantemente oxidante.

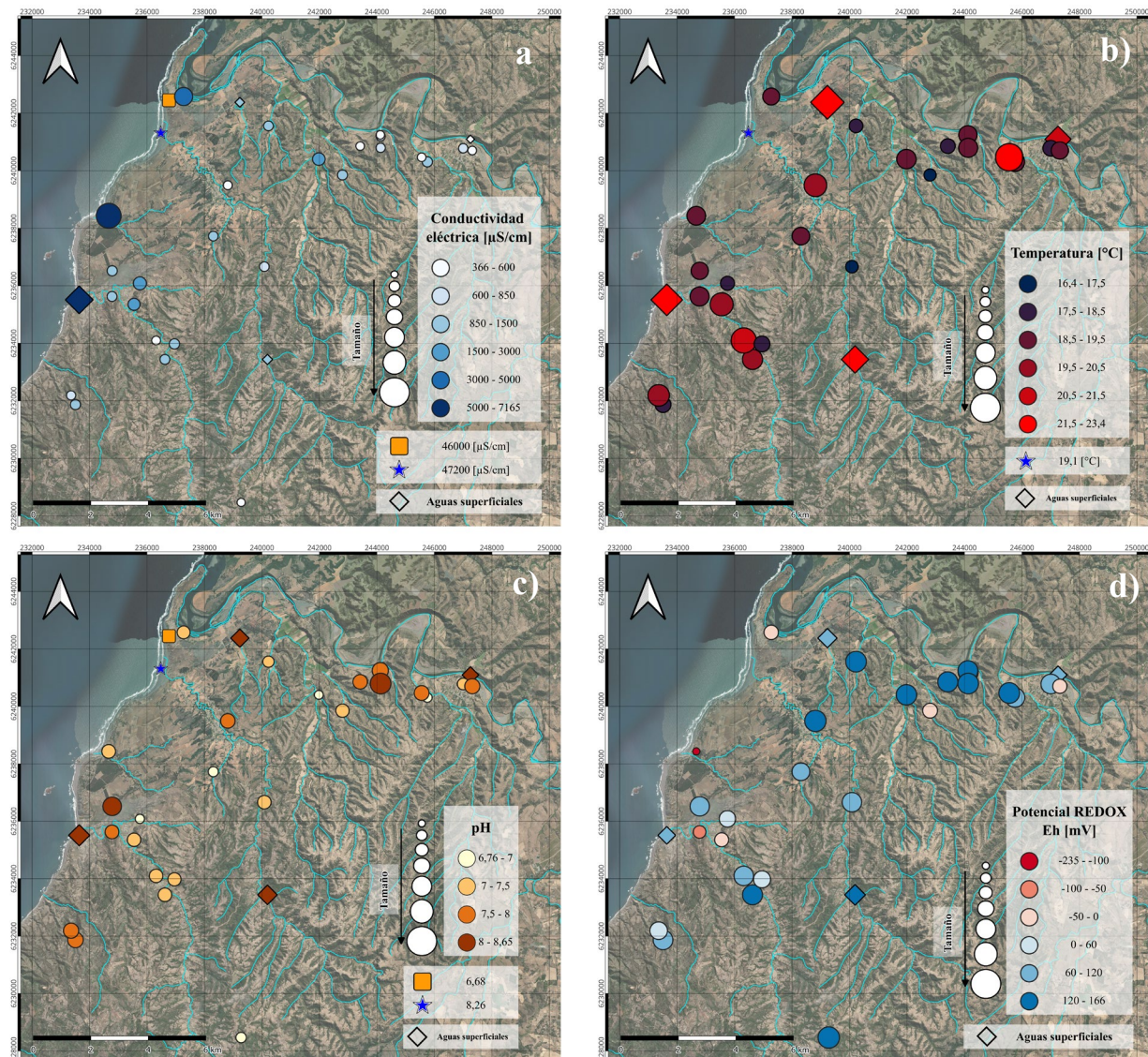


Figura 13: Distribución espacial de parámetros fisicoquímicos

## 4.2.2. Elementos mayoritarios

Los elementos mayoritarios constituyen un eje fundamental en la investigación de aguas subterráneas. En particular, los iones revelan información importante asociada a procesos naturales como la disolución de minerales, el intercambio iónico, entre otros, e incluso, evidenciar procesos antropogénicos derivados de la industria, la agricultura, contaminación y salinización.

Para esta memoria de título se cuenta con el análisis de los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{F}^-$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ .

En la Figura 14 se presentan los diagramas de caja de los aniones analizados. El diagrama de muestra la predominancia de los aniones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ , en ese orden descendente. Para mejorar la visualización de los datos, se realizó un acercamiento debido a que los valores de las muestras atípicas dificultan la interpretación con la escala original.

Adicionalmente, el diagrama de caja de la derecha incluye los aniones  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$  y  $\text{Br}^-$ . También se efectuó un acercamiento en este caso para facilitar una mejor apreciación de los datos y resaltar las tendencias en sus concentraciones.

Los datos que se encuentran fuera de los bigotes de los gráficos se consideran como atípicos o anómalos, ya que presentan un comportamiento significativamente diferente al de la mayoría de los datos. Estos valores son visualizados mediante una circunferencia de color negro.

Como puede observarse en la Figura 14 el diagrama de caja del  $\text{Cl}^-$  presenta una leve asimetría positiva, el primer cuartil corresponde a una concentración de 48,3 ppm y el tercer cuartil a 114,54 ppm, sus valores varían entre un mínimo de 19,53 y un máximo de 1937,67 ppm, los valores atípicos son un total de 5.

El  $\text{SO}_4^{2-}$  muestra una clara asimetría positiva, el primer cuartil corresponde a una concentración de 5,4 ppm y el tercer cuartil a 143,57 ppm, sus valores oscilan entre un mínimo de 19,53 y un máximo de 423,83 ppm, los datos anómalos conciernen a 2.

El  $\text{HCO}_3^-$  tiene una leve asimetría negativa, el primer cuartil corresponde a una concentración de 212,75 ppm y el tercer cuartil a 383 ppm, sus valores varían entre un mínimo de 73 ppm y un máximo de 445 ppm, no se hallan valores atípicos.

Para el resto de los aniones se observa que existe una concentración menor respecto a los otros elementos, donde el  $\text{NO}_3^-$ , muestra 3 valores atípicos, el  $\text{F}^-$  no presenta valores anómalos y el  $\text{Br}^-$  muestra 5 valores atípicos.

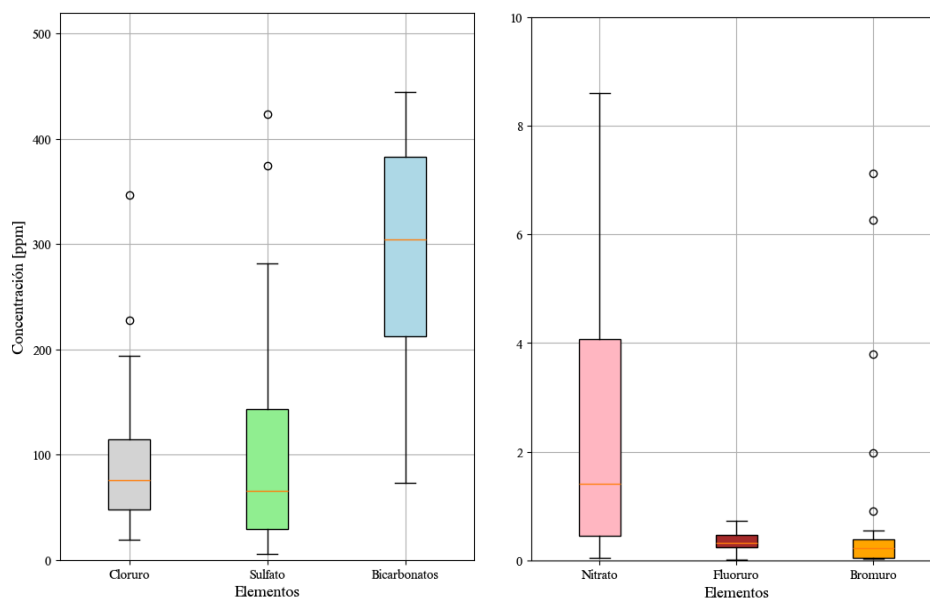


Figura 14: Diagrama de caja de aniones de las muestras de agua subterránea y superficial

En la Figura 15 se observa el diagrama de caja de cationes y sílice, en el que se evidencia la predominancia de mayoritaria de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  para los iones en orden descendente.

A partir de lo expuesto en el diagrama de caja el  $\text{Na}^+$  se visualiza simétrico en la dispersión de datos, el primer cuartil corresponde a una concentración de 57 ppm y el tercer cuartil a 117,81 ppm, sus valores varían entre un mínimo de 11,9 ppm y un máximo de 1200 ppm, los valores atípicos son un total de 4.

El  $\text{K}^+$  muestra una leve asimetría positiva, el primer cuartil corresponde a una concentración de 3,6 ppm y el tercer cuartil a 9,99 ppm, sus valores oscilan entre un mínimo de 1,55 ppm y un máximo de 57 ppm, los datos anómalos conciernen a 5.

El  $\text{Ca}^{2+}$  presenta una leve asimetría positiva, el primer cuartil corresponde a una concentración de 38,72 ppm y el tercer cuartil a 84,57 ppm, sus valores varían entre un mínimo de 13,68 ppm y un máximo de 231 ppm, se hallan 4 valores atípicos.

El  $\text{Mg}^{2+}$  se visualiza simétrico, el primer cuartil corresponde a una concentración de 23,62 ppm y el tercer cuartil a 32,54 ppm, sus valores oscilan entre un mínimo de 5,67 ppm y un máximo de 146 ppm, los datos atípicos corresponden a 3.

Finalmente, para la  $\text{SiO}_2$  no se observan valores atípicos y expone una leve asimetría negativa con valores que se sitúan en un rango entre 4,2 ppm a 57,11 ppm.

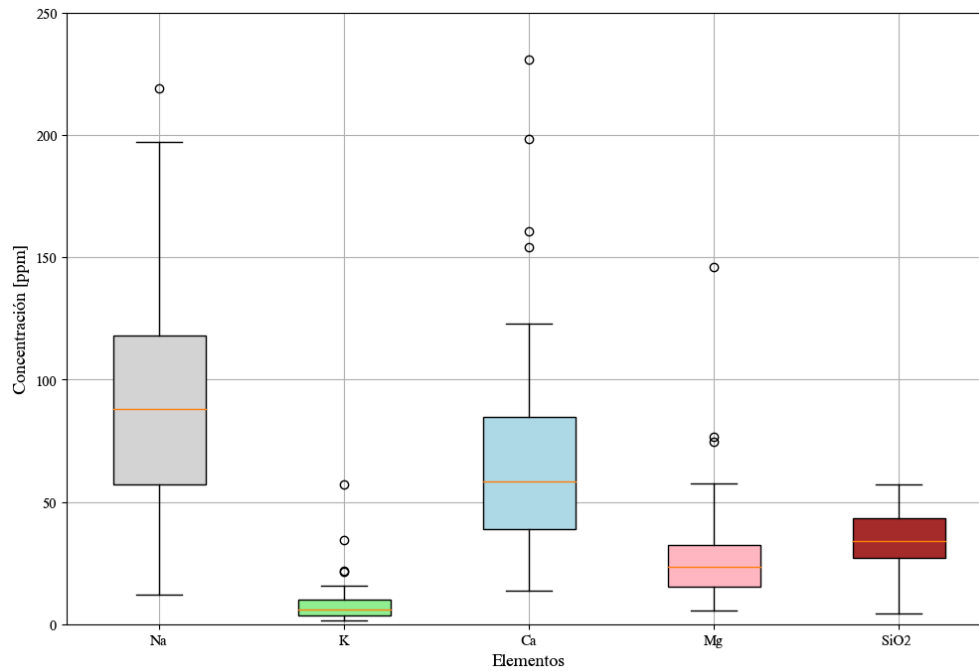


Figura 15: Diagrama de caja de cationes y sílice de las muestras de agua subterránea y superficial

En la Figura 16 se observa la distribución espacial y concentraciones de los aniones del área de estudio. Los colores indican los tramos de clasificación, en tonos claros van los valores mínimos y en tonos rojos los máximos. El tamaño de los puntos en el mapa simboliza la magnitud del contenido del anión especificado: los círculos más pequeños corresponden a las menores concentraciones, mientras que los más grandes indican las mayores concentraciones.

El  $\text{Cl}^-$  muestra una clara tendencia creciente hacia la costa y la desembocadura de La Boca, sugiriendo que el aporte de este ion está asociado al aporte de la influencia marina. Esta tendencia es coherente con la presencia de cloruro en zonas costeras, donde la mezcla con agua de mar suele elevar su concentración.

Para el  $\text{SO}_4^{2-}$ , de manera similar al  $\text{Cl}^-$ , se evidencia también un alza en las proximidades de la costa. No obstante, se encuentran valores intermedios hacia el continente. Las fuentes de  $\text{SO}_4^{2-}$  pueden ser diversas, ya que pueden estar relacionadas con procesos de oxidación de minerales sulfurados, descomposición de materia orgánica, disolución de sales, procesos geotérmicos, actividad antrópica o en disolución de sales como el yeso (Gomis-Yagües et al., 2000). La variabilidad de las concentraciones podría dilucidar una combinación de estas fuentes.

En el caso de los  $\text{HCO}_3^-$ , se observa que, en la localidad de Rapel, se presentan valores menores en comparación con las otras áreas del estudio. En general, los valores de  $\text{HCO}_3^-$  muestran una mayor dispersión espacial, con concentraciones que en muchos casos superan los 300 mg/L. Esta variedad puede ser relativa a varias razones. Entre ellas se encuentra la interacción agua-roca, tales como la disolución de minerales como la calcita y la plagioclasa, que, al interactuar con dióxido de carbono disuelto, pueden liberar  $\text{HCO}_3^-$  en el agua. La concentración de este tipo de minerales puede contribuir a la alta concentración de este ión. La abundancia fosilífera del área de Navidad



podría tener relación directa, ya que, al disolverse, pueden liberar compuestos que contribuyen a elevar los niveles de bicarbonato o incluso valores elevados relativos a emanaciones de metano (Darling y Goody., 2006).

En cuanto al  $\text{NO}_3^-$ , se observa una distribución espacial que resulta ser más aleatoria, con puntos aislados que presentan concentraciones muy elevadas. La presencia de este ion está ligada a la influencia antrópica, el  $\text{NO}_3^-$  es un contaminante frecuente en zonas agrícolas y ganaderas, debido al uso de fertilizantes y al manejo de residuos. Las muestras 6, 8 y 22 presentan concentraciones de 129,93, 396,47 y 51,21 mg/L, respectivamente, superando los límites establecidos por la norma chilena de agua potable 409/1 (ver Anexo F.2). Estas muestras fueron recolectadas en áreas en plantaciones agrícolas y actividades de pequeña ganadería. Lo anterior coincide con estudios previos, que han concluido que la presencia de nitrato está asociada a prácticas agrícolas y ganaderas, como la lixiviación de fertilizantes y el vertido de aguas residuales (Rahman et al., 2021; Bijay-Singh y Craswell, 2021).

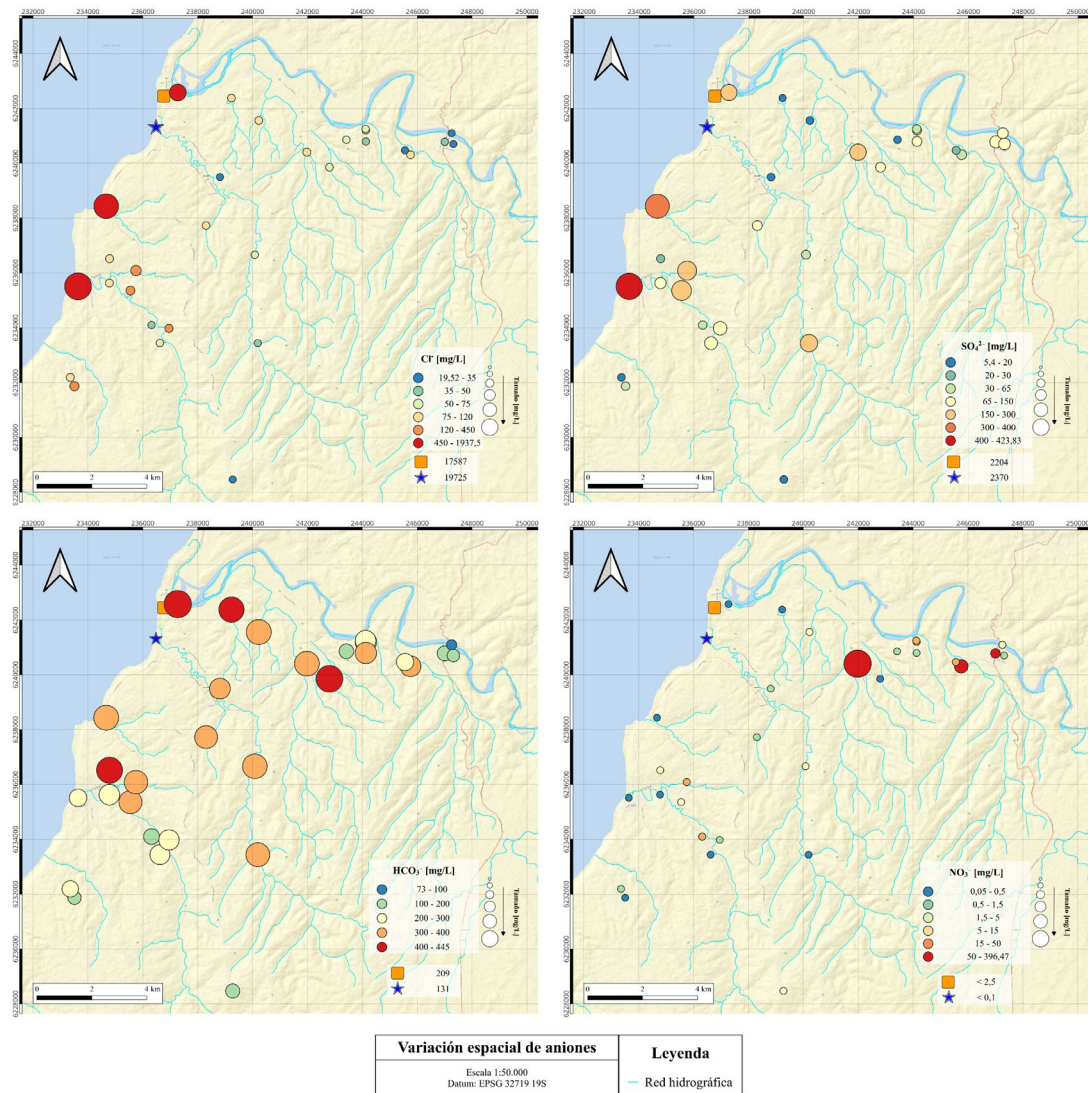


Figura 16: Variación espacial de aniones

En la Figura 17 se observa la distribución espacial y la concentración de los cationes en el área estudiada. La muestra de agua de mar se simboliza con una estrella azul y la muestra de vaguada costera con un cuadrado naranja, respectivamente.

En el mapa se evidencian mayores concentraciones significativamente mayores de  $\text{Na}^+$  hacia la costa y la desembocadura de La Boca, lo que sugeriría un aporte importante del ion por la influencia marina. Lo anterior es consistente con la idea de que el  $\text{Na}^+$  en las aguas de sectores costeros, tienden a tener concentraciones elevadas de este ión. Sin embargo, también se distingue un valor elevado de 123 mg/L en la muestra del Estero Los Maitenes (27), lo que podría indicar la presencia de fuentes adicionales o procesos locales que aportan sodio.

El  $\text{Ca}^{2+}$  es un ión común, ya que es componente principal de muchos minerales y rocas tales como calcita, aragonito, yeso, plagioclasas, entre otros (Clare y Rhodes, 1999).

Se observan concentraciones elevadas de  $\text{Ca}^{2+}$  tanto en las zonas alejadas de la costa como en aquellas más cercanas a ella. Este fenómeno puede atribuirse, principalmente, a los procesos de interacción agua-roca con las rocas fosilíferas presentes en el área de Navidad, mientras que la influencia marina representaría un aporte menor.

En el caso del  $\text{Mg}^{2+}$ , las concentraciones mayores se encuentran cerca de la costa, aunque también se encuentran presentes concentraciones intermedias continente adentro. Esta distribución sugiere que al igual que el calcio, el  $\text{Mg}^{2+}$  está asociado a procesos de interacción agua-roca y/o influencia marina.

Los resultados obtenidos muestran una fuerte correlación entre  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , debido a que ambos iones muestran proporciones similares en cada muestra. Esta similitud puede explicarse por la afinidad iónica de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y su capacidad de reemplazarse mutuamente en la estructura mineral. Este proceso es común en rocas carbonatadas y siliciclásticas, donde ambos cationes coexisten y se intercambian en los minerales presentes (Gregg et al., 2015).

En cuanto al  $\text{K}^+$ , las concentraciones también son mayores en los muestreos cercanos a la costa lo que sugiere un aporte de influencia marina principalmente.

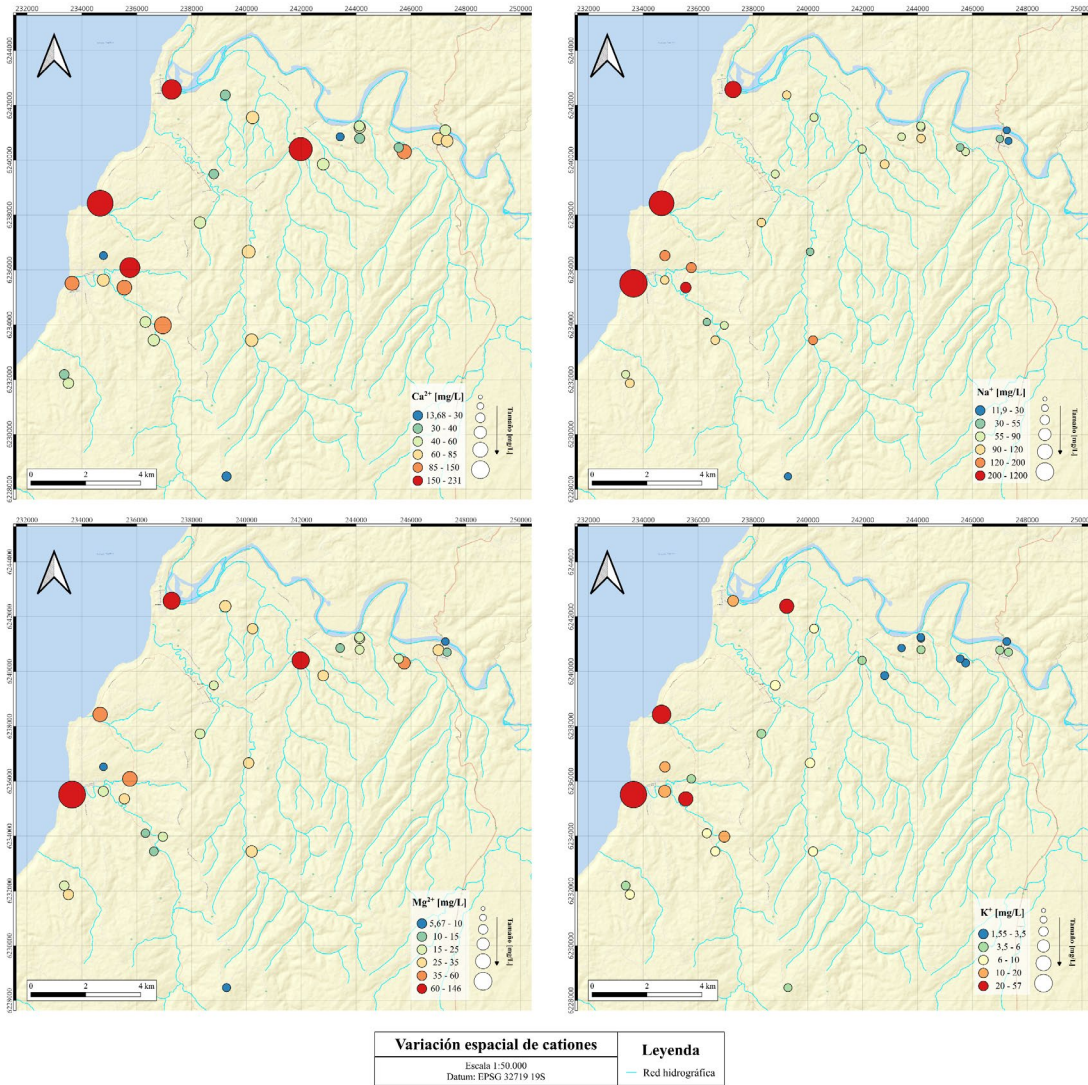


Figura 17: Variación espacial de cationes

### 4.2.3. Clasificación de aguas

Mediante los diagramas de Piper y diagramas de Stiff se clasificaron las aguas subterráneas y superficiales del área de estudio.

#### 4.2.3.1. Diagrama de Piper

Para las aguas de pozos y norias no se observa un campo que agrupe todas las muestras. Se obtiene que mayoritariamente las muestras se clasificarían como aguas  $\text{Ca-HCO}_3$  y las demás muestras se distribuyen entre aguas  $\text{Na-Cl}$ ,  $\text{Na-HCO}_3$  y  $\text{Ca-SO}_4$ .

En la Figura 18 que en aguas superficiales, la muestra 27 correspondiente al estero los maitenes y 29 del Humedal El Culenar se clasifican como  $\text{Ca-HCO}_3$ , 28 del Río Rapel como  $\text{Ca-SO}_4$  la muestra 30 del Humedal La Vega de Pupuya como  $\text{Na-Cl}$ . Finalmente, la muestra de agua de mar



(31) y de vaguada costera (32) entran en la clasificación de aguas Na-Cl, situándose en los extremos por su contenido de cloruro y sodio.

En general, se observa que las muestras de agua que tienden a tener una composición similar a la del agua de mar son aquellas que se encuentran en las cercanías de la costa. Esto sugiere una posible influencia entre los procesos marinos y el agua subterránea, lo que provoca un incremento en la concentración de iones característicos de los océanos, como  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ .

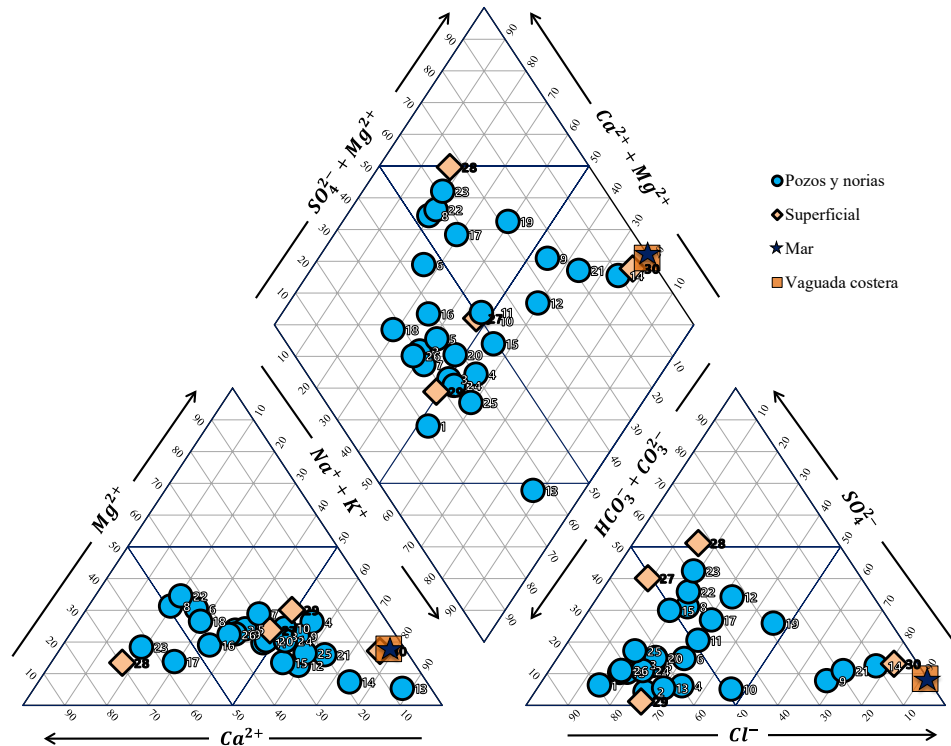


Figura 18: Diagrama de piper de las muestras de agua

#### 4.2.3.2. Diagrama de Stiff

Los diagramas de Stiff (Stiff, 1951) son una herramienta empleada ampliamente en el ámbito de la hidrogeoquímica para la representación y comparación de las composiciones iónicas de las muestras de agua. Su sencillo diseño y fácil visualización hacen de este tipo de diagrama una opción válida para la interpretación y análisis.

La ubicación espacial de los diagramas de Stiff de la zona estudiada se encuentra en la Figura 19. En el mapa se observan 3 colores de diagramas, los cuales, se diferencian en la escala de valores. Aquellos de color rosado están con límites de 8 meq/L, los de color celeste 50 meq/L y los de color azul oscuro en 500 meq/L.

Se distinguen zonas que comparten características similares y espaciales. Se visualiza que las muestras cercanas a la costa tienen concentraciones mayores de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , en el área noreste del

mapa hay sectores que predominan aguas bicarbonatadas (n°5, 6, 26, 4, 8) y aguas con un mayor contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  (n°23, 24 y 7).

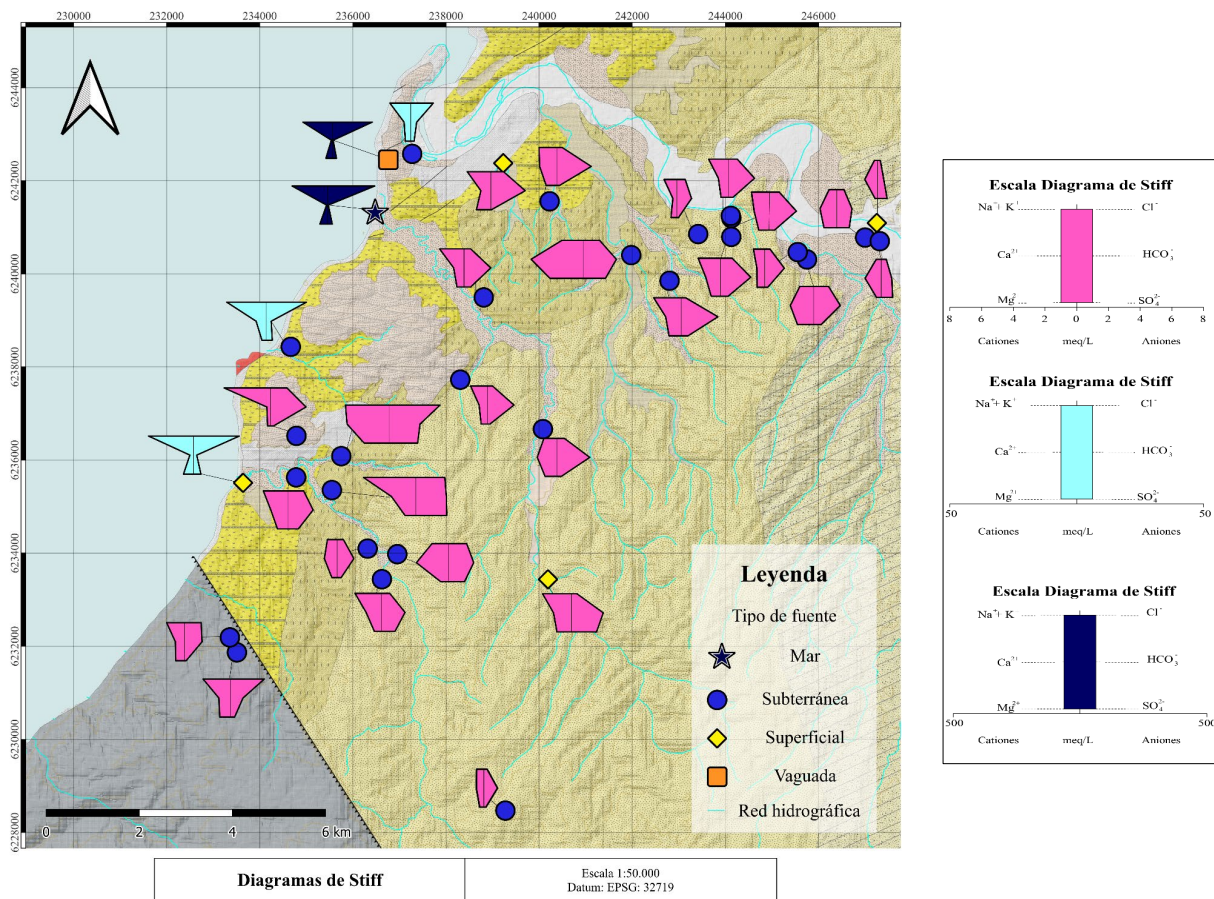


Figura 19: Mapa geológico con diagramas de Stiff

#### 4.4. Elementos traza

El uso de elementos traza en la hidrogeología es importante debido a que brinda información valiosa acerca de las interacciones entre el agua y el entorno, procesos geológicos y calidad del agua.

En la Figura 20 se observa el boxplot de elementos traza, destaca la dispersión de elementos como el Mn y Cs, además de un gran número de datos atípicos en cada una de las variables.

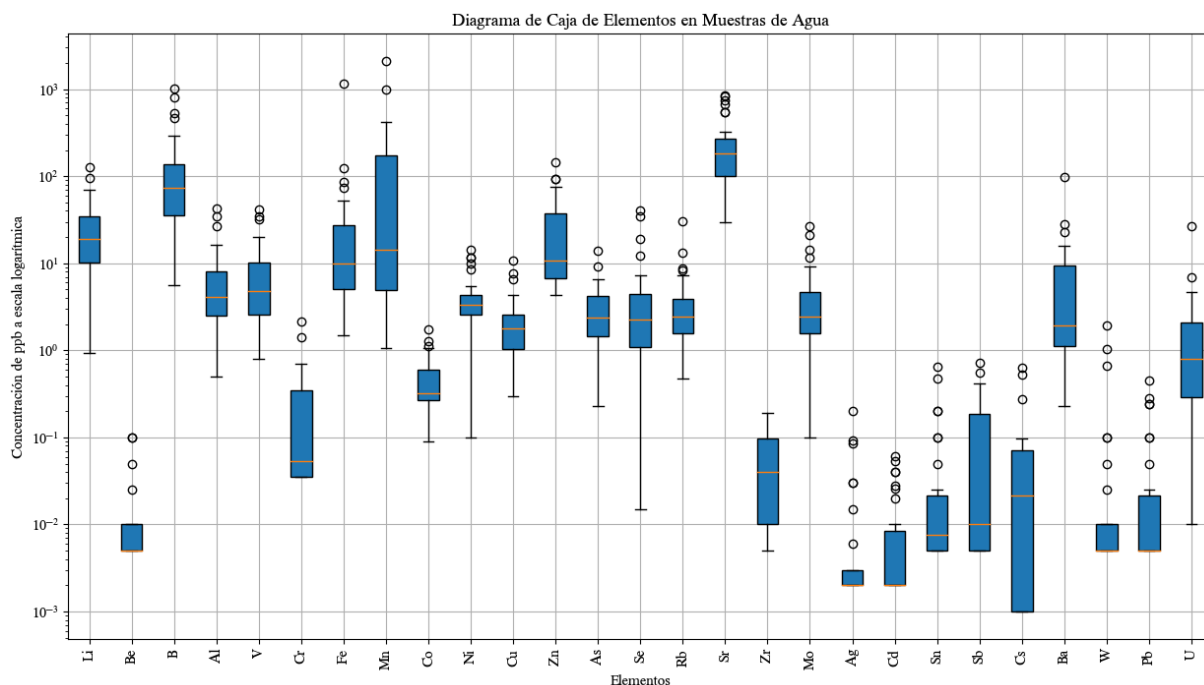


Figura 20: Diagrama de caja de elementos traza

La distribución espacial y concentraciones de los elementos traza se encuentran representados en la Figura 21 y en la Figura 22.

En la Figura 21 se exponen los mapas de Li, B y Sr, los cuales son elementos usados como trazadores de la influencia marina por varios autores (Daniele, 2022, Panda et al., 2006; Morell et al., 2008).

Se observa para el Li que este se encuentra con concentraciones moderadas en la zona oeste del mapa, específicamente aledañas a la quebrada La Vega. En la muestra cercana a las descargas de la Quebrada Centinela y a la Quebrada Matanza se sitúa la mayor concentración de este elemento. Para el B se muestra una tendencia de mayor concentración aledaño a la costa, con muestras que superan los  $450 \mu\text{g/L}$ . Para el Sr se visualizan concentraciones mayores cercanas a la línea de costa, sin embargo, se obtienen valores altos cercanos a la localidad de Rapel y cerca del curso del río homónimo, en el humedal El Culenar y en la muestra cercana al estero Licancheu.

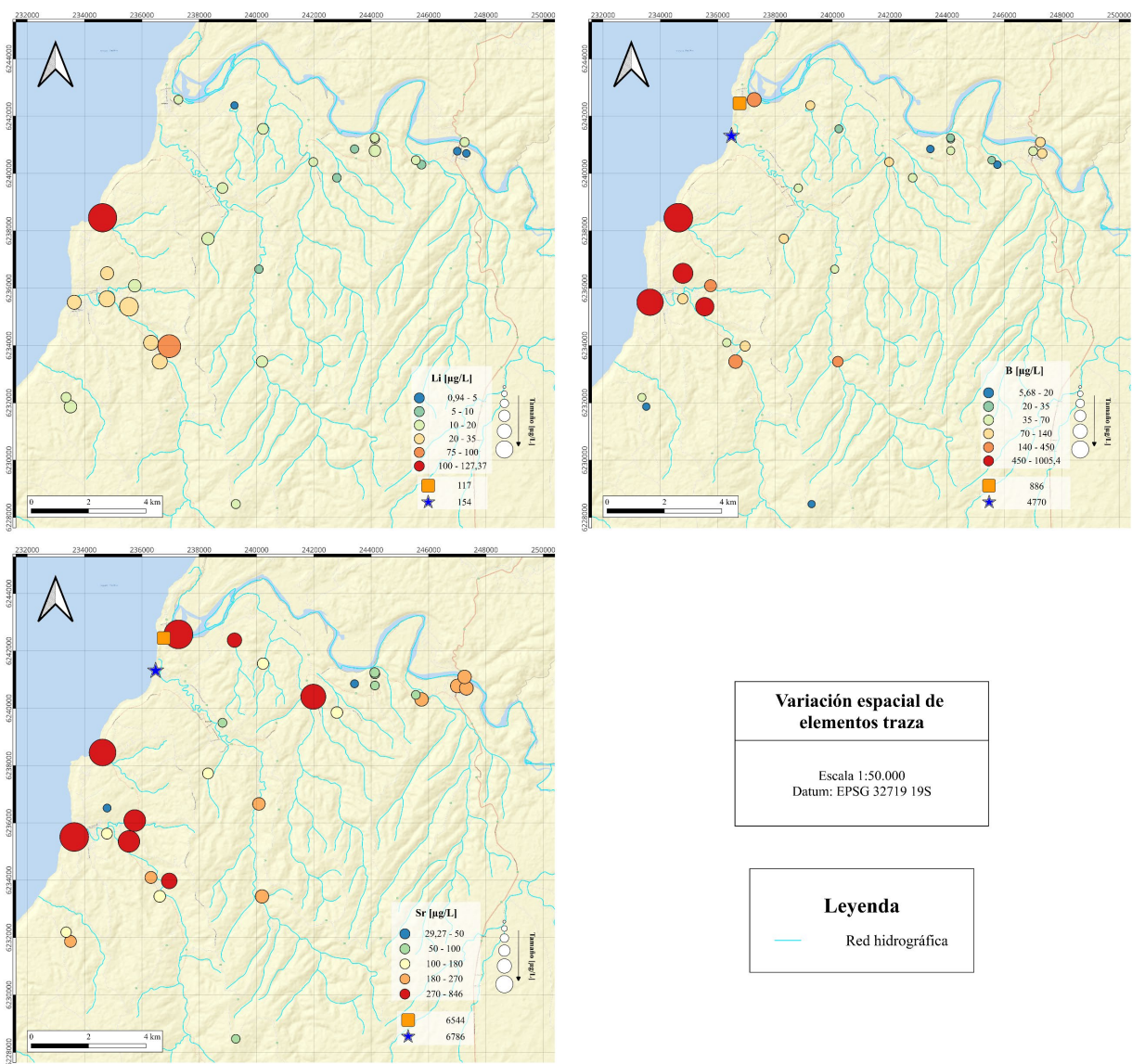


Figura 21: Distribución espacial de elementos traza: Li, B y Sr

En la Figura 22 se observan las concentraciones y variación espacial de Mo, As, Mn y Fe.

Para el Mo se visualizan 4 focos de mayor concentración. La ocurrencia de Mo no se presenta como un elemento libre en la naturaleza y mayoritariamente se encuentra correlacionado con azufre, oxígeno, tungsteno, uranio, plomo, hierro, magnesio, vanadio, cobalto, bismuto o calcio (Smedley y Kinniburgh, 2017). En particular en la zona suroeste hay dos muestras con altas concentraciones que se sitúan cercanos a la falla inversa y ubicados en lo que se describe como el basamento ígneo indiferenciado (Ver Figura 2). En cuanto al ejemplar que está situado en la desembocadura, la presencia de este elemento traza es posible que esté asociada a un aumento en el asentamiento de minerales favorecido por la floculación estuarina (Marquez, 2016) y derivada del Río Cachapoal en el que se han reportado altos valores de Mo en sus sedimentos (J.P. Lacassie, 2021).



En el elemento As, se observan que parte de las mayores concentraciones están cercanas a la quebrada La Vega. Se distingue un punto de concentración elevado de 13,8 [ $\mu\text{g/L}$ ] del ejemplar extraído desde el río Rapel al costado del puente homónimo. La presencia de arsénico puede tener diversas causas; desde orígenes relativos al volcanismo y geotermalismo, depósitos minerales metálicos y actividades relacionadas con la minería y el procesamiento, reservorio de hidrocarburos, transporte de solutos y sedimentos a través de los ríos (provenientes de actividad antropogénica) y contaminación atmosférica (Bundschuh et al., 2021). Para este caso, dado que las fuentes son múltiples, estas pueden estar directamente relacionadas con el transporte de sedimentos del río Cachapoal y Tinguiririca, de los cuales, es tributario el Río Rapel. Ambos tienen un recorrido extenso donde pueden transportar material de múltiples orígenes. Desde actividades mineras situadas en la cordillera (SEIA, 2018), derivados de actividad agrícola, industrial o por interacciones agua roca que estén en su curso.

En el caso del Mn, este elemento presenta concentraciones elevadas en varios puntos del mapa. El origen del manganeso puede estar asociado a diversos procesos, tanto naturales como antropogénicos. La proveniencia puede deberse a nódulos en la capa de arcilla que transite el agua subterránea o tiempo de residencia (Zhang et al., 2020) también para pH cercanos a la neutralidad las concentraciones de  $\text{Mn}^{2+}$  pueden estar relacionadas a la formación de complejos con iones bicarbonato y sulfato si están presentes en alta concentración (Hem, 1972) o a la interacción con Fe (Collins y Buol, 1970) también la movilización del Mn, puede depender del tipo de suelo y la distancia a los ríos, que parecen influir en las concentraciones de carbono orgánico disuelto en las aguas subterráneas que apoyan la reducción de Mn (McMahon et al., 2019) o a la oxidación del amoníaco, proveniente de la aplicación de fertilizantes y estiércol o del lixiviado de tanques sépticos que pueden generar recargas ácidas ricas en nitratos en el suelo, movilizándolo manganeso del suelo hacia el agua subterránea (Fseha et al., 2022). Las condiciones reductoras de la muestra serían facilitadoras de la movilización de este elemento.

Para el Fe, las variaciones en sus concentraciones son similares a las del Mn (en diferente proporción pero similar tendencia). Se observa que la mayoría de las muestras con concentraciones medianamente altas a altas coinciden con la presencia de Mn, pero, asimismo, lo hacen una proporción mucho menor. Al igual que el Mn, para el Fe el potencial redox negativo facilita su movilización, lo que se demuestra en las elevadas concentraciones de ambos elementos en las muestras que presentan condiciones reductoras (Ver Figura 13d). El ejemplar en rojo corresponde a n°14, un pozo ubicado a la cercanía de la Playa de Matanzas, con un valor de 1167 [ $\mu\text{g/L}$ ].

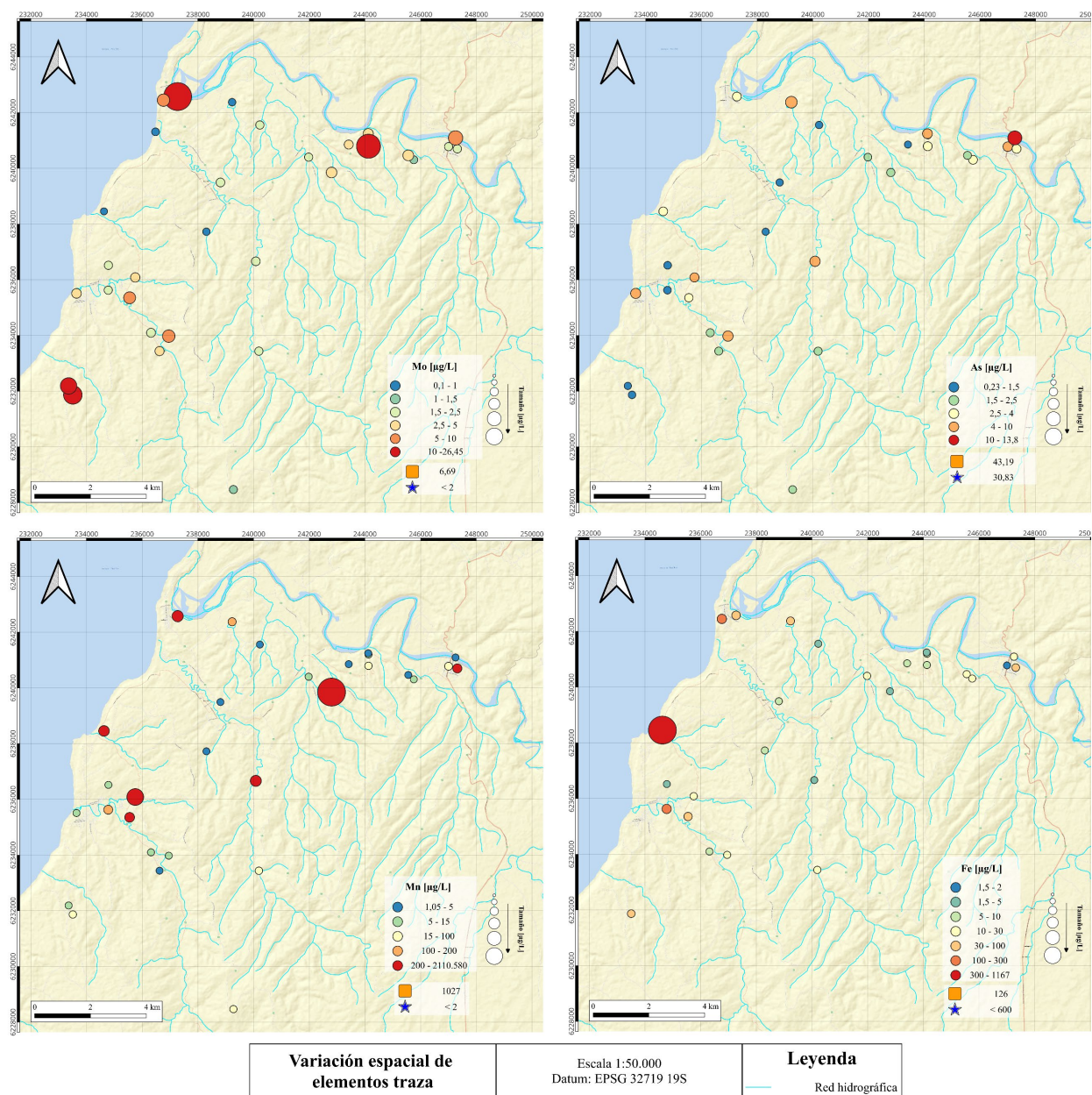


Figura 22: Distribución espacial de elementos traza: Mo, As, Mn y Fe

## 4.5. Relaciones iónicas

La matriz de correlación muestra las correlaciones que existen entre un conjunto de variables, en este caso, los iones y compuestos disueltos en el agua. Cada celda de la matriz de la Figura 23 representa el coeficiente de correlación entre dos variables específicas, que indican la proporcionalidad entre los iones y compuestos. Aquellos valores iguales a 1 son de correlación positiva perfecta, -1 correlación negativa perfecta y 0 la ausencia de correlación lineal. Esta matriz es útil para visualizar relaciones de manera simplificada y así poder guiar el posterior análisis multivariante.

Para este caso se determinan 3 rangos;  $|0,3| - |0,5|$  simbolizado en celeste, que indica una correlación moderada a baja,  $(|0,5| - |0,7|)$  simbolizado en naranja que indica una correlación moderada y  $>|0,7|$  simbolizada en verde que indica una buena correlación.

Se observa a partir de la matriz de correlación que los elementos mayoritarios  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  presentan una buena correlación, mientras que para los elementos traza, el Li, B, V, Co, Cu, As, Se y Rb también presentan coeficientes  $>|0,7|$ . Para el  $\text{SiO}_2$  se visualiza que tiene una correlación moderada y los elementos traza como el Al y Ni tienen coeficientes en el rango  $|0,5| - |0,7|$ .

Sorprende que el ión  $\text{HCO}_3^-$  no presente un moderado o alto coeficiente de correlación con otros elementos.

	Cl	SO4	HCO3	NO3	F	Br	Na	K	Ca	Mg	SiO2	Li	B	Al	V	Fe	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr	Mo	Ba	U		
Cl	1,000																													
SO4	0,991	1,000																												
HCO3	-0,284	-0,252	1,000																											
NO3	-0,077	-0,043	0,164	1,000																										
F	-0,157	-0,176	0,002	-0,105	1,000																									
Br	0,999	0,989	-0,284	-0,082	-0,173	1,000																								
Na	1,000	0,992	-0,273	-0,081	-0,157	0,999	1,000																							
K	0,998	0,990	-0,280	-0,085	-0,143	0,997	0,998	1,000																						
Ca	0,853	0,892	-0,018	0,193	-0,302	0,852	0,855	0,843	1,000																					
Mg	0,998	0,990	-0,275	-0,039	-0,152	0,998	0,997	0,996	0,853	1,000																				
SiO2	-0,534	-0,506	0,225	0,178	0,095	-0,535	-0,538	-0,550	-0,298	-0,538	1,000																			
Li	0,725	0,756	-0,095	-0,174	-0,095	0,726	0,732	0,733	0,765	0,699	-0,196	1,000																		
B	0,821	0,817	-0,215	-0,087	-0,364	0,837	0,824	0,822	0,706	0,815	-0,430	0,730	1,000																	
Al	0,239	0,234	-0,312	0,139	-0,231	0,241	0,239	0,227	0,306	0,219	-0,257	0,287	0,261	1,000																
V	0,936	0,922	-0,278	-0,056	-0,263	0,946	0,935	0,933	0,791	0,936	-0,483	0,704	0,950	0,247	1,000															
Fe	0,246	0,274	0,124	-0,071	-0,402	0,251	0,258	0,237	0,477	0,205	0,043	0,610	0,382	0,524	0,275	1,000														
Mn	0,178	0,202	0,310	-0,112	-0,035	0,172	0,181	0,168	0,279	0,180	-0,054	0,073	-0,012	-0,065	0,060	0,086	1,000													
Co	0,967	0,957	-0,266	-0,044	-0,252	0,974	0,965	0,964	0,832	0,969	-0,487	0,719	0,912	0,236	0,984	0,242	0,129	1,000												
Ni	0,643	0,694	0,126	0,213	-0,214	0,633	0,645	0,630	0,895	0,641	-0,147	0,617	0,343	0,262	0,476	0,453	0,401	0,562	1,000											
Cu	0,996	0,989	-0,275	-0,066	-0,138	0,994	0,996	0,994	0,856	0,995	-0,540	0,707	0,780	0,238	0,909	0,224	0,196	0,948	0,671	1,000										
Zn	0,480	0,455	-0,246	0,324	0,179	0,471	0,472	0,470	0,450	0,496	-0,261	0,169	0,171	0,424	0,358	-0,028	0,058	0,410	0,471	0,497	1,000									
As	0,918	0,915	-0,309	-0,094	-0,124	0,911	0,916	0,920	0,789	0,917	-0,572	0,607	0,621	0,307	0,786	0,153	0,235	0,840	0,684	0,936	0,484	1,000								
Se	0,954	0,941	-0,281	-0,065	-0,258	0,963	0,954	0,952	0,806	0,954	-0,511	0,722	0,945	0,252	0,994	0,280	0,081	0,991	0,502	0,931	0,370	0,807	1,000							
Rb	0,985	0,983	-0,259	-0,102	-0,222	0,985	0,987	0,984	0,875	0,975	-0,511	0,800	0,849	0,314	0,929	0,391	0,172	0,954	0,665	0,978	0,417	0,896	0,949	1,000						
Sr	0,995	0,995	-0,253	-0,026	-0,171	0,993	0,994	0,993	0,887	0,995	-0,524	0,720	0,797	0,236	0,918	0,241	0,206	0,958	0,700	0,995	0,497	0,929	0,939	0,979	1,000					
Mo	-0,037	-0,044	0,010	-0,146	0,245	-0,038	-0,037	-0,057	-0,013	-0,041	-0,150	-0,094	-0,122	0,028	-0,078	-0,126	0,064	-0,066	0,077	-0,020	0,093	0,013	-0,072	-0,059	-0,016	1,000				
Ba	0,390	0,405	0,043	-0,073	-0,123	0,379	0,393	0,366	0,519	0,380	-0,251	0,217	0,075	0,138	0,198	0,216	0,314	0,259	0,662	0,426	0,350	0,464	0,232	0,394	0,438	0,564	1,000			
U	-0,035	-0,008	0,132	0,021	0,207	-0,035	-0,039	-0,026	0,122	-0,031	0,090	0,261	0,005	-0,176	0,003	-0,084	-0,013	0,016	0,158	-0,045	-0,131	0,029	-0,006	-0,043	-0,012	0,121	-0,062	1,000		

Figura 23: Matriz de correlación de elementos. En celeste aquellos coeficientes que se sitúan entre  $(|0,3| - |0,5|)$ , en naranja coeficientes entre  $(|0,5| - |0,7|)$  en verde  $(>|0,7|)$

Los gráficos bivariantes constituyen una herramienta ampliamente usada en el campo de la hidrogeoquímica y para comparar concentraciones de iones con el agua de mar (Montety et al., 2008; Daniele et al., 2013), generalmente la presencia de altas concentraciones de cloruro se relaciona con la influencia marina. El cloruro se caracteriza por ser conservativo (Appelo y Postma, 1993) es decir, no se ve afectado por procesos biológicos o de adsorción, por lo cual, es útil como un trazador de aguas subterráneas. En los gráficos de la Figura 24 se simboliza con un cuadrado celeste y rótulo “FW” al agua dulce y con una estrella azul oscuro con rótulo “SW” al agua de mar. La línea que une estas dos muestras representa la línea de mezcla. En la columna derecha se muestra el ajuste de escala de cada gráfico.

En la Figura 24 la relación entre  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^{2+}$  indica una posible influencia marina, aunque las muestras que se encuentran por sobre la línea de mezcla observada en el gráfico de la derecha sugiere aportes adicionales de sodio de otra fuente.

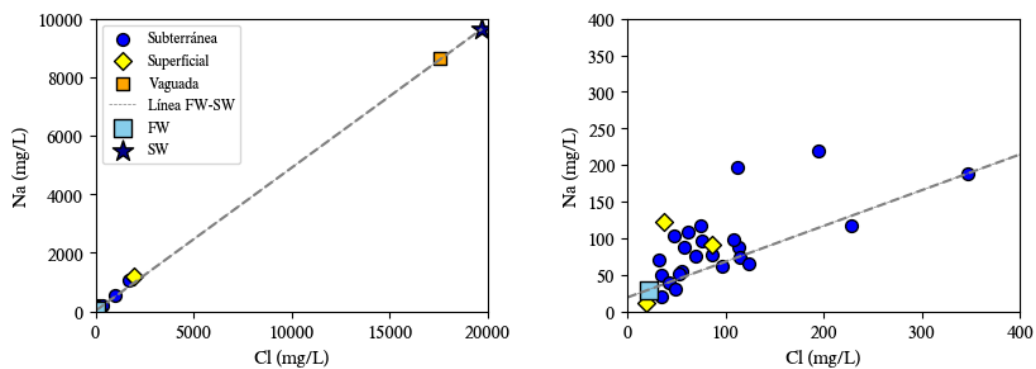


Figura 24: Gráfico bivariable cloruro y sodio

En la Figura 25 para  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , se presentan varias muestras por encima de la línea de mezcla, indicando de forma clara, un aporte distinto de la influencia marina para el calcio.

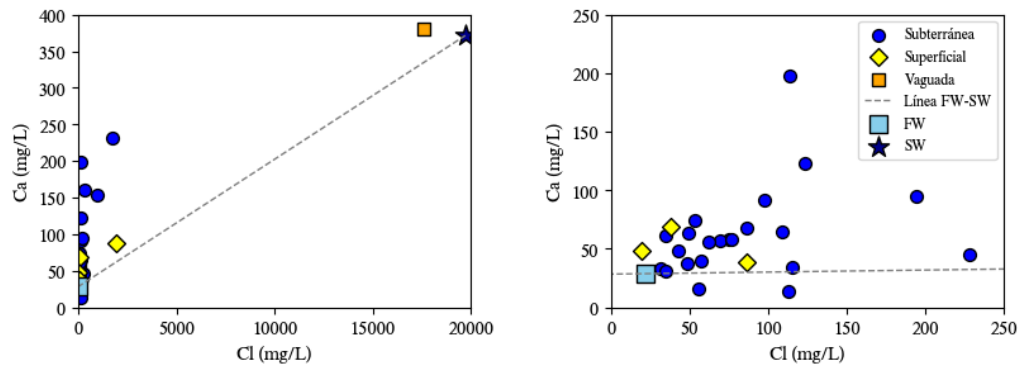


Figura 25: Gráfico bivariable cloruro y calcio

En el gráfico de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Mg}^{2+}$  de la Figura 26 en general muestra un buen ajuste a la línea de mezcla con algunas muestras sobre la línea y no muy lejos de la misma.



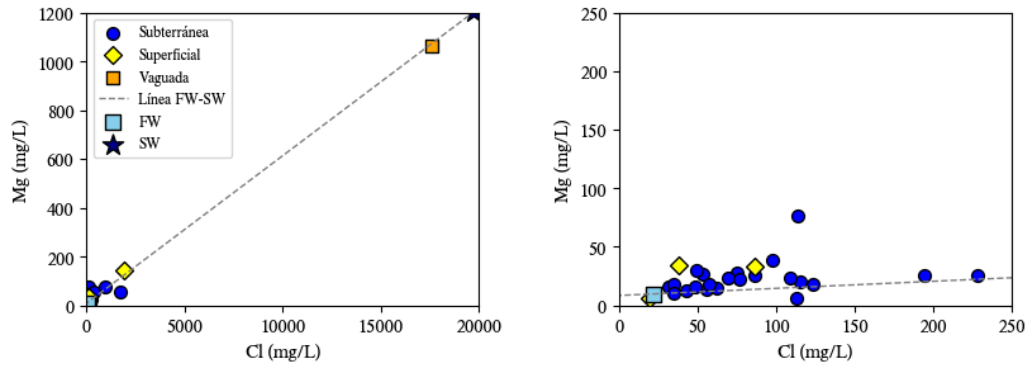


Figura 26: Gráfico bivariable cloruro y magnesio

En el gráfico de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{K}^+$  de la Figura 27 muestra un buen ajuste a la línea de mezcla y presenta algunas muestras sobre la línea y no muy lejanas de la misma.

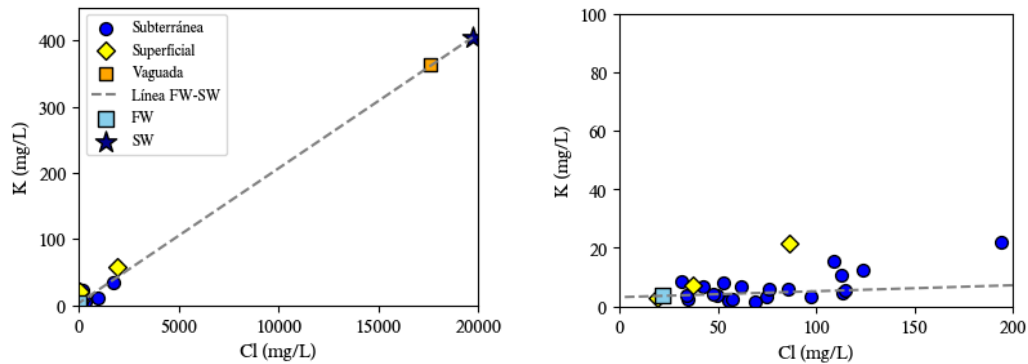


Figura 27: Gráfico bivariable cloruro y potasio

El gráfico  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  muestra un número considerable de muestras por encima de la línea de mezcla, sugiriendo aportes de sulfato adicionales probablemente asociados a interacción agua-roca.

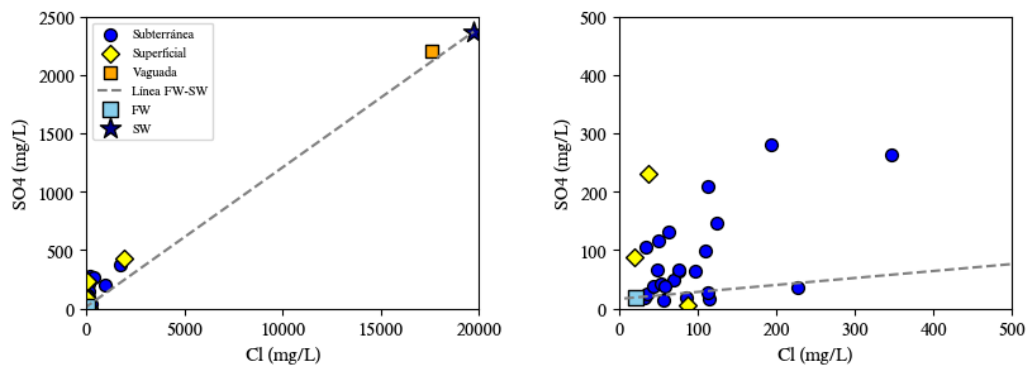


Figura 28: Gráfico bivariable cloruro y sulfato

En base a los observado, la desviación de algunas muestras respecto a las líneas de mezcla en los gráficos cloruro-sodio, cloruro-calcio, cloruro-magnesio y cloruro-sulfato indica aportes adicionales distintas de la influencia marina.

En los elementos traza en la Figura 29 se compara el  $\text{Cl}^-$  con el Li, B y Sr, los cuales, se suelen usar para dilucidar el aporte de influencia marina en acuíferos costeros (Daniele et al., 2022).

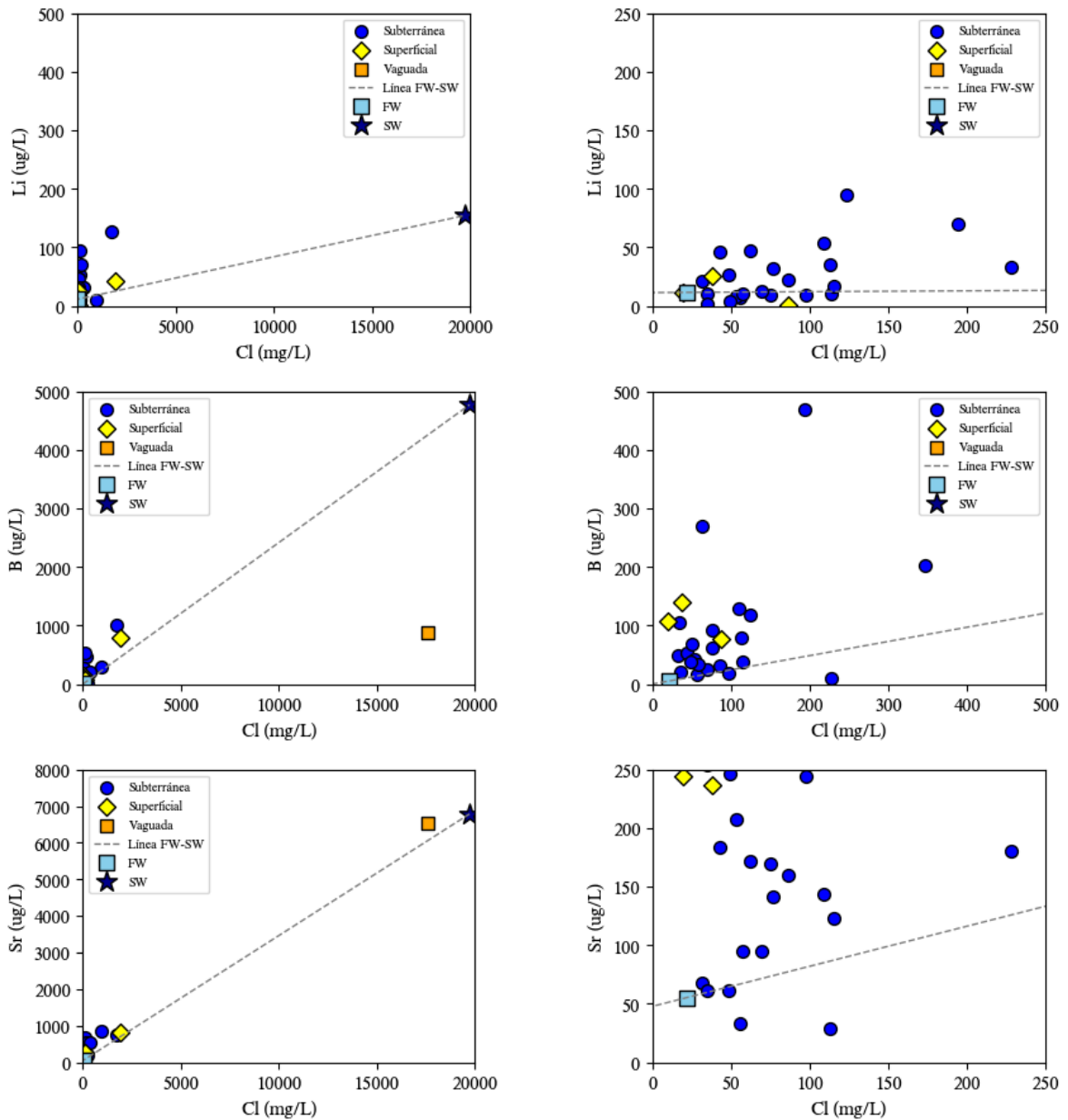


Figura 29: Gráfico bivariable cloruro y elementos traza

En cuanto a los gráficos de los elementos traza sugieren que el Li y el B tienen un probable origen marino, a diferencia del Sr. En el caso del Sr, las muestras muestran un enriquecimiento que no sigue la línea de mezcla entre agua dulce (FW) y agua de mar (SW), lo que indica una posible influencia de otras fuentes en su concentración. En conjunto, estos patrones sugieren un sistema hidrogeoquímico caracterizado por una mezcla de influencias marinas y otros procesos fisicoquímicos.

## 4.6. Análisis estadístico multivariante

El análisis multivariante es una herramienta de gran relevancia en el manejo de datos, en el ámbito de la hidrogeoquímica posibilita comprender e interpretar el conjunto de análisis químicos provenientes de las muestras de aguas subterráneas y superficiales. Los sistemas hidrogeológicos deben su complejidad a multiplicidad de factores, tales como, la influencia antrópica, la geología y la intrusión marina. El análisis multivariante permite revelar relaciones inherentes que no se contemplan a simple vista, aportando una ventaja significativa para la comprensión de los fenómenos (Güler et al., 2002, Taucare et al., 2020).

### 4.6.1. Análisis jerárquico de clústeres

Para la clasificación de muestras y el análisis de los datos se emplea la clasificación a través del análisis jerárquico de conglomerados, un método ampliamente usado en estudios de hidrogeoquímica (Guggenmos, 2011; O'Shea y Jankowski, 2006). En la Figura 26 se muestran dos dendogramas, en el primero se establece una línea punteada situada en  $y = 6.5$ , la cual permite definir 3 clústers de muestras de agua que comparten características similares. Las muestras 31 y 32 no se consideran como una agrupación debido a que corresponden a muestras de agua de mar y vaguada costera. Para el segundo dendograma de variables, se observa una agrupación entre el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  otra de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{B}$  y de manera apartada el  $\text{HCO}_3^-$ .

A partir de la Figura 30 se logra dilucidar que el Clúster 1 y Clúster 2 tienen una mayor similitud entre ellos respecto al Clúster 3 que se encuentra ligado a la influencia marina, dado su cercanía con las muestras n°31 y n°32.

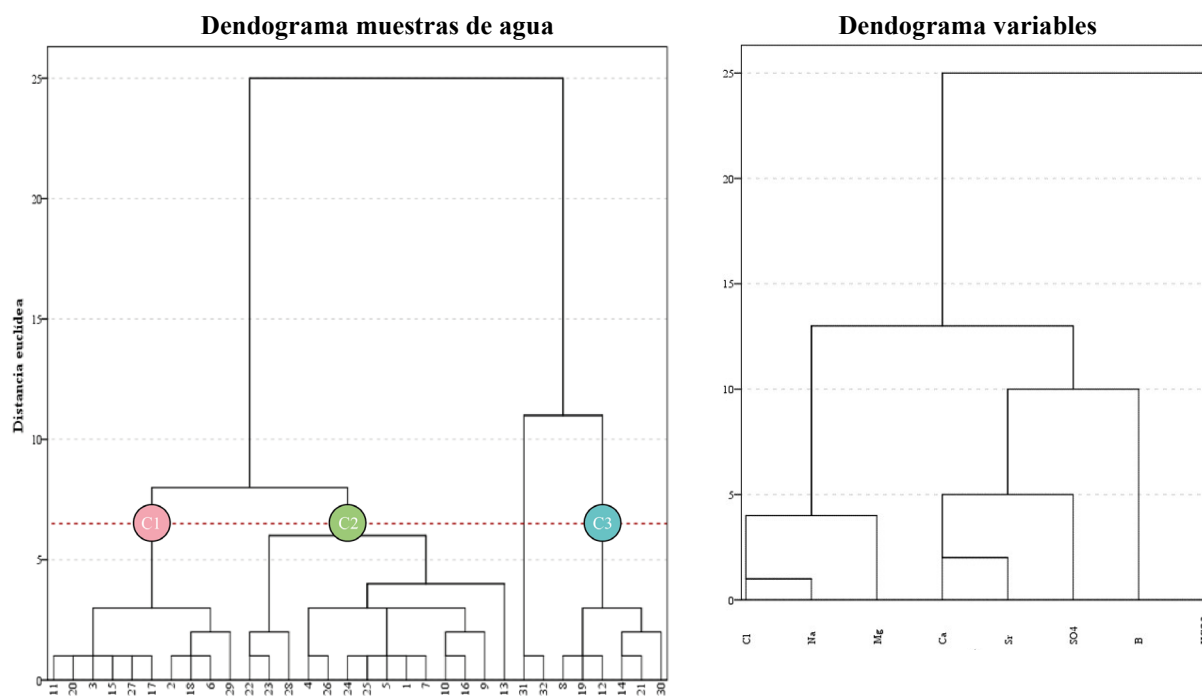


Figura 30: Dendrograma de análisis jerárquico de conglomerados para muestras y variables

En la Figura 31 se presenta el promedio y los diagramas de Stiff de cada clúster para caracterizar de mejor manera cada grupo.

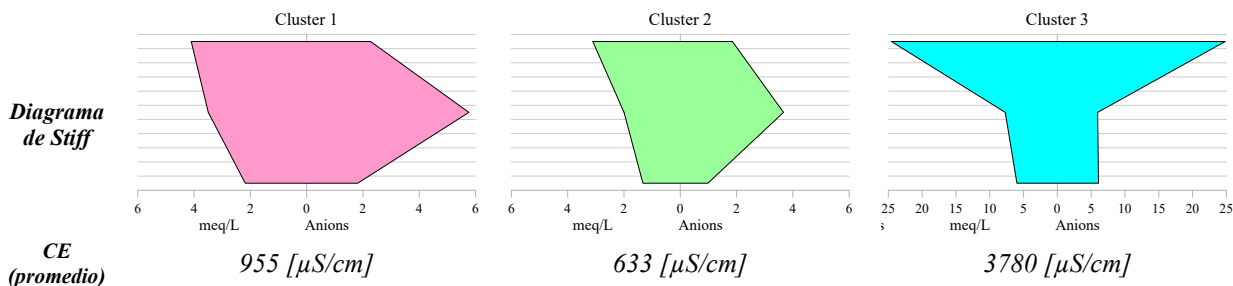


Figura 31: Diagramas de stiff y promedio de conductividad eléctrica por clúster

Además, para explorar aspectos adicionales de cada clúster, se efectúa un diagrama de caja para el nitrato, así como diagramas de caja para elementos traza, con el objetivo de visualizar la variación y las tendencias dentro de los diferentes clústeres. En la Figura 32 se muestran los boxplots correspondientes al nitrato y a algunos de los elementos traza.

Es posible ver que para el  $\text{NO}_3^-$ , el clúster 2 tiene una mayor dispersión de datos y con mayores concentraciones respecto al clúster 1 y 3. El clúster 1 es el que presenta menores concentraciones de este elemento y a su vez una menor dispersión.

Respecto al Li, el clúster 3 tiene la concentración más alta, con una mediana cercana a los 40  $\mu\text{g}/\text{L}$  y una alta dispersión, lo que sugiere una mayor variabilidad. El clúster 1 presenta concentraciones intermedias de litio, con una mediana alrededor de los 20  $\mu\text{g}/\text{L}$ , mientras que el clúster 2 tiene la concentración más baja, con una mediana cerca de los 10  $\mu\text{g}/\text{L}$  y un rango más estrecho.

En cuanto al B, el clúster 3 muestra la mayor concentración, con una mediana cerca de los 400  $\mu\text{g}/\text{L}$  y una alta dispersión. Los clústeres 1 y 2 tienen concentraciones más bajas, siendo el clúster 2 el que presenta un rango más estrecho.

Para el Sr, el clúster 3 tiene la concentración más alta, con una mediana cerca de los 700  $\mu\text{g}/\text{L}$ . El clúster 1 tiene una mediana cercana a los 200  $\mu\text{g}/\text{L}$ , mientras que el clúster 2 muestra valores cercanos a los 100  $\mu\text{g}/\text{L}$ .

En general, el clúster 3 agrupa las mayores concentraciones en la mayoría de los elementos traza graficados, en comparación con los clústeres 1 y 2. Al comparar los clústeres con concentraciones más bajas, es decir, el clúster 1 y el clúster 2, se observa que el clúster 1 tiene valores más elevados en manganeso, estroncio, níquel y selenio, mientras que el clúster 2 muestra concentraciones superiores en molibdeno, vanadio y bario. Sin embargo, entre estos dos clústeres no existen grandes diferencias.

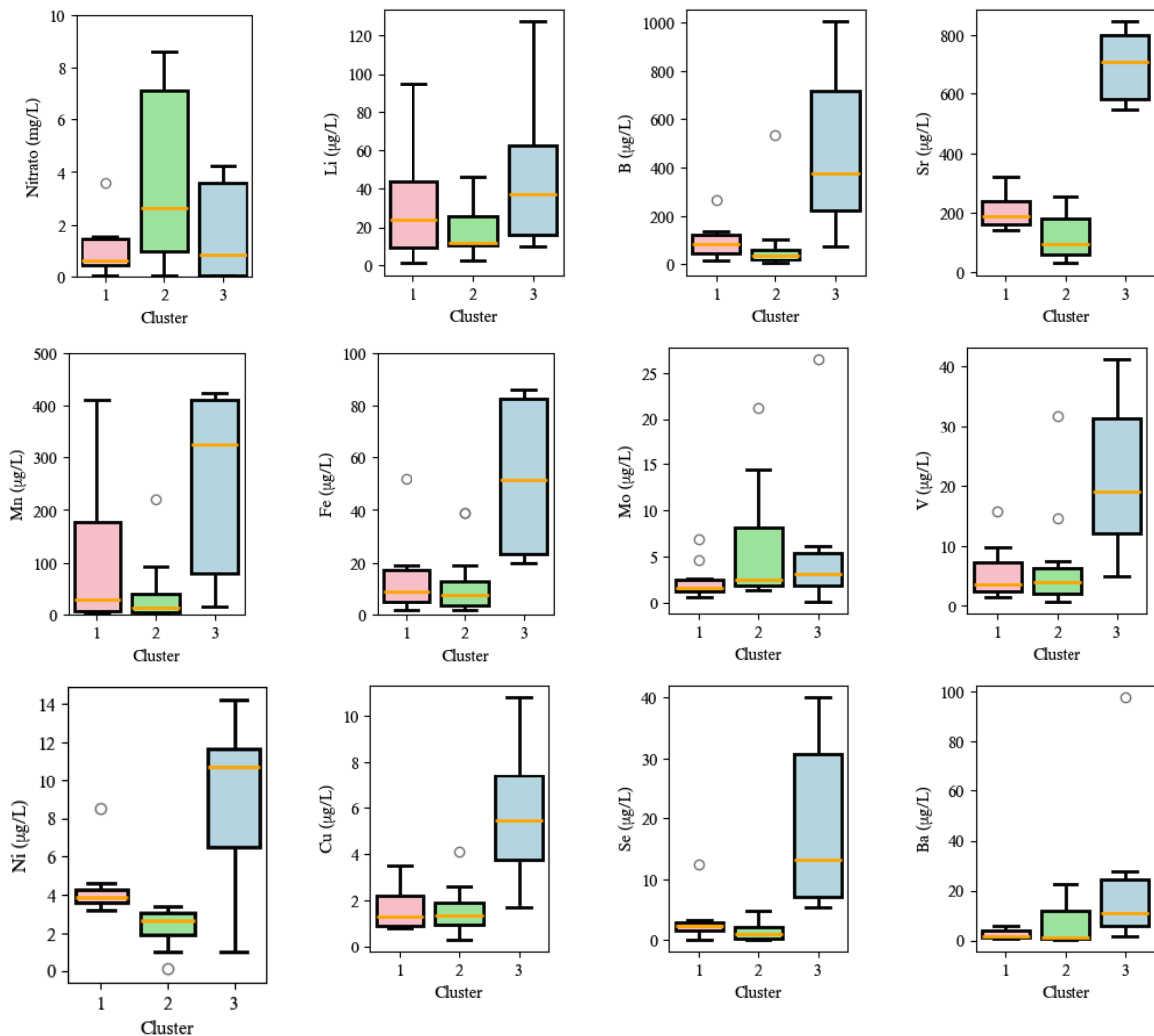


Figura 32: Diagrama de caja nitrato y elementos traza según clúster

Para visualizar de manera espacial el agrupamiento de datos y su posible relación geológica, se efectúa un mapa con la simbología de los clústers definidos anteriormente en la Figura 33 sobre el mapa geológico del sector.

El clúster 1 agrupa pozos, norias y en aguas superficiales al humedal El Culenar y al Estero Los Maitenes, este grupo se caracteriza por un mayor contenido de bicarbonato y a estar vinculadas a esteros y aguas superficiales, aparentemente desligadas del curso principal del Río Rapel. Para el clúster 2, estas contemplan también pozos, norias y en aguas superficiales a la muestra del Río Rapel, este grupo a diferencia del cluster 1 muestra una menor concentración de iones. Gran parte de las muestras se encuentran aledañas al curso del río (n°3, 4, 5, 7, 22, 23, 24, 25, 28), sin embargo, al suroeste el mapa su ocurrencia espacial es más aleatoria. En cuanto al clúster 3, este grupo comprende al Humedal la Vega de Pupuya (n°31), una noria ubicada en la desembocadura del Río Rapel (n°21), a un pozo de Matanzas y dos pozos cercanos al estero de Matanzas (n°19) y al Estero de pupuya (n°12) correspondientemente. Las muestras de agua del clúster 3 tienden a estar cercanos a la costa y se les asocia a aguas que tienen un mayor aporte de influencia marina y a procesos que aportan concentraciones significativas de elementos traza.



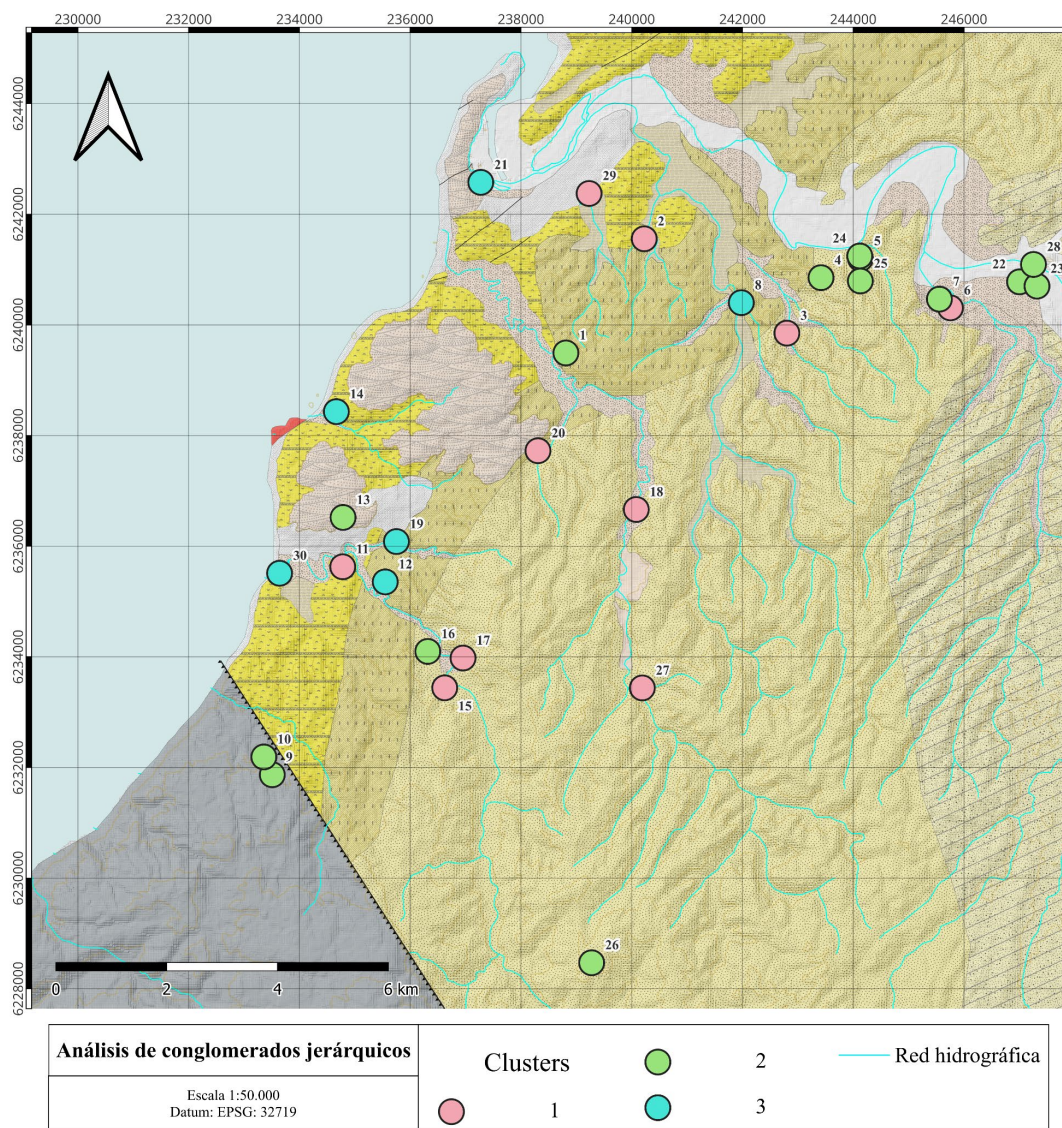


Figura 33: Distribución espacial de clusters

#### 4.6.2. Análisis factorial

El análisis factorial es un método que permite identificar y agrupar aquellas muestras que están correlacionadas. Esta herramienta estadística reduce la dimensionalidad y facilita la interpretación de las posibles interacciones que expliquen la composición química del agua (Meng and Maynard, 2001; Daniele et al., 2022). En la Tabla 4 se exhiben los tres factores obtenidos a partir del análisis. Estos se determinan con valores de carga mayores a 0,5. En los casos en que un ion tiene cargas significativas en los factores 1 y 2, se prioriza su inclusión en el factor donde presenta la carga más alta.

En su conjunto, los tres factores explican el 91,15% de la varianza total. En el factor 1 (F1) se agrupan  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , B, en el factor 2 (F2)  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y Sr y el factor 3 (F3) con una carga factorial cercana a 1 de manera aislada se encuentra el  $\text{HCO}_3^-$ .

Tabla 1. Prueba de KMO y Bartlett y Matriz de componente rotado

Medida Kaiser-Meyer-Olkin de adecuación de muestreo		0,673	
Prueba de esfericidad de Bartlett	Aprox. Chi-cuadrado	344,575	
	Gl	28	
	Sig	0.000	
Matriz de componente rotado			
Iones	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Cl	<b>0,850</b>	0,470	-0,016
SO4	0,525	<b>0,755</b>	-0,100
HCO3	0,056	-0,015	<b>0,998</b>
Na	<b>0,911</b>	0,355	0,114
Ca	0,350	<b>0,923</b>	0,098
Mg	<b>0,679</b>	<b>0,627</b>	0,024
B	<b>0,762</b>	0,387	0,052
Sr	0,517	<b>0,823</b>	-0,092
Varianza (%)	40,78	37,37	13
Varianza Acumulada (%)	40,78	78,15	91,15

En la Figura 34 se grafican las cargas factoriales por muestra y por ión. Las muestras de agua se simbolizan de acuerdo con su fuente; subterráneas, superficiales o si corresponden a la muestra de agua de mar o vaguada costera.

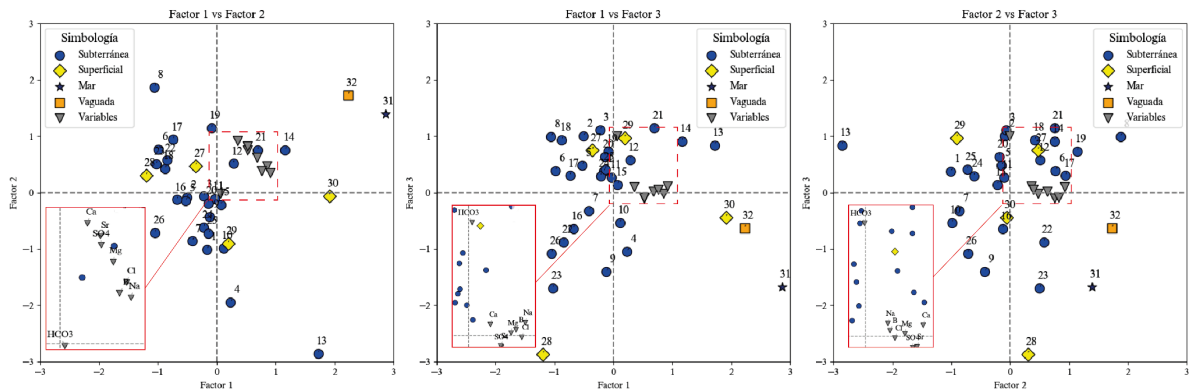


Figura 34: Gráficos de cargas factoriales

En la Figura 35 se muestra la variación espacial y carga factorial de los tres factores. En el F1 que agrupa los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y B, se interpreta como la influencia marina, debido a la presencia de estos iones en altas concentraciones en el océano (Goldberg et al., 1971; Daniele et al., 2022). Además, espacialmente se observa hacia zonas costeras cargas factoriales elevadas en el pozo de Matanzas (n°14), el pozo de Lagunillas (n°13), la muestra superficial de La Vega de Pupuya (n°30) y la noria de la desembocadura de La Boca (n°21). Las puntuaciones más altas se registran en la muestra de agua de mar (2,86) y en la vaguada costera (2,23), confirmando la influencia marina en estas áreas.



En cuanto al F2, se observa una mayor dispersión en las cargas factoriales, algunas coincidiendo con el F1. Este factor agrupa a los iones  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y Sr. Este factor se interpreta como resultado de la interacción agua-roca. Los valores de F2 en las muestras de vaguada (1,78) y mar (1,38), pueden explicarse por la presencia de rocas originadas en un ambiente marino, ya que las Formaciones Navidad, Licancheu, Rapel y La Cueva son de un ambiente marino somero de alta energía (Encinas, 2006; Gutiérrez et al., 2013). La interacción agua-roca del área favorece a la liberación de los iones mencionados. En particular, el Sr, cuyo radio atómico es similar al del  $\text{Ca}^{2+}$ , puede participar en procesos de intercambio iónico, reemplazándolo.

Adicionalmente, el F2 podría estar influenciado por los componentes aportados por el agua de niebla marina, que se deposita en el suelo y al infiltrarse, percola y entra en contacto con las rocas. Estas rocas están compuestas por carbonatos, fracturas rellenas, conglomerados y areniscas con líticos félsicos (Garcés, 2018). Este proceso favorece la disolución de minerales como la calcita y la albita presentes en las rocas. Además de los iones generados por la disolución mineral, es posible que haya una mayor adición de estos elementos a los acuíferos debido al aporte de la vaguada, cuyas concentraciones de  $\text{Mg}^{2+}$  son similares a las del agua de mar, mientras que los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  se encuentran enriquecidos y el  $\text{Cl}^-$  aparece en menor concentración (Isil et al., 2022; Benedict et al., 2012).

El F3 saturado exclusivamente por la variable  $\text{HCO}_3^-$ , ha sido interpretado como la evidencia de con la oxidación de metano y la reducción de sulfato, procesos vinculados a emanaciones de hidrocarburos (seeping) que se desplazan a través de fallas y/o fracturas. Los altos valores del F3 en el pozo de matanzas (n°14) y en la noria de La Boca (n°21), que presentan valores de potencial de oxidación negativos (ver Figura 13d) y su cercanía al afloramiento del paleoseep de Navidad, avalan la interpretación y sugieren una interacción entre las zonas de oxidación de metano y reducción de sulfato, donde el metano interactúa con el sulfato de agua de mar. El proceso de oxidación de metano y reducción de sulfato se resume en la siguiente ecuación:



Como consecuencia de lo anterior, las aguas tienen bicarbonato que aumenta la alcalinidad del entorno y facilita la precipitación de carbonato de calcio autigénico (Contardo-Berrios., 2017; Valentine, 2002; Nyman et al., 2010).

Este fenómeno no sería el único que ocurre en Chile, puesto que ya ha habido descubrimientos realizados frente a costas del centro-sur del país (Sellanes et al., 2004, 2007, 2008; Quiroga y Levin, 2010; Klauke et al., 2012). Es probable que existan flujos de metano, tanto actuales como antiguos, controlados por estructuras activas en el talud submarino frente a las costas de la localidad de Navidad. Asimismo, es posible que se hallen flujos de metano fósil en el continente (Contardo-Berrios et al., 2017). Además, la presencia de piritita autigénica y materia orgánica en muestras provenientes de concreciones en la Fm. Navidad en el sector Punta Perro sugiere la posible intervención de la oxidación anaeróbica de metano y metanogénesis (Garcés, 2018).

La interacción de los acuíferos con metano puede ocurrir en dos escalas de tiempo una rápida y baja producción a partir de carbono en micrositos anaeróbicos, y otra más lenta (milenios), a partir de la descomposición de carbono refractario. Combinaciones de  $\text{HCO}_3^-$  elevado y  $\text{SO}_4^{2-}$  bajo (o viceversa) además de valores reductores de potencial redox pueden indicar posibles interacciones con emanaciones de metano (Darling y Goody., 2006).

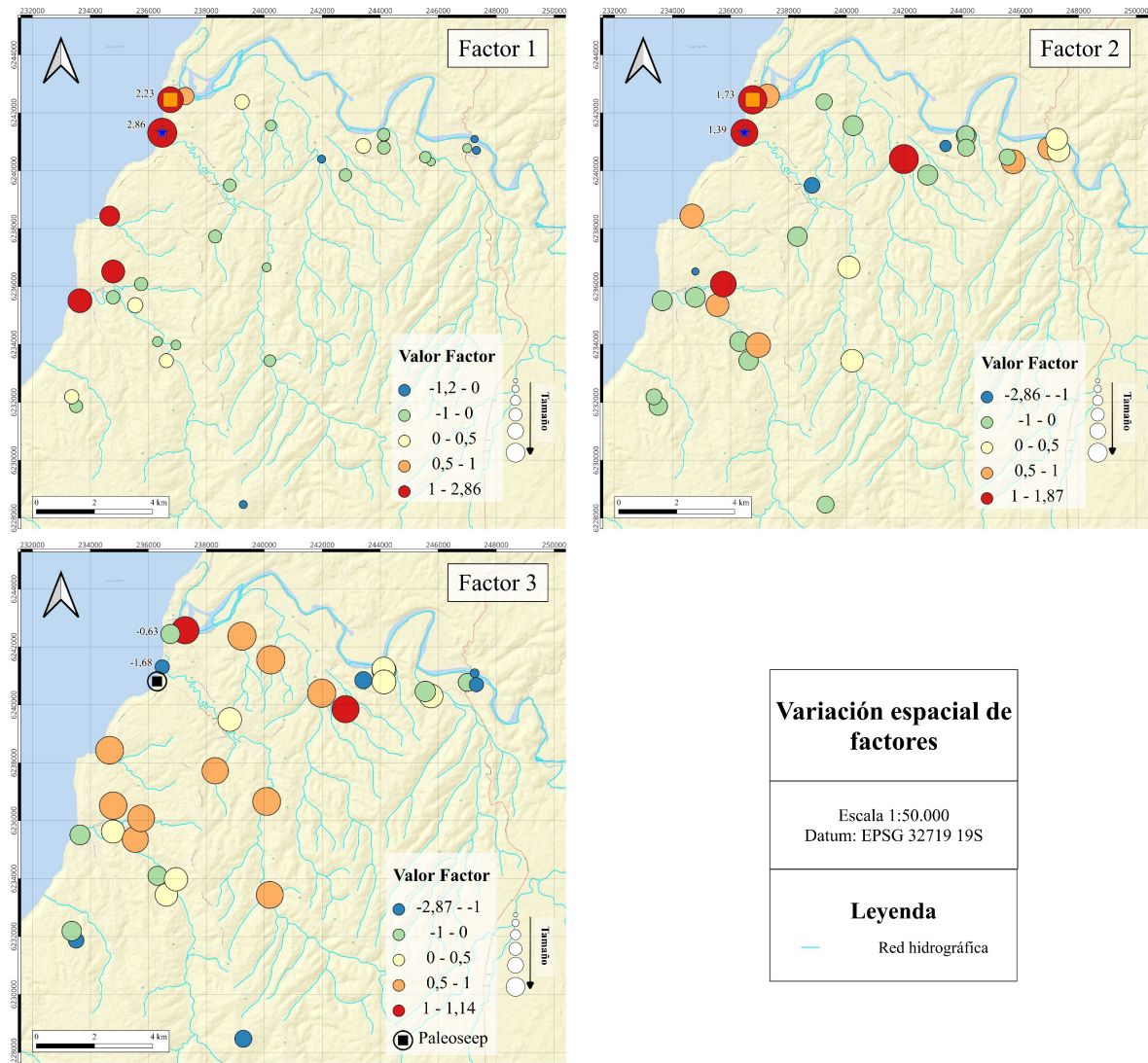


Figura 35: Distribución y variación espacial de los tres factores calculados

## 4.7. Interacción agua roca

Además de la alteración en la composición del agua subterránea por procesos como la evaporación, el contacto con el aire o el impacto antrópico, la interacción agua-roca es un proceso inherente al enriquecimiento de iones, influyendo de manera significativa en la composición de cuerpos de agua superficiales como ríos y lagos o en aguas subterráneas. Este fenómeno se desarrolla cuando el agua se encuentra en contacto con rocas, disolviendo, precipitando y alterando los minerales bajo condiciones específicas de temperatura, pH, y otros factores, lo que incide en la concentración de los compuestos químicos del agua, la cual depende directamente de la mineralogía a través de la cual circula (Appelo y Postma, 2005).

Dentro del sector de estudio existe una gran variedad de composiciones químicas, donde se visualizan aguas Ca-HCO<sub>3</sub>, Na-HCO<sub>3</sub>, Na-Cl, y Ca-SO<sub>4</sub>. (Ver Figura 19). En adición a los procesos expuestos en los análisis anteriores y tomando en consideración que el aporte de elementos mayoritarios como el Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> no se explican de manera exclusiva por la mezcla de agua dulce y agua de mar, se consideran las reacciones de disolución y meteorización de aguas expuestas en la Tabla 2.

La abundancia fosilífera en las rocas estratificadas de la comuna de Navidad, la circulación del agua por los estratos junto a la interacción de CO<sub>2</sub> disuelto, podrían favorecer la disolución de calcita. Este proceso combinado con la alta concentración de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> derivados del agua de mar, spray marino o vaguada costera propicia la precipitación de yeso en las fracturas de las rocas. En cuanto a la mineralogía de las rocas que componen el área de estudio, el basamento se asocia a rocas graníticas (Tavera, 1979) granodioríticas y tonalíticas, principalmente rocas de félsicas a intermedias, al igual que los líticos que componen las rocas sedimentarias (Garcés, 2018) dando lugar a minerales como la albita.

Tabla 2. Reacciones de disolución

Nº	Ecuación	Proceso
(1)	$\text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^- + \text{H}_2\text{O}$	Disolución de halita
(2)	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + 3\text{SiO}_2 + \text{Al}(\text{OH})_3 + \text{HCO}_3^-$	Disolución de albita
(3)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} (\text{s}) \rightarrow \text{Ca}^{2+} (\text{aq}) + \text{SO}_4^{2-} (\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O} (\text{l})$	Disolución de yeso
(4)	$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$	Disolución de calcita

En la Figura 36 se presenta el grafico de la relación molar entre Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup>. Se observa que la mayoría de las muestras presenta un exceso de Na<sup>+</sup>, lo que indicaría que la disolución de sales (halita) de la ecuación n° 1 no sería el único proceso que aporta este ión.

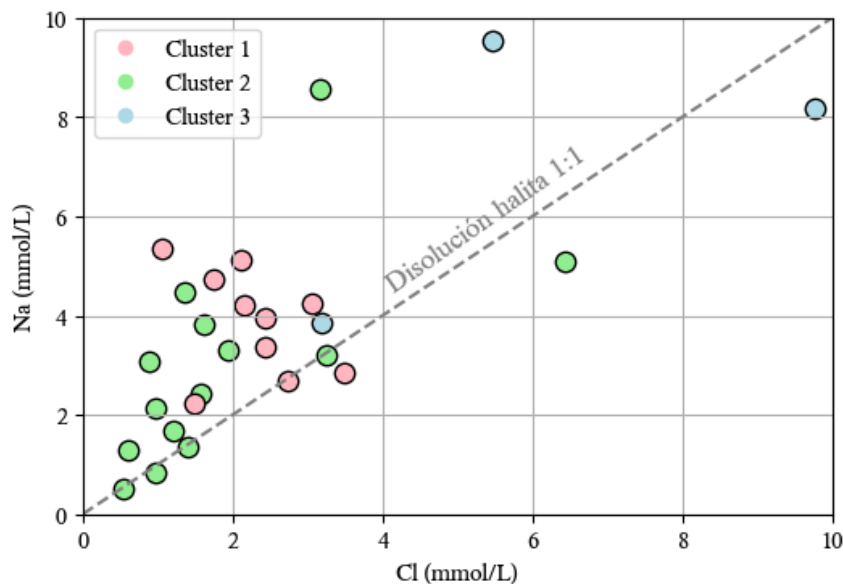


Figura 36: Relación molar Na<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>

Considerando que los moles  $\text{Na}^{2+}$  de la disolución de halita han reaccionado con los moles de  $\text{Cl}^-$ , estas aguas también interactuarían con las rocas de sector, participando en este proceso la disolución de albita de la ecuación n°2, por lo que se establece en la Figura 37 la relación molar entre  $\text{HCO}_3^-$  y la resta  $\text{Na}^{2+} - \text{Cl}^-$ . En base al grafico se observa un exceso de  $\text{HCO}_3^-$ .

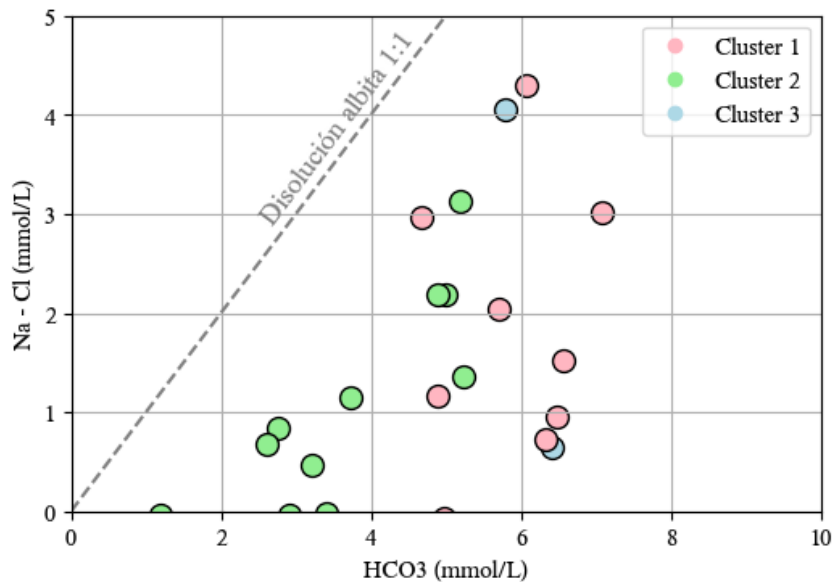


Figura 37: Relación molar  $\text{Na}^{2+}-\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$

Para dilucidar la proveniencia del  $\text{Ca}^{2+}$ , en la Figura 38 se establece la relación de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  para observar la participación de la disolución de yeso y su aporte del ión a las aguas de las muestras. Se observa que claramente existe un exceso de  $\text{Ca}^{2+}$  en la mayoría de los puntos presentados.

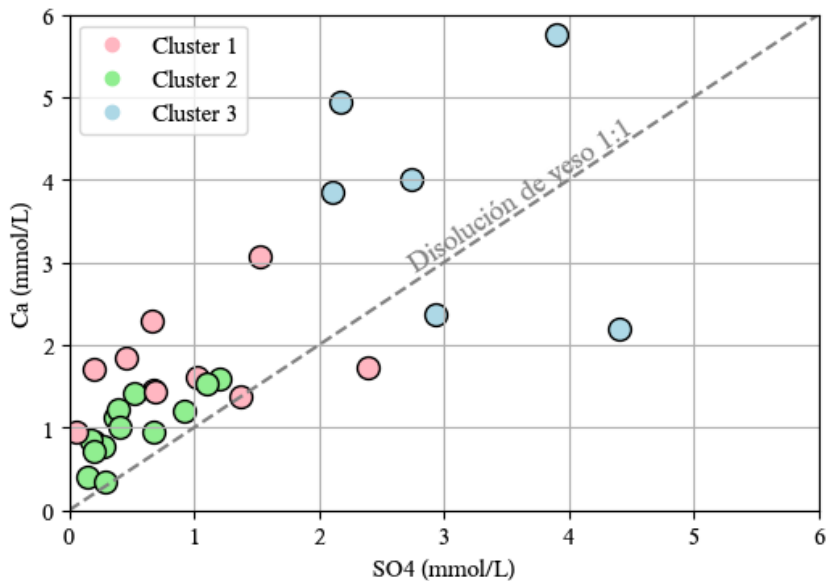


Figura 38: Relación molar entre  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$

Considerando que los moles  $\text{Ca}^{2+}$  de la disolución de yeso han reaccionado con los moles de  $\text{SO}_4^{2-}$ , estas aguas también participarían en la disolución de calcita (ecuación n°4), además de que los moles de  $\text{HCO}_3^-$  habrían reaccionado con el  $\text{Na}^{2+}$  en la disolución de albita se establece en la Figura 39 la relación de la resta de  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^{2+}$  y la resta de  $\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ .

Se observa que la línea tiene un buen ajuste en las muestras de agua del área de estudio, lo que explicaría su afinidad a este proceso. El exceso de  $\text{HCO}_3^-$  podría deberse al aporte del “seeping”.

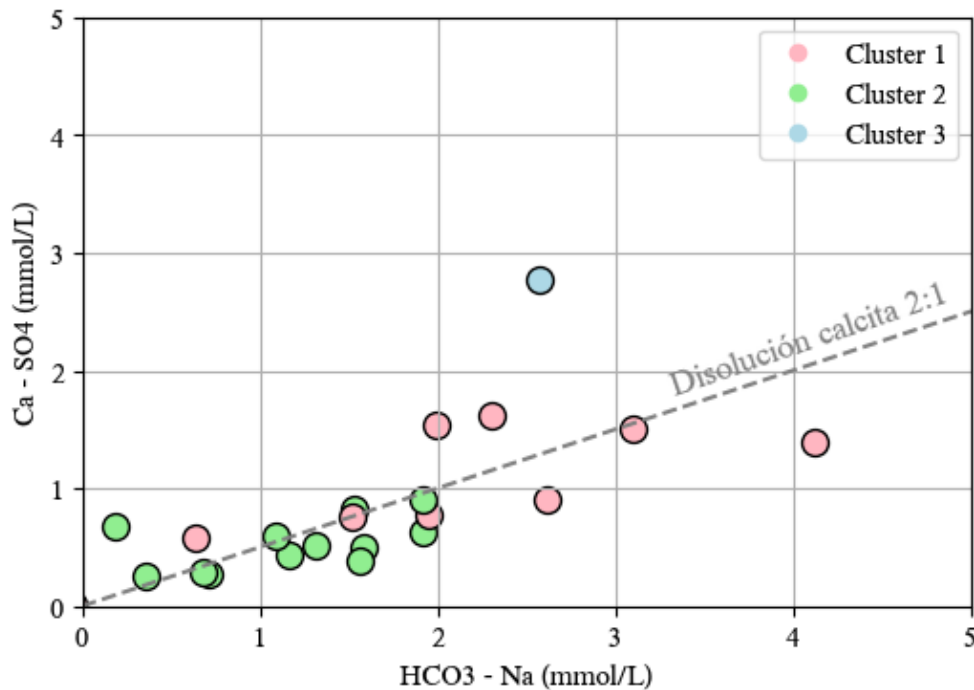


Figura 39: Relación molar entre  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$

## 4.8. Isótopos estables

Los isótopos estables de la molécula del agua  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  permiten obtener información valiosa, ya que posibilitan dilucidar fuentes y área de recarga de las muestras de agua analizadas. Los procesos hidrogeológicos pueden afectar también a la composición isotópica del agua, lo que provoca una desviación de la línea meteórica. Estas alteraciones, y las ubicaciones de los puntos en relación con la línea meteórica permitirían identificar a los procesos involucrados en dicha alteración (Domenico y Schwartz, 1998) (ver Anexo D Figura 50).

Los resultados para las aguas subterráneas de la concentración de  $\delta^{18}\text{O}$  arrojan un valor mínimo de  $-10,21\text{‰}$  y un valor máximo de  $-4,39\text{‰}$ , mientras que para  $\delta^2\text{H}$  los valores se encuentran entre  $-72,82\text{‰}$  y  $-26,77\text{‰}$ . En la tabla 3 se muestra la información isotópica de las muestras superficiales y de vaguada costera, el resto de los datos se encuentran en el Anexo C.

. Tabla 3. Contenido de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$

n°	Fuente	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
27	Estero Los Maitenes	-5,09	-26,66
28	Río Rapel	12,26	-89,44
29	Humedal el Culenar	4,64	19,42
30	Humedal La Vega de Pupuya	-0,05	-6,14
31	Mar	-0,63	-5,89
32	Vaguada	-1,76	-11,61
33	Vaguada	-3,14	-20,94

En la Figura 40 se observa que gran parte de las muestras de agua subterránea se alinean tanto a la línea meteórica local definida por Taucare et al. (2020) representada en el grafico como 33°S Chile MWL como a la línea meteórica mundial representada como GMWL.

Las muestras de agua subterránea que se encuentran por debajo de la línea meteórica se interpretan como aquellas que siguen una trayectoria asociada a la evaporacion de las aguas, ya que están principalmente asociadas a esteros cercanos.

La variabilidad vertical y lateral puede explicarse por la variabilidad local. Para dicho efecto, se utilizan los datos de la estación de Valparaíso (IAEA, 2019) (Anexo D), en los cuales los diagramas de caja representan la variabilidad del contenido isotópico que pueden presentar las muestras, las cuales se encuentran dentro del rango esperado.

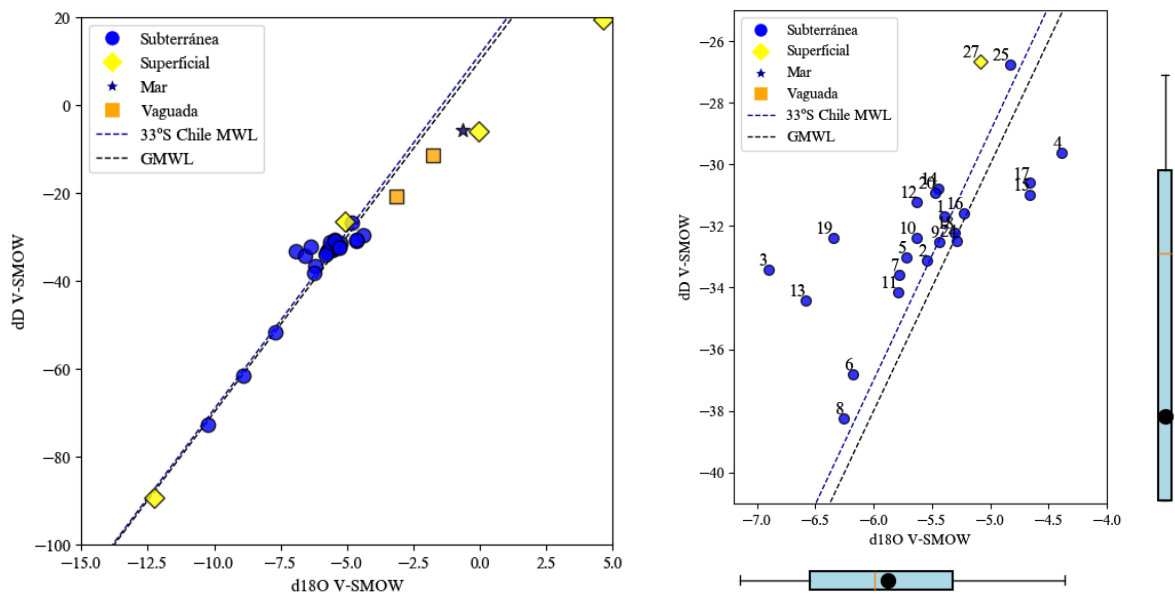


Figura 40 Gráfico  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  con los datos de las muestras de agua. Se grafica la línea de agua meteórica local (33°S Chile MWL), definida por Taucare et al (2020) y la línea meteórica mundial de Craig (1961) junto con los boxplot de variabilidad de los datos de la estación de Valparaíso de IAEA (2019). A la derecha, un zoom para observar algunos detalles

En la Figura 41 se muestra el gráfico de  $\delta^{18}\text{O}$  y Elevación en m.s.n.m. La línea azul representa la variación vertical del contenido isotópico, que refleja el efecto orográfico continental en los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  a 33°S. La línea roja corresponde al mismo efecto orográfico-continental, pero con una desviación estándar añadida procedente de los datos de la estación de Valparaíso, lo que brinda una mejor aproximación del efecto en el área de estudio.

Se observa que las muestras se encuentran desplazadas a la derecha de la línea correspondiente al efecto orográfico-continental a 33°S establecida por Taucare et al (2020). Este desplazamiento indica que las muestras provienen principalmente de precipitaciones locales, con una tendencia hacia la composición del agua de mar y de vaguada.

Algunas muestras (n°21, 22 y 23) presentan valores isotópicos que corresponden a cotas mayores a las que fueron recolectadas, sin embargo, la posición de éstas, cercanas al río Rapel, sugiere una posible contribución del mismo río a la recarga.

A partir de la línea del efecto orográfico con la adición de una desviación estándar de los datos de la estación de Valparaíso se observa que el agua que contribuye a las muestras n°1, 2, 5, 7, 11, 12, 14, 16, 18, 20 y 24 habrían precipitado entre los 100 y 300 m.s.n.m. con un mecanismo de recarga indirecto, producto de la escorrentía y posterior infiltración, percolación y recarga.

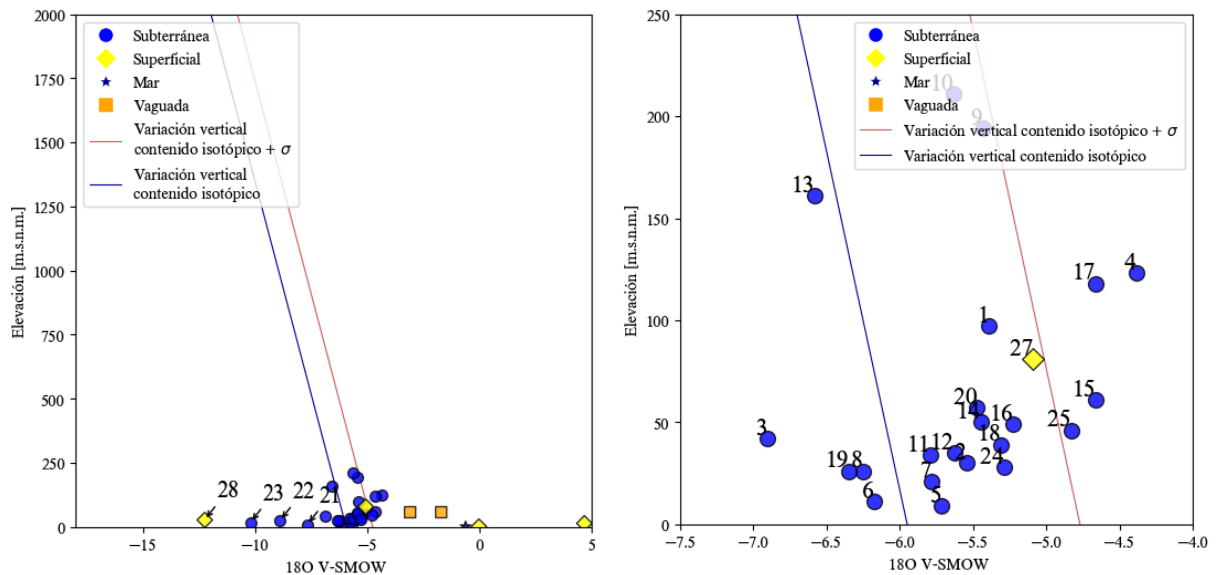


Figura 41. Efecto orográfico-continental en los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  a 33°S. A la derecha, un zoom para observar algunos detalles

En la Figura 42 se muestran los clúster obtenidos para corroborar la interpretación realizada. En el clúster 1, asociado a aguas superficiales y esteros, destaca la muestra del estero Los Maitenes (n°27), que se ubica cerca de la línea establecida a partir de los datos de precipitaciones de la estación de Valparaíso. Esto sugiere que el agua que contribuye al estero procedería principalmente de una recarga directa. En el caso del clúster 2, se interpreta como un grupo de muestras asociadas al río Rapel, incluyendo muestras de pozos de la localidad de Rapel y cercanas al curso principal del río. El clúster 3 presenta muestras desplazadas a la izquierda de



la línea meteórica (n°8, 12, 14 y 19) probablemente por el exceso de  $\text{HCO}_3^-$  asociado al “seeping”. La dispersión observada en los clústeres podría explicarse por la complejidad del sistema, que involucra la mezcla de aguas provenientes del río Rapel, esteros, lluvias locales e influencia marina. Esta multiplicidad de factores y fenómenos se superpone en las muestras con intensidades diferentes.

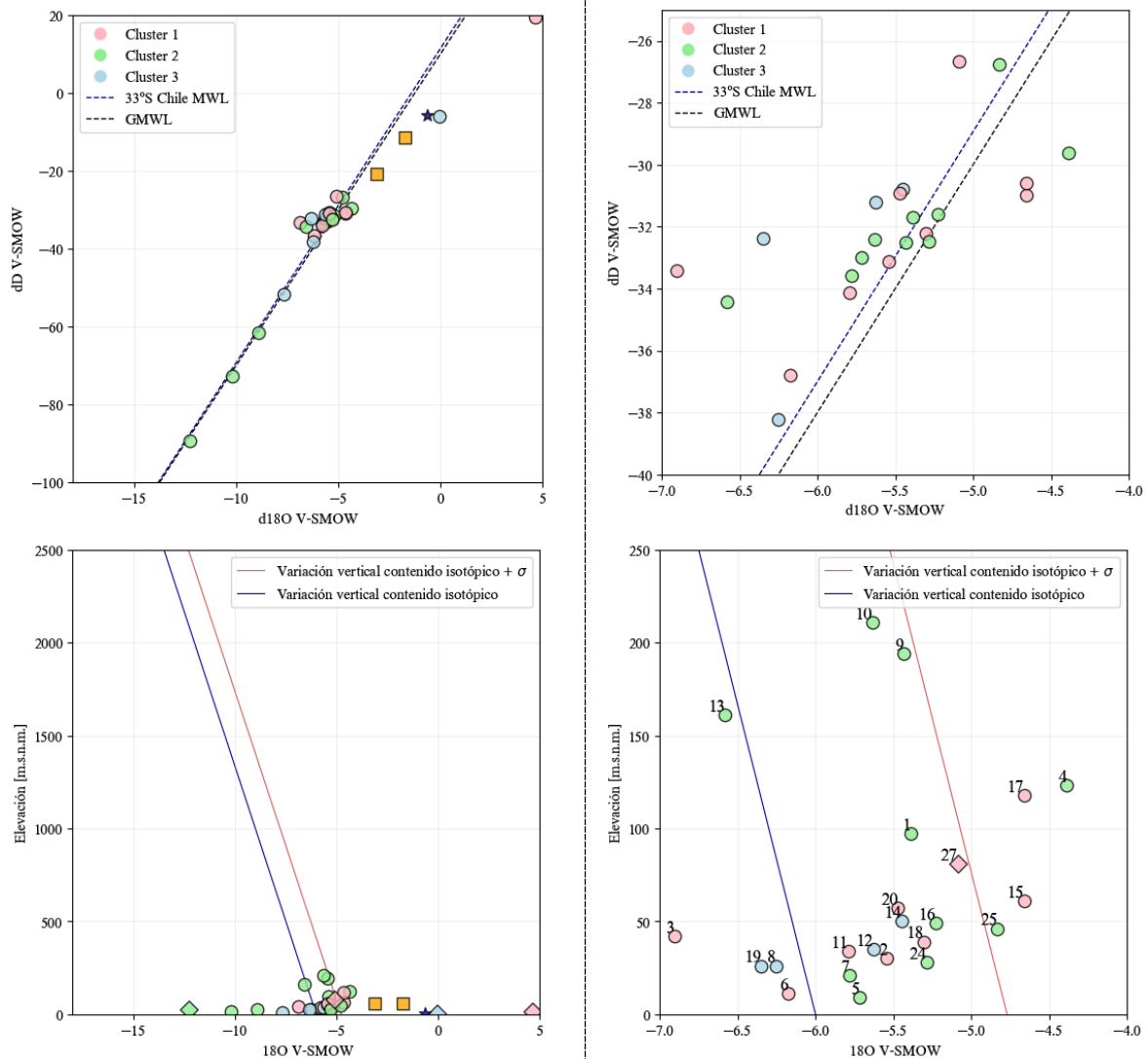


Figura 42: Gráficos de isótopos con incorporación de clústeres. A la derecha, un zoom para observar algunos detalles

## 4.9. Interacción vaguada costera

En el presente estudio se incluyó la toma de muestras de vaguada costera a través de la captación de un atrapanieblas ubicado a 60 m.s.n.m. situado en el borde de un acantilado frente a la playa de La Boca (Ver Figura 2). Se efectuaron dos recolecciones, de las cuales, la muestra n°32 se le efectuó el análisis químico completo. Se especifican sus parámetros fisicoquímicos y fechas de instalación y retiro en la Tabla 4.

A partir de la información de la tabla, se observa que existe un aporte de solutos mayor producto de la adición de partículas en las redes, debido al lavado que ocurriría en las fases iniciales de los eventos de niebla (Sträter, 2010). Lo anterior, es congruente con los resultados expuestos debido al elevado contenido de iones  $\text{Na}^{+2}$  (8650 mg/L) y  $\text{Cl}^{-}$  (17587 mg/L), también reflejados en los valores de conductividad eléctrica. Además, se muestra una clara relación con la composición química del mar, lo cual indica su origen oceánico (Koračin, 2014; Benedict et al. 2012). Asimismo, factores como la exposición directa, la dirección del viento, y la proximidad del atrapanieblas al mar actúan como potenciadores de este fenómeno, (Tang et al., 2023), por lo que es esperable que el componente marino disminuya gradualmente a medida que la vaguada se aleja de la costa.

Tabla 4. Datos de recolección de muestras de vaguada costera

	Conductividad eléctrica (uS/cm)	pH	Fecha instalación botella	Fecha retiro botella	Tiempo (días)
Muestra 1 (n°32)	46000	6,68	24-03-2024	04-04-2024	11
Muestra 2 (n°33)	73000	6,15	15-04-2024	20-04-2024	5

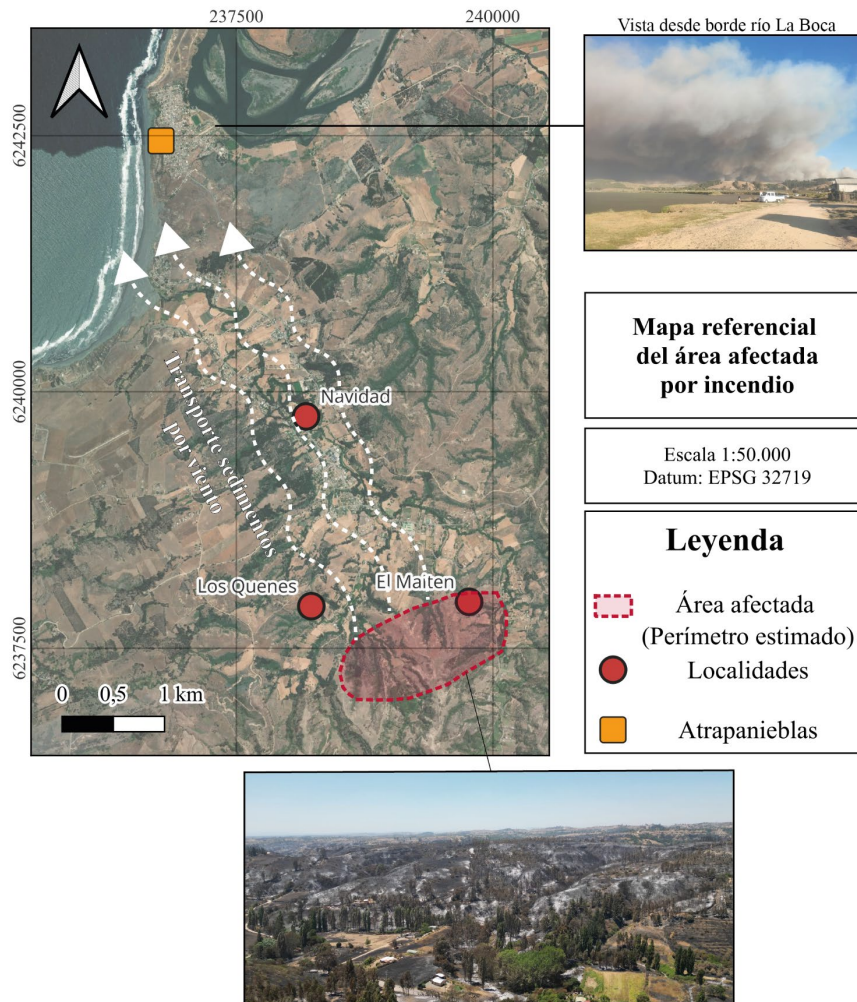
A pesar de la alta correlación y similitud con el agua de mar en las concentraciones de elementos mayores y elementos traza, destaca el valor de Mn que sobresale con un valor de 1026  $\mu\text{g/L}$  respecto a una concentración de  $< 2 \mu\text{g/L}$  del ejemplar extraído del mar (Ver Figura 35).

Es importante tener en cuenta que el hemisferio sur (y en Chile) es un espacio crítico en la deposición de Mn, donde las mayores concentraciones reportadas de la deposición del elemento son relativas al polvo del desierto (Lu et al., 2023) y en segundo lugar se encuentra la influencia de los incendios forestales (Odigie et al., 2015). También se suman a estos factores las fuentes industriales (Moreno et al., 2011). Adicionalmente es relevante considerar las partículas atmosféricas arrastradas como polvo mineral y metales traza transportados por el viento y que las nieblas marinas respecto a las continentales son más propensas a tener concentraciones altas de iones inorgánicos, pH más bajo y sulfatos primarios (Koračin, 2014), en otras palabras, de fuentes de emisión como la quema de combustibles fósiles, procesos industriales, y emisiones volcánicas.

Tomando en consideración la temporalidad de eventos, durante los meses de enero y febrero ocurrieron incendios que afectaron a varias de regiones de Chile, incluyendo la Región de O'Higgins (OIM, 2024) e incluso en la localidad de Navidad el 31 de enero de 2024 (La Tercera, 2024).

Dado que las concentraciones atmosféricas de Mn son cerca 2.5 veces más altas durante los periodos de incendios (Faye Isley y Taylor, 2020) y que los sedimentos pueden adsorber elementos traza, movilizarse por el viento, y que elementos como el Cu, Fe, Pb, Hg, Mn y Zn tienden a presentarse en mayores concentraciones a pH más bajos (Burton et al., 2016), no se descarta la posibilidad de que el material particulado haya sido transportado y depositado, para luego ser captado por el atrapanieblas, aún más, considerando el área de captación. Las condiciones de pH más ácidas en la vaguada podrían haber facilitado la disolución de elementos traza como el Mn, especialmente considerando la fuente, cercanía del incendio y el material particulado (ver Figura 43). También podría considerarse como factor contribuyente las arenas grises de la playa por su

contenido de ferromagnesianos, que luego de transportarse a la malla del atrapanieblas, estas partículas se hayan lixiviado (debido a el menor pH) y se encuentre manganeso disuelto en el agua.



*Figura 43: Mapa referencial del área de incendio y ubicación de atrapanieblas. El perímetro del área afectada es estimativo*

Lo anterior da algunas directrices del papel que puede desempeñar la niebla marina y el viento en el transporte de elementos. Además, considerando que la contaminación de origen humano, proveniente de la minería, industrias y plantas de energía a lo largo de la costa chilena influye en la composición iónica y en la presencia de metales pesados en la niebla marina (del Río et al., 2021), se pueden evaluar potenciales fuentes que contribuyan a la alteración de la química de las aguas del sector, las cuales, también presentan contenidos de elementos traza que suelen estar vinculados a factores antrópicos (Ver Anexo). Eso se suma al aporte hídrico de la niebla que podría incidir en la recarga de los acuíferos; un ejemplo de ello es el bosque Fray Jorge, situado en el desierto costero, donde la niebla aporta casi 1000mm al balance hídrico anual, lo que representa más del 75% del total de agua recibida (Cruzat-Gallardo, 2004; Kummerov, 1966).

La distancia que recorren los metales en la atmósfera está controlada por las condiciones meteorológicas, el tamaño de partículas y las propiedades fisicoquímicas de los aerosoles. En casos probables, estos elementos pueden ser transportados a grandes distancias a través de pequeñas partículas y, si en su trayecto no enfrentan grandes barreras (Bing et al., 2018).

Los metales atmosféricos pueden mantener su presencia en el ecosistema local durante largos períodos y tener un impacto significativo en el entorno en que se establecen (He et al., 2023). Su interacción con la vaguada puede movilizar estos metales, exacerbando su dispersión en el medio ambiente, sin embargo, este aspecto se propone a profundizar en futuros estudios, debido a que el análisis se limita sólo a una muestra de vaguada de análisis químico y dos muestras con información isotópica.

## 4.10. Comparativa entre normas

A continuación, se muestra la comparativa entre los límites establecidos por la norma y los parámetros de los resultados del análisis químico de las muestras de agua:

### 4.10.1. pH

Se observa en la Figura 44 que la mayoría de las muestras se encuentran dentro de los límites inferiores y superiores establecidos por la norma chilena de agua potable y la norma chilena de riego.

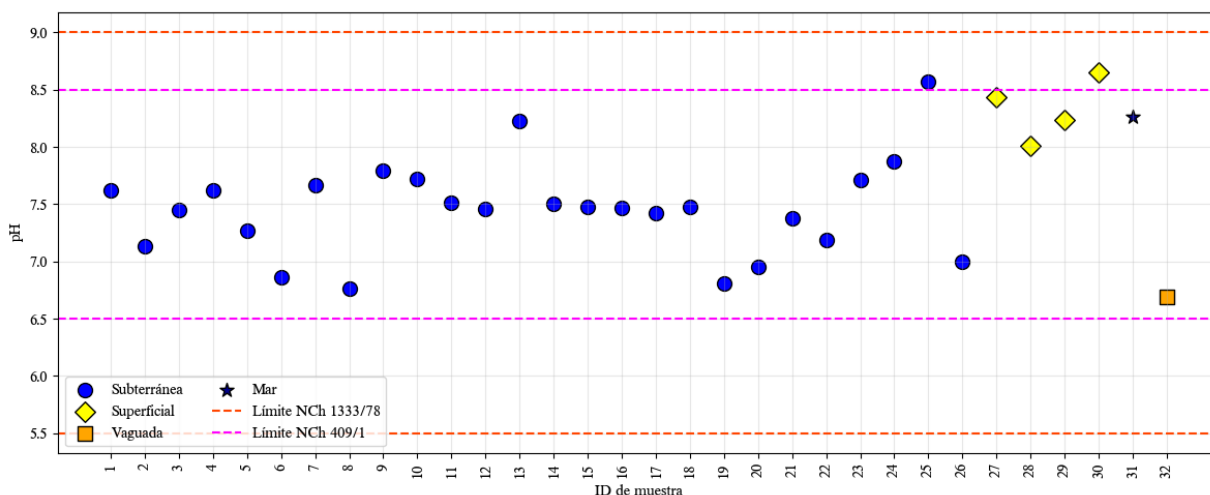


Figura 44: Gráfico comparativo del pH de cada muestra con los límites establecidos por la norma chilena

El pH de las muestras de agua subterránea presentan un promedio de 7,46, y oscilan entre 6,76 y 8,57. Por otro lado, para las muestras de aguas superficiales (excluyendo la muestra de agua de mar), se obtiene un promedio de 7,46 y varían entre 8,01 y 8,65. Sólo las muestra n°25 y n°30 se encuentran sobre el límite superior de la NCh 409/1.

## 4.10.2. Elementos mayores

A partir de la Figura 45a se observa para el  $\text{SO}_4^{2-}$  que todas las muestras de pozos y norias están debajo del límite establecido por la norma chilena de agua potable. Sin embargo, 3 de las 26 muestras se encuentran sobre los límites permitidos por la norma chilena de riego, siendo las muestras n°12, 14 y 19 con concentraciones de 281,45 mg/L, 374,89 mg/L y 263,75 correspondientemente las que sobrepasan el margen aceptado.

En la Figura 45b se observa para el  $\text{Cl}^-$  que la muestra n°9, 14, 19 y 21 exceden los límites permitidos por la norma chilena de agua de riego con concentraciones de 227,76 mg/L, 1722,39 mg/L, 346,54 mg/L y 962,74 mg/L. Además, las muestras n°14 y 21 superan los márgenes establecidos por la norma chilena de agua potable. Por último, la muestra n°12 se encuentra cercana al límite de la NCh 1333/78 con una concentración de 194,2 mg/L.

En la Figura 45c se muestra para el  $\text{Mg}^{2+}$  que todas las muestras de pozos, norias y manantial se encuentran por debajo de los límites permitidos por la norma chilena de agua potable, siendo la máxima concentración la muestra n°8 con 76,45 mg/L.

A partir de la Figura 45d para el  $\text{NO}_3^-$  se observa que 3 muestras están sobre el límite permitido por la norma chilena de agua potable. En particular, las muestras n°6 y 8 poseen concentraciones de 129,93 mg/L y 396,47 mg/L, mientras que la muestra n°22 tiene una concentración de 51,21 mg/L.

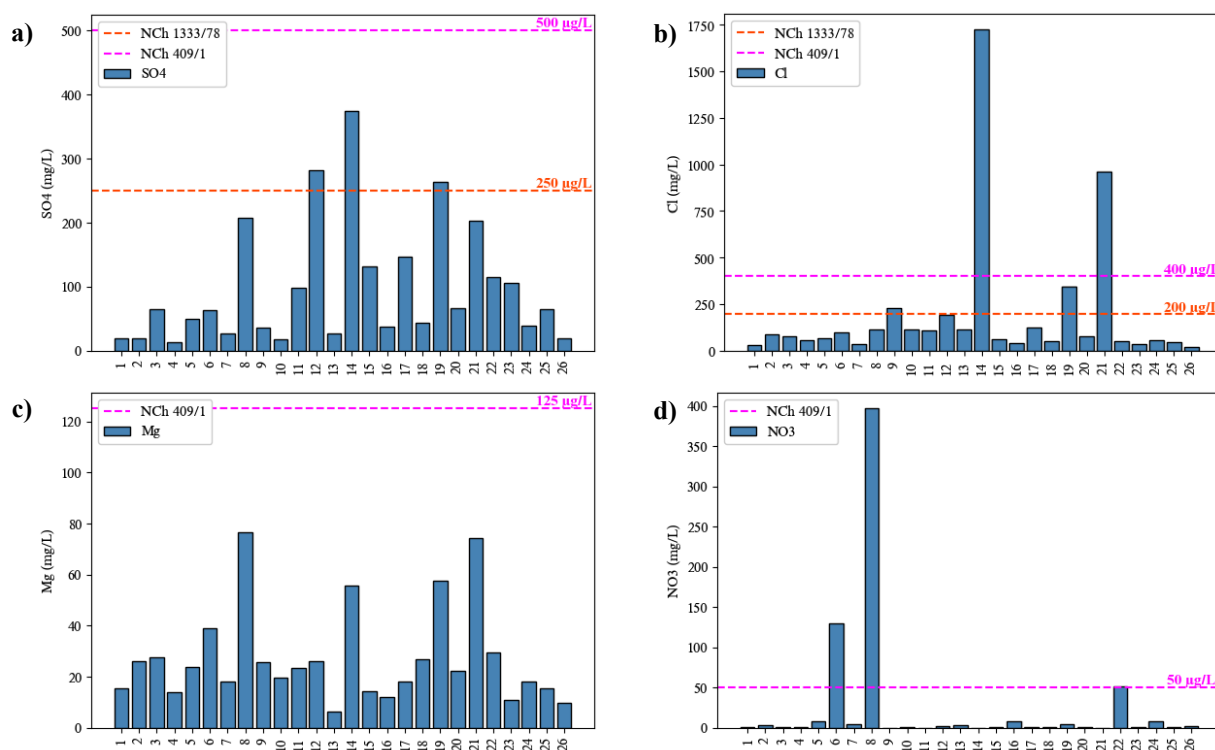


Figura 45: Concentración del sulfato, cloruro, magnesio y nitrato en muestras de pozos, norias y manantial con los límites de la NCh 1333/78 y NCh 409/1

### 4.10.3. Elementos traza

A partir de la Figura 46a se observa que para el Li 2 muestras están sobre el límite permitido por la norma chilena de riego para cítricos siendo las muestras n°14 y 17 las que superan el límite establecido con concentraciones de 127,37  $\mu\text{g/L}$  y 96,95  $\mu\text{g/L}$  correspondientemente.

En el gráfico de la Figura 46b se observa que para el B todas las muestras de pozos, norias y manantial se encuentran por debajo de los límites permitidos por la norma chilena de agua de riego, excepto la muestra n°14 con una concentración de 1005,4  $\mu\text{g/L}$ .

En el gráfico de la Figura 46c se observa que para el V todas las muestras de pozos, norias y manantial se encuentran por debajo de los límites permitidos por la norma chilena de agua potable y la norma chilena de riego, siendo la máxima concentración la muestra n°14 con 35,1  $\mu\text{g/L}$ .

En el gráfico de la Figura 46d se observa que para el Fe todas las muestras de pozos, norias y manantial se encuentran por debajo de los límites permitidos por la norma chilena de agua potable y la norma chilena de riego, excepto la muestra n°14 con una concentración de 1167  $\mu\text{g/L}$ .

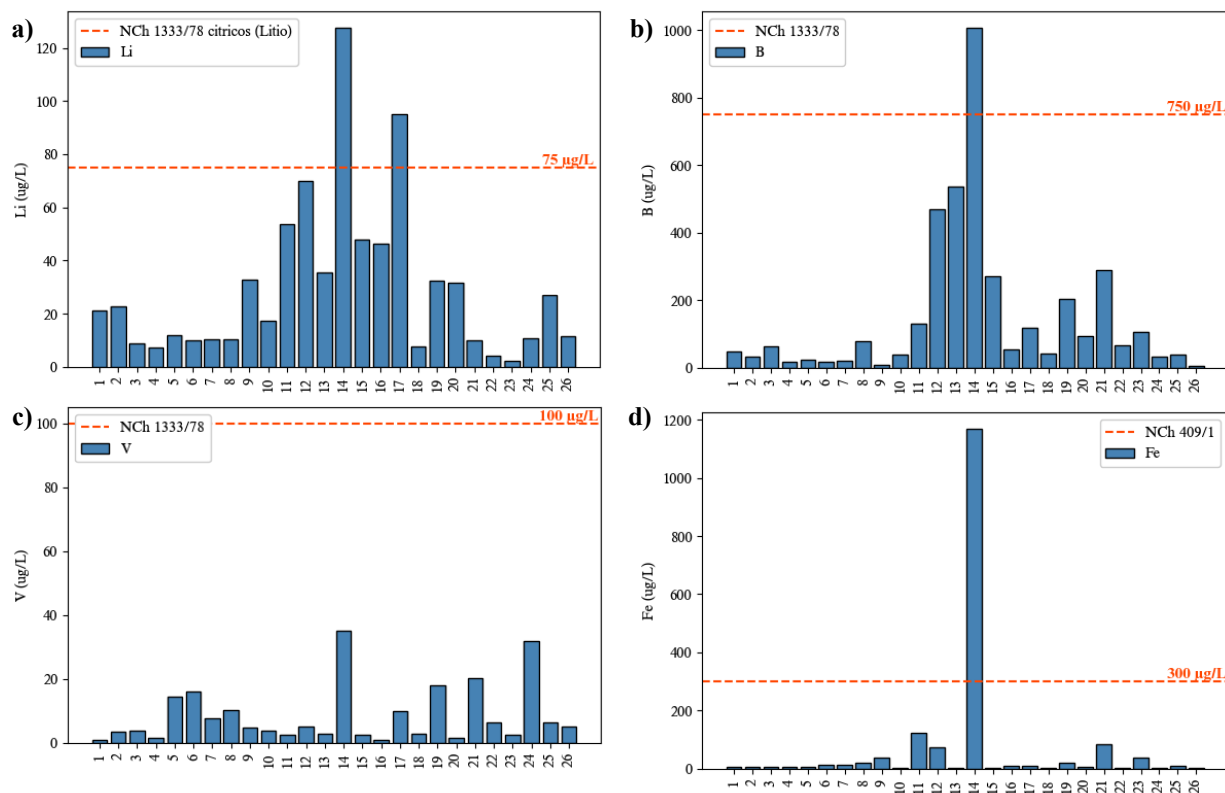


Figura 46. Concentración de litio, boro, vanadio y hierro en muestras de pozos, norias y manantial con el límite de la NCh 1333/78 específicamente para cítricos



En la Figura 47a se observa para el Mn que las muestras n°3, 11, 12, 14, 18, 19, 21 y 23 exceden los límites permitidos por la norma chilena de agua potable con concentraciones de 2110,58 ug/L, 197,15 ug/L, 278,19 ug/L, 369,76 ug/L, 410,85 ug/L, 982,05 ug/L, 422,85 ug/L y 220,73 ug/L correspondientemente. Además, las muestras n°3, 12, 14, 18, 19, 21 y 23 superan los límites establecidos por la norma chilena de riego. Por último, la muestra n°22 se encuentra cercana al límite de la NCh 409/1 con una concentración de 93,39 ug/L.

En el gráfico de la Figura 47b se muestra para el As que todas las muestras de pozos, norias y manantial se encuentran por debajo de los límites permitidos por la norma chilena de agua potable y la norma chilena de riego, siendo las máximas concentraciones las muestras n°17 y 18 con 6,62 ug/L y 6,54 ug/L.

En el gráfico de la Figura 47c para el Se se observa que todas las muestras de pozos, norias y manantial se encuentran por debajo de los límites permitidos por la norma chilena de agua potable y la norma chilena de riego, excepto la muestra n°14 con una concentración de 34,5 ug/L.

En la Figura 47d se observa para el Mo que la muestra n°9, 10, 21 y 25 exceden los límites permitidos por la norma chilena de agua de riego con concentraciones de 14,37 ug/L, 11,75 ug/L, 26,45 ug/L y 21,19 ug/L correspondientemente.

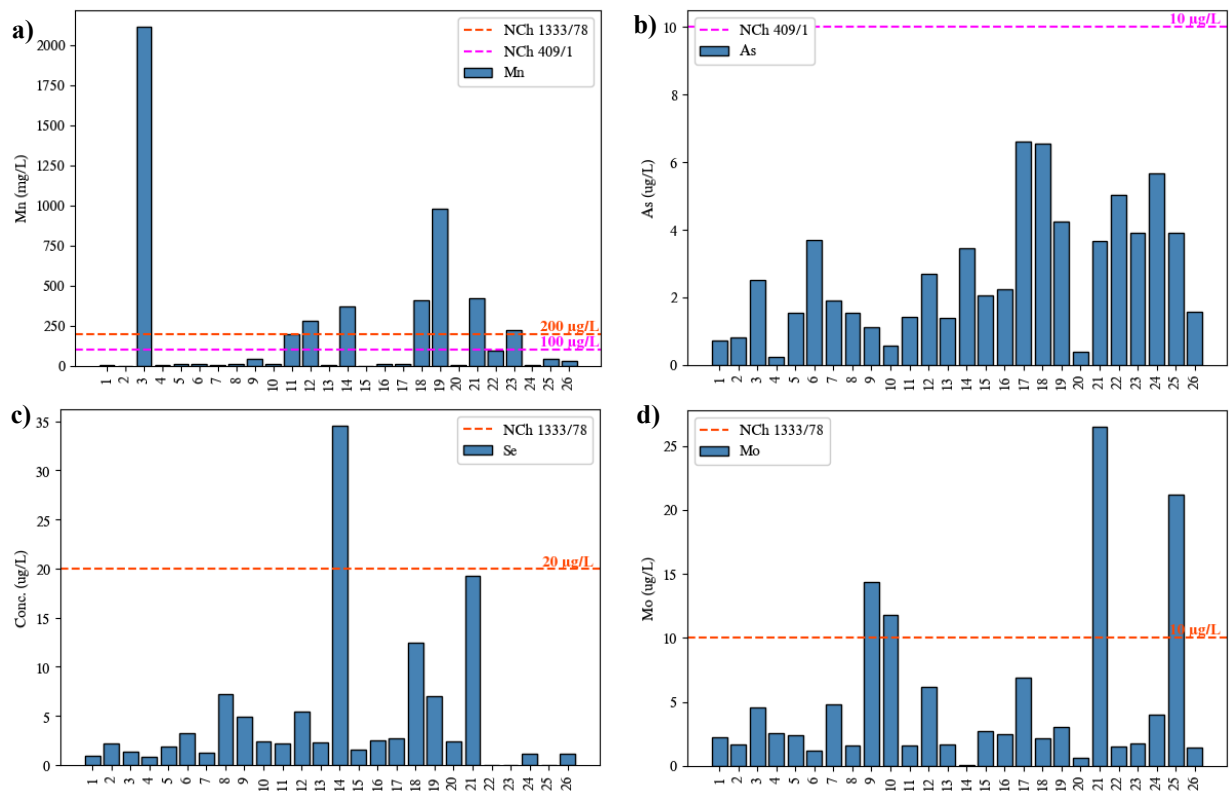


Figura 47. Concentración de manganeso, arsénico, selenio y molibdeno en muestras de pozos, norias y manantial con los límites de la NCh 1333/78 y NCh 409/1

## 4.11. Modelo hidrogeológico conceptual

En la Figura 48 se muestran esquematizadas las distintas interacciones que están presentes en el área de estudio. Se presentan los resultados del análisis factorial y los procesos fisicoquímicos determinados a partir de la composición química, su variación espacial y la correlación con las condiciones del entorno donde se tomaron las muestras.

El F1 ha sido interpretado como la expresión de la influencia marina en las muestras analizadas. Aún no se dispone de suficiente información para separar claramente la interacción directa entre el agua de mar y el agua dulce en ambientes estuarinos, la vaguada costera y la deposición de aerosoles marinos, también conocidos como “spray marino”.

El fenómeno de spray marino se refiere a la acción de las olas, que al romperse expulsan gotas y aerosoles marinos. Estas partículas viajan, caen al suelo y depositan componentes salinos sobre la superficie. Posteriormente, cuando el agua de lluvia se infiltra, diluye estos componentes salinos, percola y recarga los acuíferos, aportando iones de origen marino.

El F2 corresponde a la interacción agua-roca en un ambiente geológico marino en el cual se superponen procesos y mecanismos de transferencia de los iones que finalmente se encuentran disueltos en las muestras analizadas. El agua puede provenir de precipitaciones o de las gotas de niebla marina que pueden concentrar sales marinas, compuestos de sulfato y elementos de origen tanto orgánico como antropogénico. Al depositarse el agua sobre la superficie, esta puede infiltrarse y percolar, interactuando con las rocas carbonatadas y sedimentarias, compuestas en su mayoría por líticas de composición intermedia a félsica (Garcés, 2018). Esta interacción facilita la adición de iones provenientes de la disolución de minerales.

El F3 evidencia el posible rol que tienen las emanaciones de metano o “seeping” en adicionar el  $\text{HCO}_3^-$  a las aguas. La presencia del paleo seep de Navidad avala esta posibilidad. En el esquema se ejemplifica cómo funcionan los cold seep, los cuales, son ecosistemas marinos en los que se libera agua fría enriquecida en compuestos químicos por la acción de la red trófica (quimiosíntesis), donde las bacterias especializadas convierten compuestos inorgánicos en nutrientes. Finalmente la quimiosíntesis genera bicarbonato y sulfuro de hidrógeno mediante metano y sulfato, formando así carbono autógeno. La liberación de metano en forma de hidratos ofrece una fuente constante de energía para las bacterias quimiosintéticas.

Se considera la influencia de la agricultura con concentraciones de 51,21, 129,93 y 396,47 mg/L. de  $\text{NO}_3$  en las muestras de agua extraídas en las zonas que se efectúa dicha actividad.

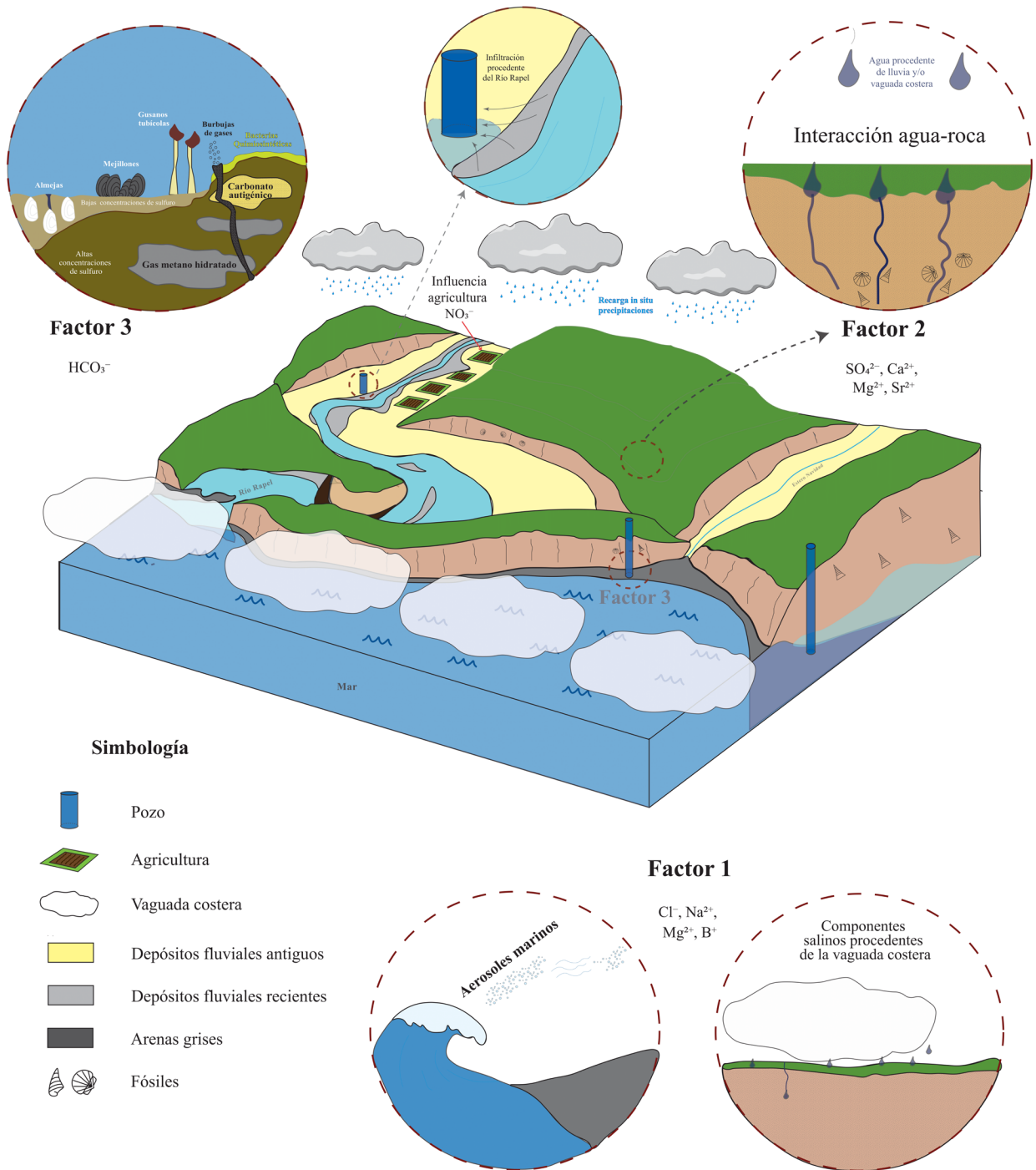


Figura 48: Modelo Hidrogeológico conceptual del sector de estudio. No está a escala

# Capítulo 5

## Conclusiones

En el presente trabajo se ha analizado la influencia de diversos factores en la composición fisicoquímica e isotópica del agua subterránea en el área de Navidad, con el objetivo de obtener una mejor comprensión de los procesos naturales y antrópicos, y del funcionamiento de los acuíferos costeros. La investigación también ha abordado de manera especial la interacción de la vaguada costera con los procesos de recarga en zonas costeras, un aspecto poco explorado en relación con los acuíferos de la región. En esta memoria de Título se han utilizado diferentes herramientas y técnicas para el tratamiento de los datos como el análisis estadístico, espacial y multivariante, que han sido fundamentales para dilucidar los procesos que afectan a las muestras estudiadas.

La composición química de las aguas de la zona de estudio está principalmente influenciada por la interacción con el océano. Ésta incluye tanto la interacción directa de agua de mar y agua dulce en ambientes estuarinos, como también componentes salinos infiltrados y percolados desde la superficie aportados por el spray marino y la vaguada costera. La vaguada tiene la capacidad de transportar elementos a grandes distancias, contribuyendo a la recarga de los acuíferos con la presencia de componentes marinos en el agua subterránea analizada. Asimismo, se reconoce el control litológico que mediante las interacciones entre las rocas y el agua, contribuye a la composición final de las aguas analizadas. Las peculiaridades geológicas de la zona, como es el "seeping" de hidrocarburos, pueden ser determinadas y seguidas a partir de las aguas, ya que las condiciones reductoras y composicionales observadas en pozos cercanos a un paleo seep en Navidad han permitido identificar la influencia de la oxidación anaeróbica del  $\text{CH}_4$  en las aguas estudiadas. Este proceso, junto con la reducción del sulfato que genera sulfuros y precipitación de carbonato autigénico, contribuye a los altos niveles de bicarbonato encontrados que no presentan correlación alguna con el resto de variables analizadas. Dicho proceso que involucra la interacción con  $\text{CH}_4$  y  $\text{H}_2\text{S}$  además, se ve reflejado en la composición isotópica de las muestras, que presentan un aumento en el contenido de  $\delta^2\text{H}$ .

La recarga de los acuíferos en el sector de estudio se produce a través de distintos mecanismos que varían a lo largo del territorio estudiado. La infiltración de agua procedente del río Rapel y los esteros genera una recarga indirecta y focalizada. Por otro lado, existe también una recarga directa y difusa que proviene de las precipitaciones que ocurren. Asimismo el agua de la niebla marina, que se adentra en el continente deposita en el suelo iones que pueden infiltrarse en el suelo y contribuir a la recarga. Este fenómeno es especialmente relevante en zonas donde la formación de la vaguada es recurrente.

Se reconoce que el presente estudio tiene limitaciones, como la recolección de la muestra de la vaguada a través de un único atrapanieblas y el muestreo restringido al mes de verano. Por ello, se recomienda que futuros estudios implementen un monitoreo más extenso que contemple la instalación de atrapanieblas en diversos lugares, incluyendo áreas alejadas de la costa, valles y zonas de mayor altitud. Esto permitiría una mejor comprensión de la variación de sus parámetros fisicoquímicos, y su composición química a lo largo del tiempo y su recorrido. Además, se sugiere

realizar campañas de muestreo que puedan reflejar la variabilidad interanual a lo largo del año hidrológico. Esto permitiría identificar la variación estacional. Asimismo, se espera que futuras investigaciones puedan identificar si el fenómeno de flujos de metano, ya sea fósil o actual, está presente en otras áreas y hasta en zonas más alejadas de la costa que estén dentro de las formaciones geológicas de Navidad, Licancheu, Rapel y La Cueva. Esto permitiría ampliar el conocimiento sobre la extensión y las características de estos procesos en el área de estudio.

## Bibliografía

- Alcayaga, H., Palma, S., Caamaño, D., Mao, L., & Soto-Alvarez, M. (2019). Detecting and quantifying hydromorphology changes in a Chilean river after 50 years of dam operation. *Journal of South American Earth Sciences*, 93, 253-266.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.04.018>
- Appelo, C. A., & Postma, D. (1993). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Balkema.
- Appelo, C., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Balkema.  
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1201/9781439833544>
- BCN. (2017). *bcn.cl*. bcn.cl:  
<https://www.bcn.cl/siit/reportescomunales/comunal.html?unidad=Comunales&anno=2017>
- BCN. (2024). *bcn.cl*. Actualmente los estudios relativos a la dinámica de las aguas subterráneas en los acuíferos costeros de la región son escasos, debido a la ausencia de lugares de monitoreo e instalaciones propicias que entreguen información relevante de manera periódica s
- Benedict, K., Lee, T., & J.L., C. J. (2012). Cloud water composition over the southeastern Pacific Ocean during the VOCALS regional experiment. *Atmospheric Environment*, 104-114.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.10.029>
- Bijay-Singh, & Craswell, E. (2021). Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water:. *SN Applied Sciences*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8>
- Bing, H., Zhou, J., Wu, Y., Sun, H., Xiang, Z., Wang, J., . . . Zhu, H. (2018). Barrier effects of remote high mountain on atmospheric metal transport in the eastern Tibetan Plateau. *Science of The Total Environment*, 687-696.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.035>
- Börgel, R. (1983). Geomorfología. Santiago, Chile: Instituto Geográfico Militar.
- Buatois, L., & Encinas, A. (2006). La icnofacies de Glossifungites en el contacto entre las formaciones Navidad (Miembro Rapel) y La Cueva, Plioceno de la Cordillera de la Costa, Chile: su significado estratigráfico-secuencial. *Ameghiniana*.
- Bundschuh, J., Schneider, J., Ayaz, M., Niazi, N., Herath, I., Parvez, F., . . . Guilherme. (2021). Seven potential sources of arsenic pollution in Latin America and their environmental and health impacts. *Science of The Total Environment*, 780.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146274>
- Burchard, H., M., S. H., & Ralston, D. K. (2018). Sediment trapping in estuaries. *Annual Review of Marine Science*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060535>
- Burton, C. A., Hoefen, T. M., Plumlee, G. S., Baumberger, K. L., Backlin, A. R., Gallegos, E., & Fisher, R. N. (2016). Trace Elements in Stormflow, Ash, and. *PLOS ONE*.  
<https://doi.org/10.1371/journal>
- Cade-Idepe. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del río Rapel*. portal.mma.gob: <http://portal.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Rapel.pdf>
- Campbell, A. K. (1992). Recognition of a Mio-Pliocene Cold Seep Setting from the Northeast Pacific Convergent Margin, Washington, U.S.A. *PALAIOS*.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.2307/3514827>



- Castro Heredia, L. M. (2012). Análisis clúster como técnica de análisis exploratorio de registros múltiples en datos meteorológicos. En *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* (págs. 11-20).
- Clare, P., & Rhodes, W. (1999). *Encyclopedia of Geochemistry*. Kluwer Academic Publishers.
- Claypool, G., Milkov, A., Lee, Y.-J., Torres, M., Borowski, W., & Tomaru, H. (2006). Microbial Methane Generation and Gas Transport in Shallow Sediments of an Accretionary Complex, Southern Hydrate Ridge (ODP Leg 204), Offshore Oregon, USA. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 204. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2973/odp.proc.sr.204.113.2006>
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., & Savard, M. M. (2008). Multivariate statistical analysis. *Journal of Hidrology*, 294-313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.015>
- Collins, J. F., y Buol, S. W. (1970). PATTERNS OF IRON AND MANGANESE PRECIPITATION UNDER SPECIFIED Eh-pH CONDITIONS. *Williams & Wilkins*, 110, 157-162.
- Contardo-Berrios, X., Mena-Hodges, E., & Quiroga, E. (2017). Finding of the first fossil seep in the emerged coast of Central Chile (33°56' S). Characterization and implications. *Andean Geology*, 44. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV44n2-a05>
- Cruzat Gallardo, A. (2004). El uso de las nieblas en la recuperación del Parque Nacional Bosque Fray Jorge. En J. G. F.A. Squeo, *Historia Natural del Parque Nacional Bosque Fray Jorge* (págs. 281-292).
- Daniele, L., Tardani, D., Schmidlin, D., Quiroga, I., Cannatelli, C., & Somma, R. (2022). Seawater intrusion and hydrogeochemical processes in the Ischia Island groundwater system. *Journal of Geochemical Exploration*, 234. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2021.106935>
- Daniele, L., Taucare, M., Viguir, B., & Arancibia, G. (2020). Exploring the shallow geothermal resources in the Chilean Southern Volcanic Zone: Insight from the Lliquiñe thermal springs. *Journa of Geochemical Exploration*, 218. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2020.106611>
- Daniele, L., Vallejos, A., Corbella, M., & Sánchez, L. &. (2013). Hydrogeochemistry and geochemical simulations to assess water–rock interactions in complex carbonate aquifers: The case of Aguadulce (SE Spain). *Applied Geochemistry*, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.11.011>
- Darling, W., & Gooddy., D. (2006). The hydrogeochemistry of methane: Evidence from English groundwaters. *Chemical Geology*, 229. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.11.003>
- de Montety, V., Radakovitch, O., Vallet-coulomb, C., Blavoux, B., Hermitte, D., & Valles, V. (2008). Origin of groundwater salinity and hydrogeochemical processes in a confined coastal aquifer: Case of the Rhone delta (Southern France). *Applied Geochemistry*, 2337-2349. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.03.011>
- del Río, C., Lobos-Roco, F., Latorre, C., Koch, M. A., García, J.-L., Osses, P., . . . Siegmund, A. (2021). Spatial distribution and interannual variability of coastal fog and low clouds cover in the hyperarid Atacama Desert and implications for past and present Tillandsia

- landbeckii ecosystems. *Plant Systematics and Evolution*, 307.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s00606-021-01782-z>
- DGA. (2004). *INFORME DE GESTIÓN 2004*. Mnisterio de Obras Públicas.
- DGA. (2024). *dga.mop.gob*. dga.mop.gob: <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx>
- DGA. (2024). *dga.mop.gob.cl*. <https://dga.mop.gob.cl/Paginas/default.aspx>
- Dirección meteorológica de Chile. (2024). *meteochile.gob*. meteochile.gob:  
<https://www.meteochile.gob.cl/PortalDMC-web/index.xhtml>
- Encinas, A. (2006). New stratigrafic scheme for the Mio-Pliocene marine deposits of the Navidad area (33°00'-34°30'S), central Chile. *Revista Geológica de Chile*, 221-246.
- Enel. (2020). *enel.cl*. enel.cl: <https://www.enel.cl/es/sostenibilidad/creacion-valor-compartido/centrales-enel-y-proyectos-comunidades/central-rape.html>
- Farías, M. (2010). Crustal-scale structural architecture in central Chile based on seismicity and surface geology: Implications for Andean mountain building. *Tectonics*.
- Farnham, I. M., Singh, A. K., Stetzenbach, K. J., & Johannesson, K. H. (2022). *Treatment of non-detects in multivariate analysis of groundwater geochemistry data*. elsevier:  
[www.elsevier.com/lo](http://www.elsevier.com/lo)
- Faye Isley, C., & Taylor, M. (2020). Atmospheric remobilization of natural and anthropogenic contaminants during wildfires. *Environmental Pollution*, 267.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115400>
- Filzmoser, P. H. (2009). Univariate statistical analysis of environmental (compositional) data: Problems and possibilities. *Science of the Total Environment*(6100-6108).  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.08.008>
- Fseha, Y. H., Sizirici, B., y Yildiz, I. (2022). Manganese and nitrate removal from groundwater using date palm biochar: Application for drinking water. *Enviromental Advances*, 8.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100237>
- Garcés, A. (Diciembre de 2018). *Significado paleoambiental de las concreciones presentes en formaciones marinas costeras de Chile central (30 – 34° s)*.
- Geyer, W. R., & MacCready, P. (2014). The estuarine circulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141302>
- Goldberg, D. (1971). INCREASING THE AGRICULTURAL USE OF SALINE WATER BY MEANS OF TRICKLE IRRIGATION. *Journal of the American Water Resources Association*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1971.tb04990.x>
- Gomis-Yagües, V. Boluda-Botella, N., & Ruiz-Bevia, F. (2000). Gypsum precipitation/dissolution as an explanation of the decrease of sulphate concentration during seawater intrusion. *Journal of Hydrology*, 48-55. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00207-3](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00207-3)
- Gregg, J., Bish, D., Kaczmarek, S., & Machel, H. (2015). Mineralogy, nucleation and growth of dolomite in the laboratory and sedimentary enviroment: A review. *Sedimentology*.  
<https://doi.org/10.1111/sed.12202>
- Guggenmos, M. R., Daughney, C. J., Jackson, B. M., & Morgenstern, U. (2011). Regional-scale identification of groundwater-surface water interaction using hydrochemistry and multivariate statistical methods, Wairarapa Valley, New Zealand. *Hydrology and Earth System Sciences*, 3383–3398. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-15-3383-2011>, 2011

- Güler, C., Thyne, G. D., McCray, J. E., & Turner, A. K. (2002). Evaluation of graphical and mul. *Hydrogeology Journal*, 455-474. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10040-002-0196-6>
- Gutiérrez, N. (2011). Diversidad y cambios florísticos durante el Mioceno en Chile Central. Santiago: Facultad de Ciencias Universidad de Chile.
- Gutiérrez, N., Hinojosa, L., Le Roux, J., & Pedroza, V. (2013). Evidence for an Early-Middle Miocene age of the Navidad Formation. *Andean Geology*, 66-78. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5027/andgeoV40n1-a03>
- He, L., Wang, S., Liu, M., Chen, Z., Xu, J., & Dong, Y. (2023). Transport and transformation of atmospheric metals in ecosystems: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100218>
- Hem, J. D. (1972). Chemical Factors That Influence the Availability of Iron and Manganese in Aqueous Systems. *Geological Society of America Bulletin*, 83, 443-450. <https://doi.org/https://doi.org/10.1130/SPE140-p17>
- Herm, D. (1969). Marines Pliozän und Pleistozän in Nord- und Mittel-Chile unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung der Mollusken-Faunen. *Zitteliana*.
- Hůnová, I., Brabec, M., JanGeletič, Malý, M., & Dumitrescue, A. (2021). Local fresh- and sea-water effects on fog occurrence. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150799>
- IAEA/WMO. (2019). *Global network of isotopes in precipitation*. <http://nucleus.iaea.org/wiser>
- Isil, S., Collet, J., Lynch, J., Weis-Penzias, P., & M. Rogers, C. (2022). Cloud and fog deposition: Monitoring in high elevation and coastal . *Atmospheric Environment* . <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.118997>
- J.P. Lacassie, J. R.-D.-S. (2021). Integrated mineralogical and geochemical study of the Rapel fluvial system, central Chile: An application of multidimensional analysis to river sedimentation. *Journal of South American Earth Sciences*, 109. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103289>
- Jay, D. A. (1991). Green's law revisited: Tidal long wave propagation in channels with strong topography. *Journal of Geophysical Research*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/91JC01633>
- Klaucke, I., Weinrebe, W., Linke, P., Klaschen, D., & Bialas, J. (2012). Sidescan sonar imagery of widespread fossil and active cold seeps along the central Chilean continental margin. *Geo-Marine Letters*, 489-499. <https://doi.org/10.1007/s00367-012-0283-1>
- Koračin, D., Dorman, C., Lewis, J., Hudson, J., Wilcox, E., & Torregrosa, A. (2014). Marine fog: A review. *Atmospheric Research*, 142-175. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.12.012>
- La Tercera. (1 de Febrero de 2024). *latercera.com*. latercera.com: <https://www.latercera.com/nacional/noticia/incendio-forestal-en-navidad-deja-27-casas-destruidas-y-36-damnificados/VUDKH5Q7KNDGPINXLGB27HGHCY/>
- Lavenu, A., & Encinas, A. (2005). Brittle deformation of the Neogene deposits of the Navidad Basin (Coastal Cordillera, 34°S, central Chile). *Revista Geológica de Chile*, 229-248.
- Lu, L., Li, L., Rathod, S., Hess, P., Martínez, C., Fernandez, N., . . . Chellam, S. (2023). Characterizing the Atmospheric Mn Cycle and Its Impact on terrestrial Biogeochemistry.

- Advancing Earth and Space Sciences*, 38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2023GB007967>
- McMahon, P. B., Belitz, K., E. Reddy, J., & D. Johnson, T. (2019). Elevated Manganese Concentrations in United States Groundwater, Role of Land Surface–Soil–Aquifer Connections. *Environmental Science & Technology*, 29-38. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04055>
- Meng, S., & Maynard, J. (2001). Use of Statistical Analysis to Formulate Conceptual Models of Geochemical Behavior: Water Chemical Data from the Botucatu Aquifer in Sao Paulo state, Brazil. *Journal of Hydrology*, 78-97. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00423-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00423-1)
- Moeck, C., Radny, D., Borer, P., Rothardt, J., Auckenthaler, A., Berg, M., & Schirmer, M. (2016). Multicomponent statistical analysis to identify flow and transport. *Journal of Hydrology*, 437-449. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.023>
- Morell, I., Pulido-Bosch, A., Daniele, L., & Cruz, J. (2008). Chemical and isotopic assessment in volcanic thermal waters: cases of Ischia (Italy) and São Miguel (Azores, Portugal). *Hydrological Processes*, 4386-4399.
- Moreno, T. &, Lavín, J., Alastuey, A., Viana, M., & Gibbons, W. (2011). Manganese in the urban atmosphere: Identifying anomalous concentrations and sources. *Moreno, Teresa & Pandolfi, Marco & Querol, Xavier & Lavín, Javier & Alastuey, Andres & Viana, Mar & Gibbons, Wes. (2011)*. <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0353-8>
- Muñoz, P., Lissette Cárdenas, J., Garbe-Schönberg, D., Sellanes, J., Dezileau, L., & Ives Melville, S. D. (2016). Geochemical characterization of two distinctive systems with evidence of chemosynthetic activity, explored at the SE Pacific margin off Chile (46°S and 33°S). *Progress in Oceanography*, 26-43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pocean.2016.09.002>
- Nyman, S., Nelson, C., & Campbell, K. (2010). Miocene tubular concretions in East Coast Basin, New Zealand: Analogue for the subsurface plumbing of cold seeps. *Marine Geology*, 319-336. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2009.03.021>
- Odigie, K., Khanis, E., Hibdon, S., Jana Pinninghoff, P., Araneda, A., & Urrutia. (2015). Remobilization of trace elements by forest fire in Patagonia, Chile. *Regional Environmental Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0825-y>
- OIM. (21 de Febrero de 2024). *iom.int*. [iom.int: https://chile.iom.int/es/ultimas-informaciones-emergencia-incendios-2024](https://chile.iom.int/es/ultimas-informaciones-emergencia-incendios-2024)
- O'Shea, B., y Jankowski, J. (2006). Detecting subtle hydrochemical anomalies with multivariate statistics: an example from 'homogeneous' groundwaters in the Great Artesian Basin, Australia. *Hydrological Processes*, 20, 4317-4333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.6177>
- Panda, S., Sundaray, P., Rath, Nayak, B., & Bhatta, D. (2006). Ication of factor and cluster analysis for characterization of river and estuarine water systems—a case study: Mahanadi River (India). *Journal Hydrology*, 434-445. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.05.029>
- Pugh, D., & Woodworth, P. (2014). *Sea-level science: Understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge.

- Quiroga, E., & Levin, L. (2010). Eunice pennata (polychaeta: eunicidae) from active and passive cold seep sites in central and southern Chile (36°-46°S). *Anales del Instituto de la Patagonia*, 31-37.
- Rahman, A., Mondal, N., & Tiwari, K. (2021). Anthropogenic nitrate in groundwater and its health risks in the view of background concentration in a semi arid area of Rajasthan, India. *Nature*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-021-88600-1>
- Salvador, M., & Gargallo, P. (2003). <https://ciberconta.unizar.es>. <https://ciberconta.unizar.es/LECCION/aed/inicio.html>
- Sarricolea, P., Herrera, M., & Meseguer-Ruiz, O. (2017). Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*, 66-73. <https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592>
- SEIA. (8 de Junio de 2018). [seia.sea.gob.cl](http://seia.sea.gob.cl). [seia.sea.gob.cl: https://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?modo=normal&id\\_expediente=2128952424](http://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?modo=normal&id_expediente=2128952424)
- Sellanes, J., Quiroga, E., & Gallardo, V. (2004). First direct evidence of methane seepage and associated chemosynthetic communities in the bathyal zone off Chile. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 1065-1066. <https://doi.org/10.1017/S0025315404010422h>
- Sellanes, J., Quiroga, E., & Neira, C. (2008). Megafauna community structure and trophic relationships at the recently discovered Concepción Methane Seep Area, Chile, ~36°S. *ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil*, 431-439. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2011.10.016>
- Sellanes, J., Quiroga, E., & Quiñones, R. (2007). Shelf and slope reducing settings associated to methane seepage off the Chilean margin. *Newsletter Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur-Oriental*, 1-2.
- SERNAGEOMIN. (1996). Mapa geológico del Área de San Antonio-Melipilla.
- SERNAGEOMIN. (2003). Mapa geológico de Chile.
- SII. (2024). [sii.cl](http://sii.cl). [sii.cl: https://homer.sii.cl](https://homer.sii.cl)
- Sitrural. (Diciembre de 2021). Recursos naturales comuna de Navidad. Chile.
- Sivan. (2005). Geochemical evolution and timescale of seawater intrusion into the coastal aquifer of Israel. *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
- Smedley, P., & Kinniburgh, D. (2017). Molybdenum in Natural Waters: A Review of Occurrence, Distributions and Controls. *Applied Geochemistry*, 387-432. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.05.008>
- SNU Chile. (2021). *Escasez hídrica en Chile: Desafíos pendientes*.
- Solminihaq, E. (2003). Sewell, historia y cultura en un asentamiento humano organizacional. *Revista de Urbanismo*.
- Soto-Rivas, K., Flores, R., Williams, M., & Escauriaza, C. (2024). The Maipo River Estuary, Central Chile. *Journal of Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/jmse12071162>
- Sposito, G. (2008). *The Chemistry of soils*. OXFORD.
- SRMA. (2020). *Plan regional de recursos hídricos*.
- Stiff, H. (1951). Interpretation of Chemical Water Analysis by Means of Pattern. *Journal of Petroleum Technology*, 15-17. <https://doi.org/https://doi.org/10.2118/951376-G>

- Sträter, E. (2010). Pollution in coastal fog at Alto Patache, Northern Chile. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0343-x>
- Tang, Y., Meng, Q., & Ren, P. (2023). Spatial distribution and concentrations of salt fogs in a coastal urban environment: A case study in Zhuhai city. *Building and Environment*, 234. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110156>
- 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*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137824>
- Tavera, J. (1979). Estratigrafía y paleontología de la Formación Navidad, Provincia de Colchagua, Chile (Lat. 30° 50' - 34° S). *Estratigrafía y paleontología de la Formación Navidad, Provincia de Colchagua, Chile (Lat. 30° 50' - 34° S)*. Chile: Boletín Museo de Historia Natural de Chile.
- Thomas, H. (1958). Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de la Ligua y la Cuesta de Barriga. *Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de la Ligua y la Cuesta de Barriga*, 86. Valparaíso, Chile: Instituto de Investigaciones Geológicas.
- Uribe, H. (2016). HIDROLOGÍA DEL SECANO. En I. d. Agropecuarias, *Caracterización hidroclimatológica y del uso de suelo del secano de la Región de O'Higgins* (págs. 83-103). Instituto de Invetigaciones Agropecuarias.
- Valentine, D. (2002). Biogeochemistry and microbial ecology of methane oxidation in anoxic environments: a review. . *Antonie Van Leeuwenhoek*(271-282). <https://doi.org/10.1023/a:1020587206351>
- Ward, J. H. (1963). Hierarchical Grouping to Optimize an Objective Function. *Journal of the American Statistical Association* , 236-244. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01621459.1963.10500845>
- Yañez, G., Ranero, C., Huene, R. v., & Díaz, J. (2001). agnetic anomaly interpretation across the southern central Andes (32°-34°S): The role of the Juan Fernandez Ridge in the late Tertiary evolution of the margin. *Journal of Geophysical Research*, 6325-6435.
- Zhang, Z., Changlai, X., Yang, W., Adeyeye, O., & Liang, X. (2020). Source and Mobilization Mechanism of Iron, Manganese and Arsenic in Groundwater of Shuangliao City, Northeast China. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12020534>



# Anexos

## Anexo A

A.1. Validación de los análisis químicos. Las cotas fueron establecidas mediante datos de GPS.

Tabla 5. Balance iónico de las muestras de agua superficial y subterránea

Código	Id	Cota	mE	mN	Fuente	Balance iónico
MS-01	1	97	238812	6239493	Pozo	0,09
MS-02	2	30	240227	6241557	Noria	1,09
MS-03	3	42	242803	6239851	Pozo	0,69
MS-04	4	123	243419	6240854	Pozo	2,16
MS-05	5	9	244131	6241198	Noria	0,23
MS-06	6	11	245756	6240308	Pozo	2,68
MS-07	7	21	245557	6240466	Pozo	0,08
MS-08	8	26	241980	6240402	Noria	0,39
MS-09	9	194	233510	6231867	Pozo	1,04
MS-10	10	211	233358	6232189	Pozo	2,18
MS-11	11	34	234782	6235627	Pozo	0,73
MS-12	12	35	235550	6235354	Pozo	0,10
MS-13	13	161	234788	6236519	Pozo	1,71
MS-14	14	50	234667	6238432	Pozo	0,22
MS-15	15	61	236624	6233439	Pozo	1,31
MS-16	16	49	236318	6234097	Pozo	1,04
MS-17	17	118	236955	6233977	Pozo	2,58
MS-18	18	39	240083	6236663	Noria	1,96
MS-19	19	26	235752	6236083	Noria	0,10
MS-20	20	57	238308	6237725	Pozo	0,75
MS-21	21	9	237275	6242577	Noria	0,00
MS-22	22	24	247004	6240779	Pozo	2,91
MS-23	23	17	247319	6240701	Pozo	1,87
MS-24	24	28	244119	6241246	Pozo	0,48
MS-25	25	46	244129	6240794	Manantial	0,85
MS-26	26	316	239277	6228468	Pozo	0,26
MS-27	27	81	240192	6233437	Estero	0,51
MS-28	28	27	247256	6241093	Río	0,82
MS-29	29	14	239231	6242376	Humedal	0,58
MS-30	30	4	233642	6235510	Humedal	1,95
MS-31	31	2	236480	6241311	Mar	5,07
MS-32	32	60	236764	6242449	Vaguada	5,08

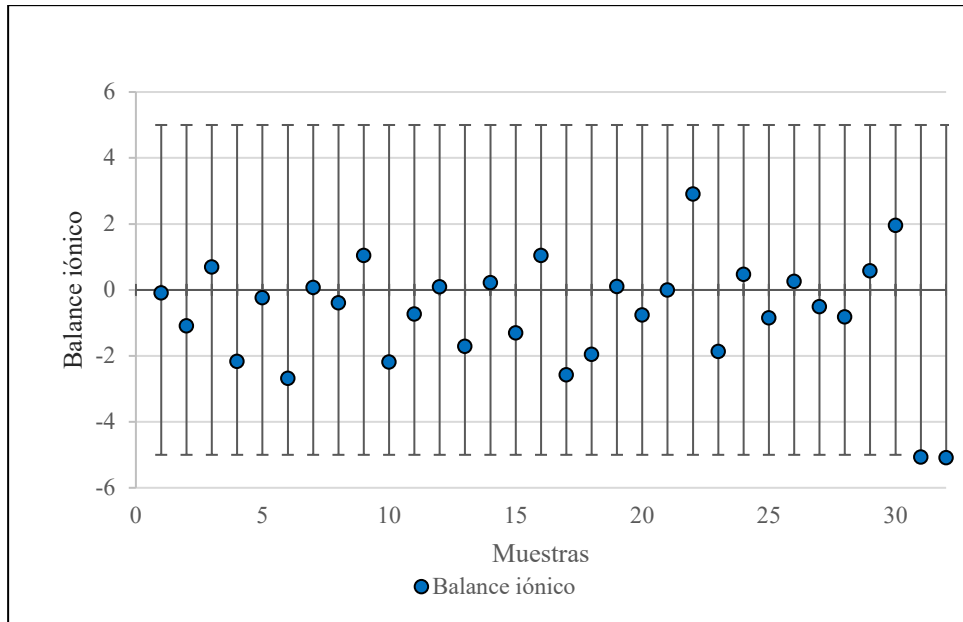


Figura 49: Gráfico de balance iónico con barras de error al 5%

## Anexo B

### B.1. Análisis químico de laboratorio

Tabla 6. Resultados análisis químico para aniones en [mg/L]

<b>código</b>	<b>id</b>	<b>Cl</b>	<b>SO4</b>	<b>HCO3</b>	<b>NO3</b>
MS-01	1	31,51	19,31	305	1,23
MS-02	2	85,97	18,96	395	3,59
MS-03	3	74,94	65,26	432	0,5
MS-04	4	55,67	13,69	169	0,71
MS-05	5	69,11	49,6	319	8,29
MS-06	6	97,18	64,09	304	129,93
MS-07	7	34,6	26,3	227	4,83
MS-08	8	113,33	208,26	392	396,47
MS-09	9	227,76	35,41	142	< 0,10
MS-10	10	114,94	17,17	208	0,75
MS-11	11	108,8	98,5	298	< 0,10
MS-12	12	194,2	281,45	353	1,68
MS-13	13	112,62	27,69	416	3
MS-14	14	1722,39	374,89	394	< 0,10
MS-15	15	62,06	132,18	285	0,44
MS-16	16	42,72	37,68	196	8,6
MS-17	17	123,69	147,36	295	0,68
MS-18	18	52,88	43,44	387	1,53
MS-19	19	346,54	263,75	363	4,22
MS-20	20	76,36	66,44	349	1,33
MS-21	21	962,74	202,44	445	< 0,10
MS-22	22	49,35	115,6	178	51,21
MS-23	23	34,38	105,39	123	0,91
MS-24	24	57,35	38,53	299	7,82
MS-25	25	47,95	65,43	317	1,5
MS-26	26	21,61	19,15	159	2,41
MS-27	27	37,57	229,92	371	0,4
MS-28	28	19,52	88,15	73	2,85
MS-29	29	86,32	5,4	401	0,35
MS-30	30	1937,67	423,83	234	< 0,10
MS-31	31	19725,7	2370,17	131	< 0,10
MS-32	32	17587,32	2203,96	209	< 2,50

Tabla 7. Resultados análisis químico para cationes y SiO<sub>2</sub> en [mg/L]

<b>código</b>	<b>id</b>	<b>Na</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>
MS-01	1	70,75	8,59	33,56	15,6	24,03
MS-02	2	77,5	6,04	68,15	26,1	33,99
MS-03	3	118	3,5	58,42	27,55	27,85
MS-04	4	55,5	2,21	15,82	14,08	17,35
MS-05	5	76	1,55	57,02	23,85	43,39
MS-06	6	61,5	3,45	91,74	39	50,13
MS-07	7	49	2,59	30,68	18,32	35
MS-08	8	88,5	4,43	198,2	76,45	37,83
MS-09	9	117,25	7,23	45,42	25,6	31,16
MS-10	10	74	5,69	34,02	19,75	19,45
MS-11	11	97,5	15,55	64,37	23,4	43,73
MS-12	12	219	21,92	94,94	25,95	40,45
MS-13	13	197	10,46	13,68	6,52	29,52
MS-14	14	1050	34,22	231	55,9	46,59
MS-15	15	108,5	6,71	55,45	14,45	51,86
MS-16	16	38,6	6,83	48,6	12,18	42,39
MS-17	17	65,25	12,24	122,8	17,98	38,79
MS-18	18	51	8,23	74,06	26,8	32,67
MS-19	19	188	5,22	160,5	57,5	52,12
MS-20	20	96,5	5,86	57,84	22,45	31,83
MS-21	21	560	11,65	154,3	74,5	27,03
MS-22	22	31	3,9	63,98	29,64	51,27
MS-23	23	19,5	3,66	61,66	10,98	26,73
MS-24	24	87,5	2,38	40,19	18,2	37,9
MS-25	25	103	4,05	37,98	15,44	33,75
MS-26	26	29,6	3,59	28,79	9,8	57,11
MS-27	27	123	7,11	68,89	33,75	27,03
MS-28	28	11,9	2,87	48,5	5,67	10,87
MS-29	29	91	21,59	38,23	33,5	7,85
MS-30	30	1200	57	88,07	146	4,2
MS-31	31	9650	404,73	371,38	1202	0,46
MS-32	32	8650	362,68	379,5	1064,5	3,12

Tabla 8 Resultados análisis químico elementos traza parte 1 en [µg/L]

<b>código</b>	<b>id</b>	<b>Li</b>	<b>B</b>	<b>V</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>
MS-01	1	21,35	48,36	0,8	7	3,54
MS-02	2	22,55	32,75	3,5	5	1,14
MS-03	3	9	62,14	3,8	5	2110,58
MS-04	4	7,33	16,62	1,5	6	3,9
MS-05	5	12,09	25,07	14,6	8	12,5
MS-06	6	9,86	18,22	15,9	12	10,62
MS-07	7	10,34	21,7	7,6	14	2,45
MS-08	8	10,38	78,7	10,3	21	14,39
MS-09	9	32,8	9,5	4,7	39	43,63
MS-10	10	17,19	37,83	3,7	< 6	14,22
MS-11	11	53,65	129,57	2,4	124	197,15
MS-12	12	69,8	468,32	5,1	73	278,19
MS-13	13	35,67	536,32	2,8	< 6	6,22
MS-14	14	127,37	1005,4	35,1	1167	369,76
MS-15	15	47,78	270,14	2,5	< 3	1,05
MS-16	16	46,4	53,74	0,8	9	14,53
MS-17	17	94,95	118,99	9,9	11	8,62
MS-18	18	7,75	42,56	2,7	4	410,85
MS-19	19	32,33	203,04	17,9	20	982,05
MS-20	20	31,61	93,19	1,7	7	4,08
MS-21	21	10,11	290,4	20,3	86	422,85
MS-22	22	4,28	67,6	6,3	< 3	93,39
MS-23	23	2,28	106,34	2,4	39	220,73
MS-24	24	10,76	34,25	31,9	4	4,56
MS-25	25	26,91	38,84	6,5	9	43,18
MS-26	26	11,66	5,68	5	< 3	30,54
MS-27	27	25,25	140,93	3,8	19	49,61
MS-28	28	11,77	106,59	2,2	19	3,99
MS-29	29	0,94	77,96	8,7	52	112,38
MS-30	30	41,58	801,52	41,2	< 60	13,51
MS-31	31	154,44	4770,21	360,1	< 600	< 2,00
MS-32	32	117,05	885,59	152,2	126	1026,86

Tabla 9. Resultados análisis químico elementos traza parte 2 en [µg/L]

<b>código</b>	<b>id</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>	<b>Sr</b>	<b>Mo</b>
MS-01	1	0,72	0,9	67,28	2,24
MS-02	2	0,82	2,2	160,31	1,64
MS-03	3	2,5	1,3	169,46	4,59
MS-04	4	0,23	0,8	33,06	2,53
MS-05	5	1,54	1,9	94,74	2,42
MS-06	6	3,69	3,2	243,8	1,16
MS-07	7	1,91	1,2	61,36	4,77
MS-08	8	1,53	7,2	677,85	1,56
MS-09	9	1,11	4,9	180,78	14,37
MS-10	10	0,58	2,4	122,66	11,75
MS-11	11	1,43	2,2	143,6	1,58
MS-12	12	2,69	5,4	546,68	6,16
MS-13	13	1,39	2,3	29,27	1,63
MS-14	14	3,45	34,5	741,99	< 0,20
MS-15	15	2,07	1,5	172,24	2,69
MS-16	16	2,25	2,5	183,72	2,49
MS-17	17	6,62	2,7	322	6,87
MS-18	18	6,54	12,4	207,36	2,17
MS-19	19	4,25	7	551,85	3,02
MS-20	20	0,4	2,4	141,87	0,61
MS-21	21	3,66	19,3	846	26,45
MS-22	22	5,02	< 0,3	246,64	1,53
MS-23	23	3,91	< 0,3	254,22	1,73
MS-24	24	5,66	1,1	94,48	4,03
MS-25	25	3,91	< 0,3	60,95	21,19
MS-26	26	1,57	1,1	55,28	1,41
MS-27	27	2,23	< 0,3	236,37	1,6
MS-28	28	13,8	< 0,3	244,48	9,22
MS-29	29	9,12	3,1	275,69	0,66
MS-30	30	6,17	40	818,56	3,33
MS-31	31	30,83	373,6	6786,15	< 2,00
MS-32	32	43,19	175,8	6543,83	6,69



## Anexo C

C.1. Resultados isótopos estables de agua. Los campos vacíos corresponden a información no disponible.

Tabla 10. Resultados isótopos estables de agua

código	id	tipo	Cota	Profundidad reportada (m)	Piezometria	d <sup>18</sup> O VSMOW	dD VSMOW
MS-01	1	subterránea	97	70		-5,390	-31,683
MS-02	2	subterránea	30		3	-5,541	-33,128
MS-03	3	subterránea	42	38		-6,905	-33,424
MS-04	4	subterránea	123			-4,387	-29,631
MS-05	5	subterránea	9		3	-5,715	-33,007
MS-06	6	subterránea	11	20		-6,175	-36,804
MS-07	7	subterránea	21	19	6,2	-5,781	-33,580
MS-08	8	subterránea	26		3,3	-6,254	-38,235
MS-09	9	subterránea	194			-5,434	-32,507
MS-10	10	subterránea	211	100		-5,633	-32,403
MS-11	11	subterránea	34	45		-5,791	-34,145
MS-12	12	subterránea	35			-5,627	-31,207
MS-13	13	subterránea	161	110		-6,579	-34,422
MS-14	14	subterránea	50	76	43,59	-5,449	-30,785
MS-15	15	subterránea	61	42		-4,659	-30,993
MS-16	16	subterránea	49	48		-5,227	-31,597
MS-17	17	subterránea	118	90		-4,660	-30,600
MS-18	18	subterránea	39	7		-5,306	-32,226
MS-19	19	subterránea	26		2,8	-6,348	-32,373
MS-20	20	subterránea	57	9		-5,472	-30,923
MS-21	21	subterránea	9		2,16	-7,687	-51,703
MS-22	22	subterránea	24	21	9,64	-8,905	-61,696
MS-23	23	subterránea	17	55	8,33	-10,222	-72,822
MS-24	24	subterránea	28			-5,286	-32,485
MS-25	25	subterránea	46			-4,831	-26,769
MS-26	26	subterránea	316				
MS-27	27	superficial	81	no aplica	no aplica	-5,088	-26,658
MS-28	28	superficial	27	no aplica	no aplica	-12,264	-89,439
MS-29	29	superficial	14	no aplica	no aplica	4,649	19,416
MS-30	30	superficial	4	no aplica	no aplica	-0,052	-6,139
MS-31	31	mar	2	no aplica	no aplica	-0,639	-5,888
MS-32	32	vaguada	60	no aplica	no aplica	-1,762	-11,608
MS-33	33	vaguada	60	no aplica	no aplica	-3,136	-20,935

## Anexo D

Tabla 11. Resultados isótopos estables de agua de precipitaciones en Valparaíso (IAEA/WMO, 2019)

Station	Cota	Years	Total Pp	Wm $\delta^{18}O$	Wm $\delta^2H$	d-excess
Valparaiso (74 masl)	74	1988	65	-7,15	-59,8	-2,6
Valparaiso	74	1989	171	-6,35	-31,2	19,6
Valparaiso	74	1990	191	-4,36	-27,1	7,8
Valparaiso	74	1991	470	-5,64	-34,6	10,5

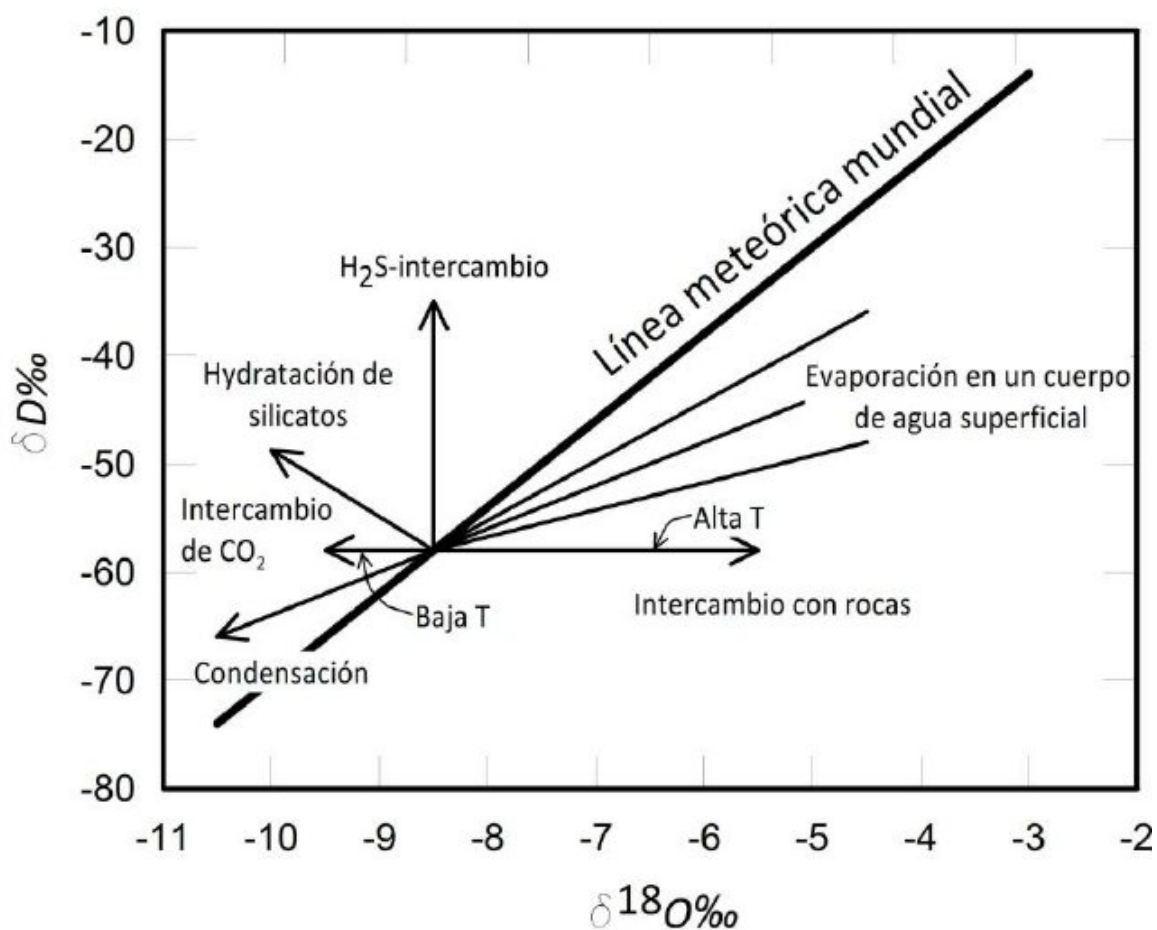


Figura 50: Línea Meteorológica mundial comparada con los cambios de la composición isotópica del agua producida por diferentes procesos. Extraída de Lorenzo (2012) y modificada de Domenico y Schwartz (1998)

## Anexo E

Tabla 12 Parámetros fisicoquímicos

Código	mE	mN	Cota	CE	T	pH	Eh	Fuente
MS-01	238812	6239493	97	600	20,3	7,6	162,1	Pozo
MS-02	240227	6241557	30	878	17,8	7,1	144,8	Noria
MS-03	242803	6239851	42	1013	17,4	7,5	-18,8	Noria
MS-04	243419	6240854	123	483	18,1	7,6	126,3	Pozo
MS-05	244131	6241198	9	750	16,4	7,3	132,1	Noria
MS-06	245756	6240308	11	1045	19,4	6,9	115,0	Pozo
MS-07	245557	6240466	21	502	21,6	7,7	145,5	Pozo
MS-08	241980	6240402	26	1874	19,4	6,8	138,5	Noria
MS-09	233510	6231867	194	1013	18,4	7,8	116,4	Pozo
MS-10	233358	6232189	211	706	20,0	7,7	57,2	Pozo
MS-11	234782	6235627	34	951	19,3	7,5	-80,3	Pozo
MS-12	235550	6235354	35	1691	20,4	7,5	-43,5	Pozo
MS-13	234788	6236519	161	1032	18,8	8,2	106,8	Pozo
MS-14	234667	6238432	50	6121	19,2	7,5	-234,5	Pozo
MS-15	236624	6233439	61	924	19,6	7,5	126,4	Pozo
MS-16	236318	6234097	49	563	21,0	7,5	112,0	Pozo
MS-17	236955	6233977	118	1090	18,4	7,4	43,3	Pozo
MS-18	240083	6236663	39	835	17,5	7,5	109,7	Noria
MS-19	235752	6236083	26	2039	17,9	6,8	26,6	Noria
MS-20	238308	6237725	57	861	18,9	7,0	63,4	Pozo
MS-21	237275	6242577	9	3791	18,7	7,4	-29,9	Noria
MS-22	247004	6240779	24	742	18,4	7,2	115,5	Pozo
MS-23	247319	6240701	17	519	18,8	7,7	-36,0	Pozo
MS-24	244119	6241246	28	451	19,1	7,9	121,7	Pozo
MS-25	244129	6240794	46	749	19,3	8,6	143,8	Manantial
MS-26	239277	6228468	316	366	-	7,0	165,9	Pozo
MS-27	240192	6233437	81	1077	21,6	8,4	148,0	Estero
MS-28	247256	6241093	27	386	21,3	8,0	70,0	Río
MS-29	239231	6242376	14	875	23,4	8,2	106,3	Humedal
MS-30	233642	6235510	4	7165	22,8	8,7	62,1	Humedal
MS-31	236480	6241311	2	47200	19,3	8,3	20,3	Mar
MS-32	236764	6242449	60	46000	19	6.68	-	Vaguada

## Anexo F

### Anexo F.1. Normativa Chilena de agua para riego

En la Tabla 1 se presentan los límites máximos de elementos, especies microbiológicas y químicas de aguas de riego de la Norma chilena 1333/78 (NCh 1333/78). Esta norma describe los límites máximos en los elementos Al, As, Ba, Be, B, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, Li, Mn, Hg, Mo, Ni, Ag, Pb, Se, Na, V, Zn y en los compuestos de cianuro, cloruro, fluoruro y sulfato, entre otros. También se especifica el límite inferior y superior del pH del agua.

Tabla 13. Concentraciones máximas admitidas en agua de riego

Elemento	Límite (mg/L)
Aluminio (Al)	5
Arsénico (As)	0,1
Bario (Ba)	4
Berilio (Be)	0,1
Boro (B)	0,75
Cadmio (Cd)	0,01
Cianuro	0,2
Cloruro	200
Cobalto (Co)	0,05
Cobre (Cu)	0,2
Cromo (Cr)	0,1
Fluoruro	1
Hierro (Fe)	5
Litio (Li)	2,5
Litio (cítricos) (Li)	0,075
Manganeso (Mn)	0,2
Mercurio (Hg)	0,001
Molibdeno (Mo)	0,01
Níquel (Ni)	0,2
Plata (Ag)	0,2
Plomo (Pb)	5
Selenio (Se)	0,02
Sulfato	250
Sodio porcentual (Na)	35
Vanadio (V)	0,1
Zinc (Zn)	2
pH	Entre 5,5 y 9

## Anexo F.2. Normativa Chilena de agua potable

En la Tabla 2 se muestran los límites máximos de elementos, especies microbiológicas y químicas de agua potable de la Norma chilena 409/1. Esta norma describe los límites máximos en los elementos Cu, Cr, Fe, Mn, Mg, Se, n, As, Cd y Pb y en los compuestos de cloruro, fluoruro, nitrato y sulfato. También se explicita el límite inferior y superior del pH del agua.

Tabla 14. Concentraciones máximas admitidas en agua potable

Elementos	Límite [mg/L]
Cobre (Cu)	2
Cromo Total (Cr)	0,05
Fluoruro	1,5
Hierro (Fe)	0,3
Manganeso (Mn)	0,1
Magnesio (Mg)	125
Selenio (Se)	0,01
Zinc (Zn)	3
Arsénico (As)	0,01
Cadmio (Cd)	0,01
Nitrato	50
Plomo (Pb)	0,05
Cloruro	400
Sulfato	500
pH	Entre 6,5 y 8,5