



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

**ANÁLISIS METODOLÓGICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CONDICIÓN
NATURAL Y LÍNEA BASE DE LA CALIDAD DE AGUAS SUBTERRÁNEAS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

ÁLVARO NAVIA GONZÁLEZ

**PROFESORA GUÍA
LINDA DANIELE
PROFESOR CO GUÍA
CARLOS QUINTANA SOTOMAYOR
MIEMBROS DE LA COMISIÓN
CLAUDIA CANNATELLI**

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
GEÓLOGO**

POR: Álvaro Navia González

FECHA: Junio 2019

PROF. GUÍA: Linda Daniele

**ANÁLISIS METODOLÓGICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA
CONDICIÓN NATURAL Y LÍNEA BASE DE LA CALIDAD DE
AGUAS SUBTERRÁNEAS**

El trabajo incluye una revisión bibliográfica de distintos proyectos internacionales, principalmente europeos, como el proyecto BaSeLiNe y el proyecto Bridge, los que han sugerido formas para resolver esta misma problemática. En estos trabajos se recoge el concepto que utilizan para definir la línea base y la calidad natural, además, se analizaron las metodologías utilizadas para determinar la condición de calidad natural como las propuestas por Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006).

La metodología de trabajo que se propone consta de ocho etapas: 1.- Caracterización temporal y espacial de los datos, 2.- Sectorización de la zona de estudio, 3.- Recopilación y revisión de antecedentes, 4.- Elección de parámetros, 5.- Inspección de los datos, 6.- Estadística descriptiva, 7.- Determinación de calidad natural y línea base, 8.- Análisis final.

El análisis de las metodologías se efectuó a partir de la aplicación de éstas a dos casos de estudio de distintas escalas de trabajo y características geológicas diferentes: en el primer caso se caracterizó la calidad natural de varios acuíferos de la IV a la VII región de Chile usando información de pozos de agua potable rural (APR). El segundo caso se ubica al sur del Salar de Atacama, específicamente en el sector de Monturaqui y se trabajó con pozos realizados por tres compañías a lo largo del acuífero Monturaqui – Negrillar – Tilopozo (MNT). En ambos casos, los iones analizados fueron el Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{+2} , NO_3^- y SO_4^{-2} .

Los resultados obtenidos permiten reconocer la importancia de los múltiples elementos que son necesarios para determinar la condición de calidad natural y línea base, en particular la cantidad y calidad de los datos hidroquímicos, así como su representatividad espacial y temporal.

Se concluye que si es posible definir una metodología capaz de estimar la condición de calidad natural de las aguas subterráneas basándose en los criterios definidos por Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006), además de que es posible estimar la línea base utilizando la misma metodología para calidad natural pero acotada a una ventana temporal de datos. Sin embargo, la metodología debe trabajarse cuidadosamente teniendo en cuenta las particularidades geológicas e hidrogeológicas de cada caso de estudio.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer profundamente a mi comisión por permitirme desarrollar la última etapa de la carrera en un tema de mi interés. Gracias a la profesora Linda y Claudia por su buena voluntad, por su tiempo y preocupación en este proceso. También agradecer a todo el Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos de la DGA, en especial a Carlos Quintana por su paciencia, sus consejos, por esas reuniones de 15 minutos que se tornaban una hora discutiendo y por su acompañamiento en los momentos altos y bajos de este trabajo.

A mi familia: GloriaAngelica y Clover, por impulsarme y apoyarme en este camino, por confiar y creer en mí. A mis hermanos Pablo, Fer y Dani, gracias por recordarme con su ejemplo que la vida es más simple y menos enredada de lo que suele ser, espero seguir siendo la peor de las influencias para ustedes. Los quiero un montón a los cinco.

A mis Geoniños, ~~los navias~~: Negrura, Pilar, Coti, Rivilove, Diego, Ale. Gracias por todas las risas y penas, por esas larguísimas jornadas de estudio y por el apañe en los mejores vaciles.

A los tkm por ser ese apoyo en las primeras etapas de esta carrera, Coquet, Maria, Natruco, Patroclo. Gracias al palto, gracias a las lelas, al chino, al lunchbox, las ricas empanadas, al Catán, a la Johanna y a la Susy.

Gracias a mi gente del norte que fueron super importantes, sobre todo en esos primeros meses adaptándose en la capital: Florepuc, Juanpe, Wale, Bugi, Marcelo, Andrea, Makitop.

Y en especial a todos los que tuve el gusto compartir estos años en la escuela y que de alguna u otra forma aportaron para que esta etapa culminara de la mejor manera posible: LosFranMallea (Fran, Dani, Rasm, Jas, Sebita), Richi, María(Fer), Arroquito, Ali, Camala, Domichan, Davidchan, ValeAraya, el grupo Golf, los franchutes, MariaGene, MartinMendez, MariaPuli, Rodrimeneses, C.Armijo, ValeGodoy, el 1409, a mis gusanos y los resúmenes del Pipe.

Gracias a todos y a todas ustedes, y a los que no alcanzo a nombrar, porque hicieron de mis años en la universidad, algo más que solo venir a estudiar. Me permitieron conocer personas hermosas que me ayudaron a crecer personalmente y que me gustaría contar con ellos mucho tiempo más.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación	1
1.2	Hipótesis de trabajo.....	2
1.3	Objetivos	2
1.3.1	Objetivo general.....	2
1.3.2	Objetivos específicos.....	2
1.4	Metodología de trabajo.....	3
2	MARCO TEÓRICO	4
2.1	Definiciones.....	4
2.1.1	Calidad Natural	4
2.1.2	Línea Base.....	4
2.2	Proyectos internacionales	5
2.2.1	Proyecto BaSeLiNe	6
2.2.2	Proyecto BRIDGE.....	6
2.3	Antecedentes revisados	7
2.4	Metodologías revisadas	9
2.4.1	Separación de componentes	9
2.4.2	Preselección de datos	11
2.4.3	Otras metodologías	12
2.5	Tipos de Acuíferos	13
2.6	Composición de las aguas subterráneas	15
2.6.1	Procesos que afectan la calidad de aguas subterráneas	15
2.7	Elección de parámetros.....	18
2.7.1	Elección de posibles elementos de ocurrencia natural	19
2.7.2	Elección de posibles elementos de ocurrencia antrópico	20

3	DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA	21
4	SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO	27
4.1	Caso Regional (Región IV, V, VI, VII y RM)	27
4.1.1	Introducción	27
4.1.2	Contexto geológico	28
4.1.3	Contexto hidrogeológico	35
4.1.4	Selección de los puntos de muestreo y análisis hidroquímico	38
4.2	Caso proyecto Monturaqui (II Región de Antofagasta).....	40
4.2.1	Introducción	40
4.2.2	Contexto geológico	40
4.2.3	Contexto hidrogeológico	43
4.2.4	Selección de los puntos de muestreo	51
5	RESULTADOS	53
5.1	Resultados caso 1	53
5.1.1	Determinación de la condición de calidad natural según metodología de Wendland et al (2003).....	54
5.1.2	Determinación de la condición de calidad natural según la metodología de Müller et al (2006)	56
5.1.3	Análisis por profundidad	58
5.1.4	Análisis por tipo de acuífero (litología)	59
5.1.5	Comentarios Caso 1	61
5.2	Resultados caso 2.....	63
5.2.1	Determinación de la condición de calidad natural según metodología de Wendland et al (2003).....	64
5.2.2	Determinación de la condición de calidad natural según metodología de Müller et al. (2003)	66
5.2.3	Propuesta de Línea Base	69

5.2.4	Comentarios caso 2.....	75
6	DISCUSIONES.....	79
6.1	Con respecto a las metodologías:.....	79
6.2	Con respecto a los casos de estudios.....	82
6.2.1	Caso 1.....	82
6.2.2	Caso 2.....	83
6.3	Limitantes de la metodología.....	83
7	CONCLUSIONES.....	84
7.1	Recomendaciones.....	84
8	BIBLIOGRAFÍA.....	86
9	ANEXOS.....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Modelo conceptual indicando los cambios temporales de las condiciones prístinas a la actualidad (Extraído de Shand et al., 2007).....	5
Figura 2.2	Función de distribución separando el componente natural del componente antropogénico (Wendland et al., 2003).....	11
Figura 3.1	Esquema que describe resumidamente la metodología propuesta (Elaboración propia).....	22
Figura 4.1	Dominios geomorfológicos de la zona de estudio (modificado de Sernageomin, 2003).....	30
Figura 4.2	Mapa geológico IV y V región, escala 1:2500000 (Elaboración propia con shapefile de Sernageomin 2010).....	33
Figura 4.3:	Mapa geológico V, VI, VII región y RM, escala 1:2500000 (Elaboración propia con shapefile de Sernageomin 2010).....	34
Figura 4.4	Mapa hidrogeológico de la IV y V región. Escala 1:2500000 (Elaboración propia con shapefile de la DGA).....	36
Figura 4.5	Mapa hidrogeológico de la RM, V, VI, VII región. Escala 1:2500000 (Elaboración propia con shapefile de la DGA).....	37
Figura 4.6	Distribución regional de los datos hidroquímicos.....	38

Figura 4.7 Dominios geomorfológicos de la segunda región (modificado de Sernageomin, 2003).....	41
Figura 4.8 Funcionamiento del sistema hidrogeológico, acuífero MNT (Golder, 2017)	43
Figura 4.9 Sectorización de la zona de estudio y profundidad del basamento (Extraído de Golder, 2017).....	45
Figura 4.10 Perfil geológico longitudinal sector Monturaqui - Negrillar (Golder, 2017)	48
Figura 4.11 Perfil geológico longitudinal sector Callejón (Golder, 2017)	49
Figura 4.12 Perfil geológico longitudinal sector Tilopozo (Golder, 2017)	50
Figura 5.1 Acuíferos estudiados para el caso 1, con rojo aquellos acuíferos estudiados con la metodología de Wendland et al. (2003) y con verde los acuíferos estudiados por ambas metodologías (Elaboración propia)	58
Figura 5.2 Acuífero Limarí según unidades hidrogeológicas 1:1000000 (Elaboración propia con shapefile de la DGA).....	60
Figura 5.3 Acuífero Maipo según unidades hidrogeológicas 1:1000000 (Elaboración propia con shapefile de la DGA).....	60
Figura 5.4 Evolución temporal del promedio acumulado en el tiempo de potasio en Monturaqui (Elaboración propia)	70
Figura 5.5 Evolución temporal del promedio acumulado en el tiempo de magnesio en Monturaqui (Elaboración propia)	70
Figura 5.6 Evolución temporal del promedio acumulado en el tiempo de sodio en Monturaqui (Elaboración propia)	71
Figura 5.7 Evolución temporal del promedio acumulado en el tiempo de cloruro en Monturaqui (Elaboración propia)	71
Figura 5.8 Evolución temporal del promedio acumulado en el tiempo de sulfato en Monturaqui (Elaboración propia)	72
Figura 5.9 Evolución temporal del promedio acumulado en el tiempo de arsénico en Monturaqui (Elaboración propia)	73
Figura 5.10 Diagrama de Piper, acuífero MNT (Elaboración propia).....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Antecedentes revisados (Elaboración propia)	7
Tabla 2.2 Metodologías para determinar la línea base de las aguas subterráneas (Shand et al., 2007)	9
Tabla 2.3 Resumen de las principales características de los acuíferos europeos y las sustancias relevantes (Extraído y modificado de BRIDGE D10, 2006)	14
Tabla 2.4 Fuente de los solutos en aguas subterráneas (Elaboración propia a partir de Shand et al., 2007 y Aguilera 2010)	16
Tabla 2.5 Huellas litológicas en la composición de las aguas subterráneas modificado de (Mazor y Dekker 1997).....	16
Tabla 2.6 Tiempo aproximado que demora en disolverse una esfera mineral de 1mm de diámetro en una solución con pH 5 (Shand et al., 2007 y referencias incluidas)	17
Tabla 2.7 Parámetros del grupo 1 y grupo 2 (DGA, 2009)	19
Tabla 2.8 Contaminantes naturales típicos de aguas superficiales y subterráneas de Chile (DGA 2009 y referencias incluidas).....	20
Tabla 2.9 Metales asociados a distintos tipos de actividad en la cuenca de Santiago (Antinao (1998), extraído de DGA (2009)).....	20
Tabla 3.1 Representatividad de información según la densidad de pozos (km ² /pozo) (DGA, 2009 y referencias incluidas).....	23
Tabla 4.1 Tabla de estudios utilizados para obtener datos hidrogeológicos	27
Tabla 4.2 Elementos traza medidos según el estudio (Elaboración propia)	39
Tabla 4.3 Laboratorios que realizaron los análisis de iones y microelementos por región (caso regional) (Elaboración propia).....	39
Tabla 4.4 Resumen de las unidades hidrogeológicas sector acuífero (MNT) (Elaboración propia, con datos de Golder, 2017)	46
Tabla 4.5 Red de monitoreo del acuífero MNT (Golder, 2017).....	51
Tabla 4.6 Elementos minoritarios registrados según sector (Golder, 2017)	52
Tabla 5.1 Densidad de pozos por acuífero.....	53
Tabla 5.2 Datos utilizados para determinar calidad natural (Wendland), caso 1 (Elaboración propia)	55

Tabla 5.3 Resultados de la metodología de Wendland, caso 1 (Elaboración propia)	55
Tabla 5.4 Datos utilizados para determinar calidad natural (Müller et al., 2006), caso 1 (Elaboración propia)	56
Tabla 5.5 Resultados de la metodología de Müller, caso 1 (Elaboración propia)	57
Tabla 5.6 Resultados de calidad natural para acuíferos Choapa y Limarí por profundidad y por metodología (Elaboración propia)	59
Tabla 5.7 Resultados de calidad natural acuíferos Limarí por litología del acuífero y por metodología (Elaboración propia)	61
Tabla 5.8 Resultados de calidad natural acuíferos Maipo por litología del acuífero y por metodología (Elaboración propia)	61
Tabla 5.9 Comparación de resultados entre ambas metodologías (Elaboración propia)	62
Tabla 5.10 Datos utilizados para determinar calidad natural (Wendland), caso 2 (Elaboración propia)	64
Tabla 5.11 Estadística descriptiva y resultados de la metodología de Wendland et al. (2003), caso 2 (Elaboración propia)	64
Tabla 5.12 Datos utilizados para determinar calidad natural (Müller et al. (2006)), caso 2 (Elaboración propia)	67
Tabla 5.13 Estadística descriptiva y resultados de la metodología de Müller et al. (2006), caso 2 (Elaboración propia)	67
Tabla 5.14 Valores de pendientes en grados para pozos del sector Monturaqui (Elaboración propia)	72
Tabla 5.15 Comparación entre condición de calidad natural y propuesta de línea base, metodología de Wendland et al. (2003) (Elaboración propia)	74
Tabla 5.16 Comparación entre condición de calidad natural y propuesta de línea base, metodología de Müller et al. (2006) (Elaboración propia)	74
Tabla 5.17 Comparación de los resultados de calidad natural según Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006), caso 2 (Elaboración propia)	76
Tabla 5.18 Estadística descriptiva (últimos 5 años) y resultados metodología de Wendland et al. (2003), caso 2 (Elaboración propia)	78

Tabla 5.19 Estadística descriptiva (últimos 5 años) y resultados metodología de Müller et al. (2006), caso 2 (Elaboración propia).....	78
Tabla 6.1 Valores límites de concentración para diferentes elementos considerados por Normas Chilenas (Modificado de Aguilera, 2010)	81
Tabla 9.1 Estadística descriptiva, metodología de Wendland caso 1 (Elaboración propia)	89
Tabla 9.2 Estadística descriptiva, metodología de Müller caso 1 (Elaboración propia)	91

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Las aguas subterráneas son un recurso natural valioso, debido a que son un importante suministro de agua y son un componente principal del ciclo hidrológico, por lo tanto, monitorear y proteger la calidad de las aguas subterráneas tiene un fin medioambiental, económico, entre otros (Shand et al., 2007).

Las propiedades físicas y químicas del agua pueden verse modificadas lentamente en comparación a cuerpos de aguas superficiales. Sin embargo, ante la influencia antrópica los cambios en las aguas subterráneas pueden intensificarse y suele ser difícil distinguir que proporción del cambio se debe a efectos de uno u otro origen (Shand et al; 2007).

En el contexto normativo de la Unión Europea, se utilizan los términos *baseline*, *background* y *threshold* para diferenciar distintos niveles de concentración de parámetros de aguas subterráneas. Respectivamente los términos se traducen como línea de base, condición de fondo y valor umbral.

Con el marco normativo ambiental vigente, la ley 19.300 en el Artículo 2, letra I), define línea de base como la descripción detallada del área de influencia de un proyecto o actividad, en forma previa a su ejecución. Respecto a la calidad del agua subterránea, la definición anterior no diferencia si la situación descrita corresponde a una condición prístina respecto a una zona previamente intervenida, siendo relevante para efecto del SEIA (Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental) establecer concentraciones representativas de la situación “sin proyecto”.

Recientemente la Ley 21.064, publicada en enero del 2018, introdujo nuevas atribuciones y funciones de la Dirección General de Aguas. En atención a la calidad de las aguas se señala que la DGA tiene la atribución de “*Ejercer la policía y vigilancia de las aguas en los cauces naturales de uso público y acuíferos; impedir, denunciar o sancionar la afectación a la cantidad y la calidad de estas aguas (...)*”. En coherencia con lo anterior, la institucionalidad chilena requiere de criterios técnicos que permitan determinar objetivamente la afectación de la calidad de las aguas, lo que lleva a la necesidad de definir una condición inicial (línea de base) que será utilizada para contratarse con la condición actual.

En el marco de la aplicación de la Norma de Emisión de Residuos Líquidos a Aguas Subterráneas, se introduce el concepto de contenido natural, el cual es definido como “la concentración o valor de un elemento en la zona saturada del acuífero en el lugar donde se produce la descarga de la fuente emisora, que corresponde a la situación original sin intervención antrópica del cuerpo de agua más las situaciones permanentes, irreversibles o inmodificables de origen antrópico” (Artículo 4°, D.S. MINSEGPRES 46/2002).

Determinar la condición de línea base y calidad natural no es una tarea sencilla, incluso algunos autores como Nordstrom (2008) señalan que debido a la omnipresencia

de la actividad humana no es posible determinar la calidad natural en las aguas subterráneas. También hay que considerar otros factores que dificultan esta tarea como la falta de datos para ciertos sectores acuíferos o el escaso número de pozos.

Debido a los requerimientos que impone la normativa vigente y la dificultad que significa determinar ambas condiciones, resulta necesario contar con criterios técnicos e idealmente una metodología que se adapte a la determinación del estado actual de la calidad de las aguas subterráneas (situación de línea de base), y en los casos que amerite y resulte factible, permita distinguir las condiciones naturales o prístinas del efecto antrópico.

1.2 Hipótesis de trabajo

Es posible definir una metodología capaz de estimar la condición de calidad natural de las aguas subterráneas para distintos casos de estudio. Además, se postula que es posible definir la condición de línea base utilizando modificaciones de las técnicas utilizadas para determinar la calidad natural.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Proponer y analizar la validez de una metodología de trabajo para abordar diferentes contextos hidrogeológicos donde se requiera determinar la condición natural y la condición de línea de base de la calidad de aguas subterráneas.

1.3.2 Objetivos específicos

Analizar los casos internacionales donde se buscaba determinar la calidad natural y la condición de línea base de las aguas subterráneas.

Definir los parámetros y criterios mínimos necesarios para determinar la calidad natural de las aguas subterráneas de un acuífero y la línea base.

Elaborar un esquema de trabajo a partir de lo revisado anteriormente, que permita abordar ciertos casos donde se requiera determinar la condición de línea base y calidad natural.

Aplicar la metodología desarrollada a dos casos con el objetivo de determinar la calidad natural y línea base de un acuífero.

Analizar los resultados obtenidos y proponer recomendaciones para aplicar a casos futuros.

1.4 Metodología de trabajo

La metodología que se utilizará para el desarrollo de este trabajo de título consta de cuatro partes:

- **Reportar el estado del arte en cuanto a criterios y metodologías utilizadas para determinar la condición natural de un sector acuífero y/o la línea base:**

- Efectuar una revisión bibliográfica estudiando los criterios utilizados en estudios chilenos y en estudios internacionales para evaluar la condición natural y/o línea base de un acuífero.

- **Sistematizar las metodologías existentes e identificar requerimientos mínimos de información/datos para su aplicación.**

- **Seleccionar dos casos de estudio y aplicar las metodologías seleccionadas:**

-Validar las metodologías desarrolladas en dos casos reales con diferentes escalas de trabajos. Se contrastará la información geológica e hidrogeológica disponible con la base de datos para determinar la calidad química del agua. Para esto se hará uso de sistemas de información geográfico (SIG), mapas geológicos y Excel para trabajar estadísticamente la base de datos.

- **Comparar los resultados obtenidos con las metodologías aplicadas y proponer lineamientos para resolver futuros casos.**

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Definiciones

2.1.1 Calidad Natural

De acuerdo al artículo 4 del D.S. N° 46/2002 la calidad natural o contenido natural se define como *“la concentración o valor de un elemento en la zona saturada del acuífero en el lugar donde se produce la descarga de la fuente emisora, que corresponde a la situación original sin intervención antrópica del cuerpo de aguas más las situaciones permanentes, irreversibles o inmodificables de origen antrópico...”*.

Nordstrom (2008) señala que la calidad natural corresponde a las condiciones preindustriales no contaminadas o condiciones prístinas, sin embargo, este concepto es poco útil, ya que los datos de calidad de agua no existen para tales condiciones. Aguilera (2010) menciona que la determinación de la calidad natural es muy difícil, debido a la omnipresencia de las actividades humanas desde cientos de años, por lo cual surge la interrogante hasta qué punto se puede considerar la calidad de un agua subterránea como natural.

2.1.2 Línea Base

De acuerdo con el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA): *“la línea base consiste en la descripción detallada del área de influencia de un proyecto o actividad, en forma previa a su ejecución. Constituye, además, uno de los contenidos mínimos exigidos por la Ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, para la elaboración de Estudios de Impacto Ambiental, lo cual permite evaluar los impactos que pudiesen generarse o presentarse sobre los elementos del medio ambiente.”*

Edmunds y colaboradores (2003) define la línea base (*baseline*) como: *“La concentración o el rango de concentraciones de un elemento, especie o sustancia química presente en una solución, que se origina por procesos naturales geológicos, biológicos y atmosféricos.”* Además, agrega que puede ser necesario añadir definiciones adicionales para fines reglamentarios, por ejemplo, para los casos en el cual el estado de las aguas subterráneas puede representar el inicio de los monitoreos. Para estos casos prefiere el uso del término *“background”* ya que incluye los componentes antrópicos dentro de la calidad del agua.

Por otro lado, la USGS (2018) en su programa NAWQA (National Water-Quality Assesment) define la línea base como: *“la concentración de una sustancia en un ambiente en particular que es indicativo de las influencias mínima por humanos (fuentes antrópicas)”*.

Entendiendo el efecto inevitable de las actividades humanas en el pasado, en este trabajo se usará el término de calidad natural como lo señala Nordstrom en el 2008, es decir, como la calidad de las aguas subterráneas en su estado más prístino posible. La línea base se adaptará de la definición del SEA (ley 19.300) y Edmunds et al (2003), es decir, como el rango de concentraciones de un elemento de las aguas subterráneas de

una zona y en un tiempo determinado, previa a la ejecución de un proyecto o actividad. Esta última puede estar afectado o no por actividades antrópicas.

Definir el concepto de línea base y calidad natural es una tarea difícil ya que ambos conceptos suelen usarse como sinónimos. Además, los conceptos utilizados en Chile suelen diferir con las definiciones que se usan en otros países, lo que dificulta más la tarea de definir ambos conceptos.

2.2 Proyectos internacionales

Determinar las condiciones naturales de las aguas subterráneas no es una tarea sencilla debido a la omnipresencia de los componentes antropogénicos en las aguas subterráneas (Tedd et al; 2017). Shand y colaboradores (2007) plantean que esta tarea es más difícil aún debido a la dificultad que existe al determinar los impactos que el ser humano ha realizado al medio ambiente. Estos cambios se ilustran conceptualmente en la Figura 2.1.

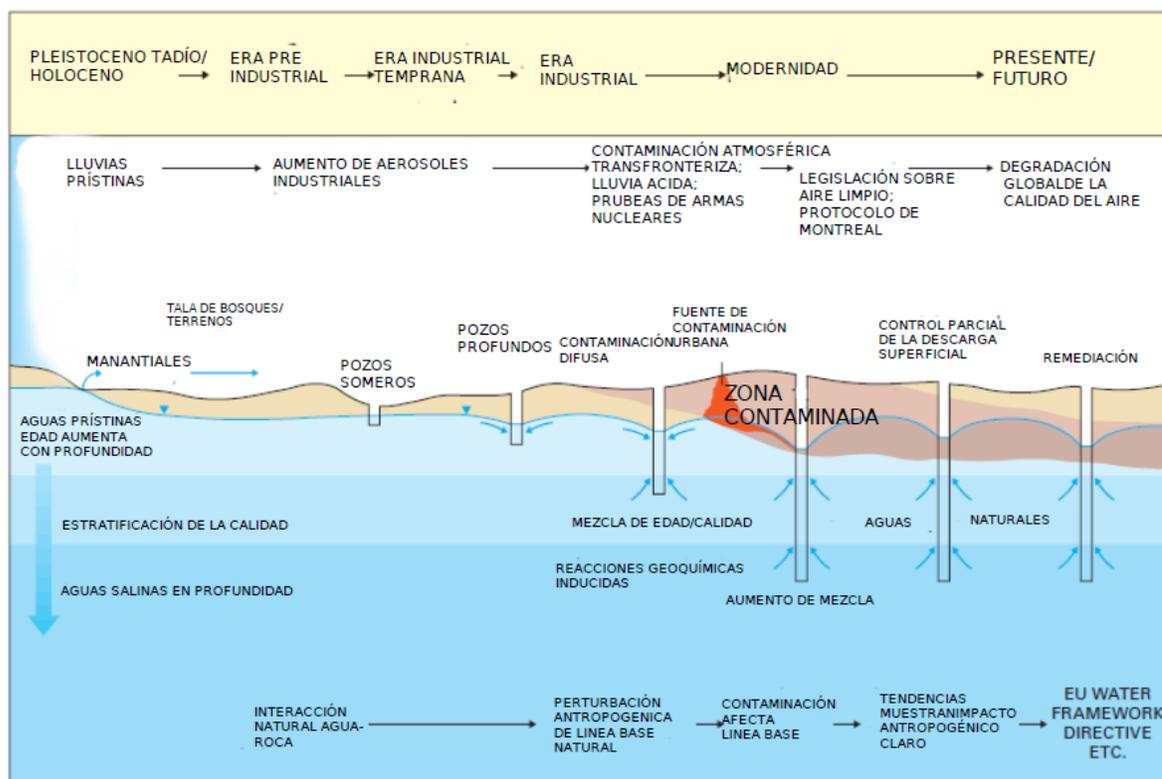


Figura 2.1 Modelo conceptual indicando los cambios temporales de las condiciones prístinas a la actualidad (Extraído de Shand et al., 2007)

Hay distintas maneras de determinar los valores de calidad natural y línea base. Tedd et al. (2017 y referencias incluidas) describen tres alternativas distintas (1) Temporal: donde se revisan datos de aguas subterráneas antes de las actividades humanas. (2) Espacial: se toman datos actuales de aguas subterráneas que no han sido afectados por actividades humanas. (3) Combinación de las dos anteriores.

El primer enfoque metodológico debe ser una de las mejores alternativas para estimar la calidad natural de las aguas subterráneas. Sin embargo, las bases de datos históricas suelen ser escasas, además, es posible que metodología utilizada para recolectar los datos haya sido poco rigurosas para los estándares modernos (Tedd et al., 2017).

En el caso de la opción espacial, se suelen obtener datos de aguas subterráneas de áreas prístinas. Sin embargo, en muchas partes del mundo, encontrar un área prístina puede ser difícil y problemático (Tedd et al., 2017).

La tercera metodología, que considera tanto la opción temporal como espacial, evalúa una gran base de datos usando estadísticas descriptivas. Esta metodología es útil para escalas regionales y nacionales (Tedd et al., 2017).

Distintos países europeos como Alemania, Italia, Bélgica o Francia han usado variaciones de las opciones anteriormente mencionadas para determinar la calidad natural de las aguas subterráneas. En particular, en Europa se desarrolló el proyecto BaSeLiNe y el proyecto BRIGDE con el fin de estandarizar el criterio y la metodología para determinar la calidad natural y los valores umbrales de las aguas subterráneas (Tedd et al., 2017).

2.2.1 Proyecto BaSeLiNe

El proyecto BaSeLiNe se desarrolló el año 2000 e involucró la presencia de grupos de investigación de 12 países europeos, el objetivo de este proyecto fue establecer un criterio para definir la calidad natural de las aguas subterráneas, para ello se analizan criterios geoquímicos con el fin de poder evaluar cualitativamente si existe contaminación antropogénica o no en un cuerpo de aguas subterráneas. Los países que participaron en este proyecto son Reino Unido, Bélgica, Dinamarca, Estonia, Francia, Polonia, Portugal, España y Suiza (Nieto et al., 2005).

El proyecto se enfoca en los siguientes aspectos: la influencia de las escalas de tiempo en los procesos naturales del agua subterránea y la velocidad a la que ocurren estos procesos, la ocurrencia del carbono orgánico disuelto (DOC) en los acuíferos, la interpretación de las tendencias en la calidad de aguas subterráneas, la selección de indicadores para el monitoreo de aguas naturales, entre otros (Nieto et al., 2005).

El proyecto BaSeLiNe recomienda el uso de estadística simples para representar la composición de la línea base de las aguas subterráneas no contaminadas a través de la mediana y el percentil 95 o 97.7 (Tedd et al., 2017).

2.2.2 Proyecto BRIDGE

El proyecto BRIDGE (Background cRiteria for the Identification of Groundwater thrEsholds) es un proyecto de la Unión Europea que se inició el año 2005 e incluyó 19 países con el fin de desarrollar una metodología para determinar los valores umbrales de las aguas subterráneas. La metodología propuesta fue probada en 14 casos de estudio que representan la mayoría de los tipos de acuíferos europeos. Para determinar los

valores umbrales, se menciona que es necesario calcular la condición de calidad natural a través de una metodología de preselección de datos y el uso de percentil 90 o 97.7.

2.3 Antecedentes revisados

A continuación, se presenta una tabla resumen (Tabla 2.1) de los estudios revisados principalmente del proyecto BRIDGE que utilizaron distintas metodologías para determinar la condición de calidad natural en algunos sectores acuíferos de sus respectivos países.

Tabla 2.1 Antecedentes revisados (Elaboración propia)

Autor/ Lugar	Características del acuífero	Área [km ²]	Datos	Metodología utilizada	Principales resultados y conclusiones
Gunnarsdottir et al., 2015 / Islandia	Aguas subterráneas afectadas por las formaciones de rocas basálticas, aguas geotermales, procesos volcánicos y precipitación de agua lluvia. Se separó el acuífero en formaciones postglaciales, pleistocenas, terciarias y depósitos de material no consolidado.	Sin información	79 estaciones	Preselección de datos (Müller et al.2006)	Los acuíferos de Islandia, en su mayoría, son carentes de la influencia antrópica debido a la configuración geológica y a la baja densidad poblacional.
Molinari et al., 2012 / Norte de Italia	Acuífero sedimentario compuesto por tres cuerpos de aguas subterráneas distintos: depósitos aluviales, depósitos marinos, sedimentos gruesos y arcillas.	6934	20 años de observaciones, 75 estaciones, 1884 datos	Separación de componentes (Wendland et al., 2005) y preselección de datos (Müller et al., 2006)	Se analizó la concentración de NH ₄ , As y B. La metodología de separación de componentes no es capaz de integrar la concentración de algunos elementos con el complejo (As) con el contexto hidrogeológico.
Preziosi et al., 2009 / Centro de Italia	Acuífero hospedado en formaciones volcánicas contaminadas naturalmente por elementos tóxicos (As, V, F). Por la costa se encuentra hospedado en sedimentos cuaternarios afectados por intrusiones marinas que aumentan el contenido de cloruro.	5500	5 años de datos, 205 estaciones	Preselección de datos (Müller et al., 2006)	Los criterios de exclusión que utiliza la concentración de NaCl y NO ₃ puede disminuir radicalmente la cantidad de datos disponibles. Se puede prescindir de este criterio siempre y cuando no exista una relación entre los elementos y el NO ₃ para evitar la eliminación de muchos datos

Autor/ Lugar	Características del acuífero	Área [km²]	Datos	Metodología utilizada	Principales resultados y conclusiones
Coetsiers et al., 2008 / Flanders, Bélgica	-Depósitos del Flemish Valley (depósitos de arena fina a limo y arcilla) -Depósitos en la cuenca del Río Meuse (grava y arena gruesa) -Depósitos del neógeno (acuífero no confinado con arenas finas a medias, glauconíticas, micáceas y ligníticas) -Depósitos Ledo-Paniselianos (acuífero semi-confinado a no confinado de arena fina a media con arcillas, calcita, glauconita y fósiles)	400	174 a 540 estaciones, según el tipo de acuífero.	Preselección de datos (Müller et al., 2006)	La metodología propuesta funciona bien para los iones mayoritarios, pero depende fuertemente de los valores de referencia escogidos. Los acuíferos pleistocenos por ser no confinados son más vulnerables a los contaminantes, por esta razón se propone usar el percentil 90 (y no 97.7) para determinar la línea base
Marandi y Karro 2008 / Estonia	Acuífero sedimentario cubierto por areniscas, limo y arcillas con basamento cristalino fracturado de rocas metamórficas (Gneis y gneis de biotita)	9935	16 años de datos, 250 estaciones	Preselección de datos (Müller et al., 2006)	Los valores umbrales calculados por las autoridades locales se asemejan a los valores calculados por la metodología del proyecto BRIGDE, excepto para los casos de Cl y amonio (NH ₄), se requieren mayores estudios para determinar la ocurrencia natural de cloruro y amonio. Se señala también que la metodología de BRIDGE funciona bien para acuíferos confinados profundos.
Wendland et al., 2008 / Rhine Valley	Acuífero de depósitos fluviales de las principales corrientes, con capas de arena, limo, arcilla y gravas del plioceno y cuaternario. Afectado por elementos antrópicos	9290	1700 datos	Preselección de datos (Wendland et al., 2007)	La metodología permite definir de buena manera el estado químico de las aguas subterráneas del valle, al haber analizado 14 parámetros de aguas subterráneas
Wendland et al., 2003 / Alemania	Cuatro acuíferos distintos: -Sedimentos de la glaciación Saale -Limolitas jurásicas -Limolitas triásicas -Areniscas triásicas	-	7920 estaciones, 500 a 4900 datos	Separación de componentes (Wendland et al., 2003)	La concentración natural de las aguas; subterráneas no debe ser definida por valores umbrales que caractericen todas las aguas subterráneas, es importante definir las concentraciones por litologías La concentración de Fe(II), Mn(II) y NH ₄ es prácticamente la misma para los acuíferos rocosos, por lo que no es necesario diferenciar según tipo de acuífero para estimar la calidad natural de estos parámetros.

2.4 Metodologías revisadas

De acuerdo con Shand y colaboradores (2007), existen múltiples metodologías para determinar las condiciones prístinas en un sector. Cada una de estas tiene sus ventajas y limitaciones las cuales son resumidas en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Metodologías para determinar la línea base de las aguas subterráneas (Shand et al., 2007)

Método	Aplicación de estudios de línea de base	Ventajas y limitaciones
Uso de datos históricos	Importancia para identificar tendencias durante el tiempo de desarrollo de aguas subterráneas	Alta valoración de los registros históricos y requiere un elevado esfuerzo por mantenerlos. En general, las bases de datos no suelen ser muy extensas. El rango de solutos es usualmente pequeño (por ejemplo: Cl, NO ₃ y dureza). Métodos analíticos (y los analistas) han cambiado con el tiempo, y también los límites de detección.
Uso de perfiles descendientes	Los perfiles a lo largo de una línea de flujo permiten ver la evolución espacial y temporal de la calidad del agua.	Requiere atención para distinguir datos tomados en pozos de diferentes profundidades y de sitios con condiciones hidrogeológicas distintas.
Extrapolación desde áreas adyacentes	Útil como primera aproximación, pero no reemplaza el análisis de cada acuífero o masa de agua	La litografía cambia espacialmente en un acuífero, cada área tiene propiedades geológicas e hidrogeológicas únicas.
Modelación geoquímica	Provee información en base a hipótesis de evolución de las aguas subterráneas, basándose aproximaciones termodinámicas.	Requiere un buen conocimiento de la situación hidrodinámica y de la mineralogía del acuífero
Métodos estadísticos	Distingue anomalías a partir de valores atípicos. Provee importante información de promedios y rangos de datos para un cuerpo de agua	No puede distinguirse si una anomalía tiene un origen natural o antrópica. Siempre debe utilizarse en el contexto de un estudio hidrogeoquímico.

Por otro lado, el proyecto BRIDGE (2007), propone que una alternativa para evaluar la línea base de las aguas subterráneas es a través de la metodología de **separación de componentes** o la **preselección de datos**.

2.4.1 Separación de componentes

Este tipo de metodología, de acuerdo al proyecto BRIDGE, se debe utilizar cuando existe suficiente información disponible (en cantidad y calidad). Un ejemplo de esta metodología es la propuesta por Wendland et al., (2003).

2.4.1.1 Wendland et al. (2003)

Esta metodología fue desarrollada por Wendland y colaboradores en Alemania con el objetivo de definir el buen estado químico de las aguas subterráneas de los datos existentes de las redes de monitoreo.

Antes de evaluar las concentraciones naturales de las aguas subterráneas primero se deben hacer chequeos previos: eliminar los análisis con balances iónicos incorrectos o las estaciones que se vean afectadas por intrusiones salinas.

Wendland et al. (2003) proponen que el contenido de solutos en aguas subterráneas se ve afectado tanto por factores naturales como antrópicos, debido a la variabilidad de ambos factores no es posible separar la influencia de cada uno al analizar una muestra de agua subterránea, es por eso que se hace necesario analizar un gran número de muestras.

De lo anterior, se asume que la concentración observada ($f_{obs}(c)$) de un elemento en aguas subterráneas se puede expresar como la suma de dos funciones de distribución de probabilidad:

$$f_{obs}(c) = f_{nat}(c) + f_{infl}(c)$$

Donde $f_{nat}(c)$ corresponde a las concentraciones normales y $f_{infl}(c)$ son las concentraciones influenciadas por factores antrópicos.

Además, se plantea que ambas funciones de distribución no son conocidas a priori y se pueden representar por una distribución LogNormal para el caso de las concentraciones naturales y por una función de distribución Normal para el caso de las concentraciones por aportes antropogénicos (Figura 2.2). (Wendland et al. 2003).

La forma de ambas funciones de distribución está determinada por la amplitud, la mediana y la varianza. Estos parámetros deben ajustarse a la frecuencia observada usando algoritmos estándares.

Finalmente, la calidad natural de las aguas subterráneas se caracteriza por el rango definido por el percentil 10 (P10) y percentil 90 (P90). El hecho de trabajar con este rango es debido a que se desea eliminar aquellos datos que pueden estar asociados a un fenómeno en particular o porque corresponden a datos anómalos (outliers).

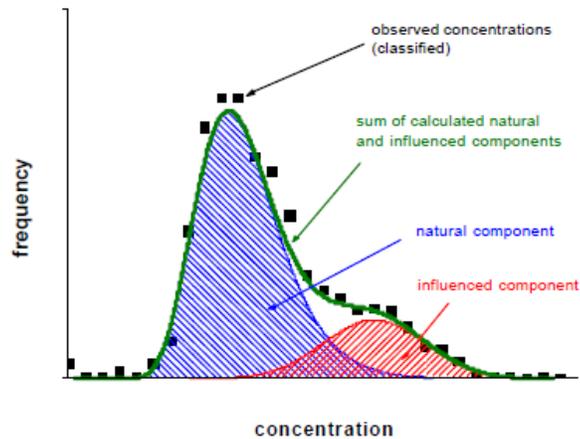


Figura 2.2 Función de distribución separando el componente natural del componente antropogénico (Wendland et al., 2003)

2.4.2 Preselección de datos

Este tipo de metodología, de acuerdo al proyecto BRIDGE, es una metodología más simple y se debe usar cuando la información es escasa o de mala calidad. Algunos ejemplos de estas metodologías son la de Wendland et al. (2007) y Müller et al. (2006).

2.4.2.1 Müller et al. (2006)

Metodología desarrollada Müller y colaboradores en el año 2006. Se plantea un criterio de preselección donde se eliminan las muestras de la base de datos original que cumplan los siguientes criterios:

- Error en el balance iónico mayor a un 10%.
- Muestras con una profundidad desconocida.
- Muestras asociadas a sistemas hidrotermales.
- Muestras que pertenezcan a un acuífero salino ($\text{Na} + \text{Cl}$ mayor a 1000 mg/l).
- Muestras que presenten una concentración de NO_3^- mayor a 10 mg/l.

En el estudio de Coetsiers et al.,(2008), se plantea que la calidad natural queda determinada por los percentiles 90 o 97.7 de acuerdo a la cantidad de datos disponibles. Cuando existen una gran cantidad de datos disponibles (mayor a 60 puntos de muestreo) se recomienda el uso del percentil 97.7, sin embargo, si la base de datos no es muy grande se sugiere el uso del percentil 90 para definir la calidad natural.

2.4.2.2 Wendland et al. (2007)

Metodología desarrollada Wendland et al. (2007). Se plantea un criterio de preselección donde se eliminan las muestras de la base de datos original que cumplan los siguientes criterios, según el tipo de ambiente:

- Para ambientes o acuíferos oxidados: $\text{NO}_3 > 10 \text{ mg/L}$.
- Para ambientes o acuíferos reducidos: $\text{NH}_4 > 0.5 \text{ mg/L}$.

Posteriormente se define la calidad natural a partir de los percentiles 10 y 90 de las concentraciones que no fueron removidas.

2.4.3 Otras metodologías

2.4.3.1 DGA -2012

La Dirección General de Aguas cuenta con una metodología simplificada (minuta DCPRH N°27/2012) cuyo objetivo es definir con un mínimo de datos el contenido natural de una zona del acuífero, para efecto de cumplir con el D.S. 46/2003 "Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas". Esta metodología se aplica cuando una fuente emisora se ubica sobre una zona con vulnerabilidad acuífera "alta", por lo que el D.S. 46 requiere determinar la condición natural del acuífero donde se dispondrán los residuos líquidos.

La citada minuta establece un mínimo de 2 puntos (pozos) de muestreo (uno aguas arriba y otro aguas abajo de la fuente emisora), a partir de lo cual se calcula el promedio, la desviación estándar, el coeficiente de variación (CV), la diferencia porcentual de promedios y el porcentaje de datos informados como límite de detección (LD) entre las concentraciones.

$$\text{Coeficiente de variación (CV)} = \frac{\text{Desviación estándar}}{\text{Promedio}} * 100\%$$

$$\% \text{ Diferencia de promedios} = \left| 1 - \frac{\text{Promedio pozo 1}}{\text{Promedio pozo 2}} \right| * 100\%$$

$$\% \text{LD} = \frac{\text{Número total de datos informados como LD por parámetro}}{\text{Número total de datos informados por parámetro}} * 100\%$$

Tal como se describe en la minuta, en base a los indicadores antes citados se aplica uno de los 3 criterios que se describen a continuación:

- Criterio 1: si el 50% o más de los datos hidroquímicos corresponde al límite de detección, entonces el contenido natural es el menor límite de detección informado.
- Criterio 2: si menos del 50% de los datos corresponde al límite de detección, la diferencia porcentual entre los promedios de los pozos 1 y 2 es menor a 30% y

los promedios de cada pozo presentan un coeficiente de variación menor al 50%, entonces el contenido natural es el promedio entre ambos promedios obtenidos.

- Criterio 3: si menos del 50% de los datos corresponde al límite de detección, la diferencia porcentual entre los promedios de los pozos 1 y 2 es 30% o más y los promedios de cada pozo presentan un coeficiente de variación mayor al 50%, entonces el contenido natural es el menor promedio entre ambos pozos.

Cada una de las metodologías anteriormente mencionadas tiene ventajas y desventajas que las hace más conveniente de usar en ciertos casos y en otros no. Por ejemplo, las ventajas de la metodología de Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006) es que son de uso relativamente sencillo, además de que permiten integrar la información de una superficie grande a través del uso del percentil. Las ventajas de la metodología de la DGA es que su uso también es sencillo y de rápida aplicación ya que no se necesitan datos históricos.

Con respecto a las desventajas, la metodología de Wendland et al. (2003) requiere de un número de datos históricos determinado para su aplicación. La metodología de Müller et al. (2006) también requiere de datos históricos, por otro lado, esta metodología aplica criterios de preselección, por lo que su aplicación no es conveniente en aquellos lugares potencialmente afectado por intrusiones salinas, con presencia de salares o con alta actividad agrícola (por los efectos del nitrato). La principal desventaja de la metodología de la DGA es que no considera el uso de datos históricos, por lo que los resultados de obtenidos con esta metodología pueden verse sesgados por variaciones estacionales en la química de las aguas subterráneas.

2.5 Tipos de Acuíferos

A pesar de que la composición de las aguas subterráneas puede verse afectada tanto por factores antrópicos como por causas naturales, las características petrográficas de la matriz sólida presente en la zona saturada de las aguas subterráneas de un acuífero, así como las características hidrodinámicas son uno de los factores que más influyen en la química de los acuíferos (Wendland et al., 2007).

Es esperable que las aguas subterráneas que se emplacen en litologías con características similares y que tengan propiedades hidrodinámicas que se asemejen, presenten composiciones químicas parecidas. (Wendland et al., 2007 y referencias incluidas).

De lo anterior, es importante tener en consideración cuales son las características de los acuíferos donde se encuentran las aguas subterráneas, con el fin de poder entender la química que tendrán éstas.

Clasificación de tipos de acuíferos (Wendland et al.,(2007)):

- Gravas y arenas
- Areniscas
- Limos y arcillas

- Calizas
- Rocas volcánicas
- Esquistos y lutitas.
- Rocas cristalinas
- Influencia salina

Estos acuíferos tienen un valor de permeabilidad y porosidad específico, así como características hidroquímicas bien definidas. A pesar de esto, es importante recordar que un acuífero no se restringe únicamente a un tipo de configuración petrográfica o litológica (Wendland et al., 2007).

Wendland et al. (2007), proponen criterios secundarios para designar el tipo de acuífero según: recarga del agua subterránea, tiempo de residencia, topografía, condiciones redox, edad geológica, presencia de diques, arcillas o minerales sulfurados.

Por otro lado, el proyecto BRIDGE resume en la Tabla 2.3 los principales contaminantes, tanto naturales como antrópicos descritos según el tipo de acuífero en algunos países europeos.

Tabla 2.3 Resumen de las principales características de los acuíferos europeos y las sustancias relevantes (Extraído y modificado de BRIDGE D10, 2006)

Tipo de Acuífero	País	Litología	Porosidad	Permeabilidad	Natural	Antrópicos
Gravas y arenas	Alemania	Depósitos fluviales (gravas)	Poroso		Na, K, Ca, Mg	K, NO ₃
	Alemania	Depósitos glaciales (arenas y gravas)	Poroso		Fe, Mn	Na, K, SO ₄ , Cl
Arenas	Bélgica	Arenas	Poroso		As, Cd, Hg, Fe, Mn, SO ₄ , NH ₄ , NO ₃ , PO ₄	Cd, Hg, NH ₄ , NO ₃
	Bélgica	Arenas	Poroso		Cl, SO ₄ , Ca, Mg, Fe, Mn, F, NH ₄	NO ₃ , NO ₂
Multicapas (Grava, arena, limo, arcilla)	Hungría	Multicapas (Grava, arena, limo, arcilla)	Poroso		NH ₄ , As, SO ₄ , Fe, Mn, Cl	NH ₄ , NO ₃
	España	Multicapas (Grava, arena, limo, arcilla)	Poroso		Cl, Hg	NO ₃ , NO ₂
	Portugal	Multicapas (Grava, arena, limo, arcilla)	Poroso		As, Fe, Mn	NO ₃ , SO ₄ , K, pesticidas
Areniscas	Estonia	Areniscas - limolitas	Fisurado		Ba, Cl	-
	Alemania	Areniscas - limolitas	Fisurado		SO ₄ , Na, Mg	-
	Portugal	Areniscas, arcillas, marga	Fisurado		Cl, Fe, Mn, F	NO ₃
	Reino Unido	Areniscas	Fisurado		Cl, SO ₄ , NH ₄ , As, Cd, Hg, Pb	NH ₄ , NO ₃
Carbonatos no kársticos	España	Limolitas - Dolomitas	Fisurado		Mg, SO ₄	-
	Alemania	Limolitas - Dolomitas - Margas	Fisurado		SO ₄ , Cl	-
	Portugal	Limolitas - Dolomitas - Margas	Fisurado		SO ₄	-
Carbonatos	Reino Unido	Limolitas - Margas	Porosidad doble		Cl, SO ₄ , NH ₄ , As, Cd, Hg, Pb	NH ₄ , NO ₃
Carbonatos kársticos	Hungría	Dolomitas	Kárstico		NH ₄ , As, SO ₄ , Fe, Mn, Cl	NH ₄ , NO ₃
	Alemania	Limolitas - Dolomitas	Kárstico		-	NO ₃
	Reino Unido	Limolitas	Kárstico		Cl, SO ₄ , NH ₄ , As, Cd, Hg, Pb	NH ₄ , NO ₃

Tipo de Acuífero	País	Litología	Porosidad Permeabilidad	- Natural	Antrópicos
	Bélgica	Limolitas - Dolomitas - Lutitas	Kárstico	SO ₄ , Fe, Mn, Mg, F, As, B, NH ₄	NO ₃ , pesticidas
Lutitas	Alemania	Lutitas, esquistos, areniscas, grauvaca	Fisurado	Fe, Mn	-
Cristalino	Francia	Rocas magmáticas y metamórficas	Fisurado/alterado	As, Cu, Pb, Zn, Mo, Cl	NO ₃
	Alemania	Rocas magmáticas y metamórficas	Fisurado/alterado	Na, SO ₄	-
	Portugal	Magmáticas	Fisurado/alterado	Al, As	-
Volcánico	Italia	Multicapas (Piroclastos, lavas)	Poroso (fisurado)	As, Va, SO ₄ , Fe, Al, Cl	-

2.6 Composición de las aguas subterráneas

La mayoría de los elementos presentes en las aguas subterráneas naturales se encuentran en estado iónico. Los iones fundamentales, cuya suma representa casi la totalidad de los iones disueltos, son: cloruro (Cl⁻), sulfato (SO₄⁻²), bicarbonato (HCO₃⁻), sodio (Na⁺), calcio (Ca⁺²) y magnesio (Mg⁺²). Frecuentemente se considera los iones nitrato (NO₃⁻), carbonato (CO₃⁻²) y potasio (K⁺) a pesar de que su proporción suele ser pequeña. (Custodio y Llamas, 1976).

Los iones minoritarios, corresponden a las sustancias que se encuentran en cantidad menores (menos de 1% del contenido total) que los iones fundamentales. Los iones menores más importantes son: NO₃⁻, CO₃⁻², K⁺, Fe⁺², NO₂⁻, F⁻, NH₄⁺, Sr⁺² (entre 0.01 y 10 ppm) y Br⁻, S⁺², PO₄⁻³, NO₂⁻, Fe⁺³, Mn⁺², NH₄⁺, Al⁺³ (entre 0.0001 y 0.1 ppm) (Custodio y Llamas, 1976).

Los elementos traza, son aquellos que por lo general están en concentraciones difícilmente medidos por medios químicos usuales, algunos de ellos son los iones metálicos derivados del As, Sb, Cr, Pb, Cu, Zn, Ba, V, Hg, U. (Custodio y Llamas, 1976).

Lo mencionado anteriormente sucede en los casos más frecuentes de aguas naturales, ya que en aguas contaminadas la presencia de los elementos varía notablemente, por ejemplo, podría bajar la concentración de los iones fundamentales o aumentar el contenido de los iones menores o trazas.

2.6.1 Procesos que afectan la calidad de aguas subterráneas

La calidad química de las aguas subterráneas se ve afectada por la interacción de distintos procesos. La presencia de algunos solutos en las aguas subterráneas se debe principalmente a las reacciones que se producen con los minerales de la superficie. La Tabla 2.4 indica la fuente de los principales solutos que se pueden encontrar en las aguas subterráneas (Shand et al., 2007).

Tabla 2.4 Fuente de los solutos en aguas subterráneas (Elaboración propia a partir de Shand et al., 2007 y Aguilera 2010)

Constituyentes mayoritarios	Fuente principal de solutos en aguas subterráneas	Constituyentes minoritarios y trazas	Fuente principal de solutos en aguas subterráneas
Na	Agua lluvia, disolución de halita o feldespatos, intercambio iónico con arcillas. Evaporitas y residuos industriales	Al	Arcillas, feldespatos, anfíboles, micas
K	Agua lluvia, disolución de feldespato potásico y biotitas. Evaporitas y fertilizantes	BO₃	Turmalina, evaporitas, agua marina, emisiones volcánicas
Mg	Agua lluvia, disolución de dolomita (CaMg(CO ₃) ₂), minerales ferromagnesianos (olivinos, anfíboles, piroxenos, biotita), intercambio iónico.	F	Agua lluvia, disolución de fluorita, apatito y silicatos (biotita, anfíboles)
Ca	Disolución de calcita (CaCO ₃), dolomita, plagioclasas, yeso (CaSO ₄ 2H ₂ O)	PO₄	Fertilizantes, degradación de materia orgánica, apatito
HCO₃, CO₂, CO₃	Disolución de calcita, dolomita, siderita, oxidación de materia orgánica. Gases volcánicos	Fe	Óxidos, sulfuros, carbonatos y arcillas
SO₄	Agua lluvia, disolución de yeso, oxidación de piritita (FeS ₂)	Mn	Óxidos e hidróxidos
Cl	Agua lluvia, agua marina, disolución de evaporitas y contaminación	Sr	Carbonatos
SiO₂	Silicatos	N₂	Aire, reducción de nitrato
NH₄	Contaminación, degradación de materia orgánica, reducción de nitrato, intercambio catiónico	As	Insecticida con arsénico, oxidación piritita
NO₃	Oxidación de amonio o nitrógeno orgánico, contaminación, deposición atmosférica	Br	Agua lluvia, materia orgánica.
O₂	Gases atmosféricos y del suelo	Cr	Contaminación

2.6.1.1 Reacciones químicas en acuíferos y efecto de las litologías

La composición de las rocas y el tipo de suelo está directamente relacionada con la calidad química del agua. La Tabla 2.5 relaciona algunos tipos de rocas con la composición que tendrán las aguas subterráneas con las que se relacione:

Tabla 2.5 Huellas litológicas en la composición de las aguas subterráneas modificado de (Mazor y Dekker 1997)

Roca	Composición de las aguas subterráneas
Areniscas	Baja salinidad (300 – 500 mg/l); el principal ion es el Bicarbonato (HCO ₃ ⁻), principales cationes: Na ⁺ , Ca ⁺² , Mg ⁺²
Calizas	Baja salinidad (500 – 800 mg/l); el principal ion es el Bicarbonato (HCO ₃ ⁻), principales cationes: Ca ⁺²
Dolomitas	Baja salinidad (500 – 800 mg/l); el principal ion es el Bicarbonato (HCO ₃ ⁻), principales cationes: Ca ⁺² y Mg ⁺² en igual cantidad.
Granitos	Muy baja salinidad (300 mg/l); el principal ion es el Bicarbonato (HCO ₃ ⁻), principales cationes: Na ⁺ , Ca ⁺² .

Roca	Composición de las aguas subterráneas
Basalto	Baja salinidad (400 mg/l); el principal ion es el Bicarbonato (HCO_3^-), cationes Na^+ , Ca^{+2} y Ca^{+2} se encuentran en concentraciones similares.
Esquisto	Baja salinidad (300 mg/l); el principal ion es el Bicarbonato (HCO_3^-), principales cationes: Na^+ y Ca^{+2} .
Mármol	Salinidad media (1200 mg/l); el principal ion es el Bicarbonato (HCO_3^-) y cloruro (Cl^-), principales cationes: Na^+ y Ca^{+2} .
Arcilla y filita	Usualmente tiene rocas de sal y yeso. Alta salinidad (900 – 2000mg/l), cloruro (Cl^-) es el principal anión seguido por sulfato (SO_4^{-2}). Principal catión Na^+
Yeso	Alta salinidad (2000 - 4000mg/l), principal anión es el sulfato (SO_4^{-2}). Principal catión Na^+ . Principal catión es Ca^{+2} seguido por Mg^{+2}

Tabla 2.6 Tiempo aproximado que demora en disolverse una esfera mineral de 1mm de diámetro en una solución con pH 5 (Shand et al., 2007 y referencias incluidas)

Mineral	Fórmula	Tiempo (años)
Cuarzo	SiO_2	34000000
Caolinita	$\text{Al}_2 \text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	6000000
Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	2600000
Epidota	$\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$	923000
Microclina	KAlSi_3O_8	921000
Albita	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	575000
Sanidina	$(\text{K},\text{Na})(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_8$	291000
Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$	276000
Enstatita	MgSiO_3	10100
Diopsido	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	6800
Forsterita	Mg_2SiO_4	2300
Anortita	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	112
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	1.6
Calcita	CaCO_3	0.1
Yeso	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Poco
Halita	NaCl	Muy poco

De la Tabla 2.6 se deduce que la composición química del agua de un acuífero queda dominada por las reacciones que involucran los minerales presentes en él (principalmente evaporitas y minerales carbonáticos).

Aun así, la distribución de los minerales presentes en un acuífero es poco conocida como para predecir las concentraciones de los solutos presentes en él, especialmente los elementos trazas.

2.6.1.2 Disolución de minerales y precipitación

Este tipo de reacciones son las principales controladoras de los elementos químicos presentes en las aguas subterráneas. Muchas reacciones pueden tener un impacto en la porosidad y permeabilidad de las rocas de un acuífero. Por ejemplo, la disolución del cemento carbonático puede aumentar la porosidad y la permeabilidad de las rocas del acuífero, así como la precipitación de óxidos de hierro puede disminuir la porosidad y restringir el flujo dentro del acuífero (Shand et al., 2007).

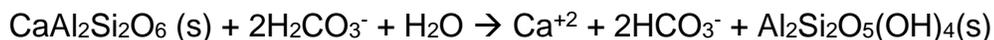
De acuerdo a Shand et al., (2007) los minerales pueden disolverse de una manera congruente o incongruente. La primera quiere decir que los solutos producidos están presentes en la misma proporción como se encuentran en el mineral mientras que en la

disolución incongruente la proporción entre los solutos y la fase sólida no es la misma debido a la precipitación en otras fases minerales.

Disolución congruente de yeso:

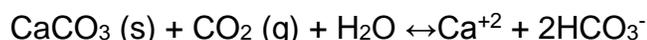


Disolución incongruente de anortita produce calcio disuelto, bicarbonato y caolinita:



Sin embargo, las reacciones que involucran el sistema carbonato son las más importantes con respecto al control de la química de las aguas subterráneas (Shand et al. 2007). En los distintos terrenos geológicos, el flujo de las aguas subterráneas se encuentra en contacto con minerales de carbonato como la calcita (CaCO_3) o dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) (Aguilera, 2010)

Disolución de calcita bajo condiciones de abundancia de dióxido de carbono:



2.6.1.3 Reacciones redox

Los procesos de reducción y oxidación juegan un rol importante controlando la concentración, transporte y solubilidad de algunas especies como Fe^{+2} , Mn, SO_4^{-2} , H_2S , CH_4 en las aguas subterráneas, también juegan un rol en el comportamiento de contaminantes como el nitrato o metales pesados por drenajes ácidos producidos por las mineras (Appelo y Postma, 2004).

De acuerdo con Aguilera (2010), los ríos no contaminados y los lagos tienen condiciones oxidadas debido a la mezcla de oxígeno desde la atmósfera. Mientras que las aguas subterráneas tienen condiciones de reducción debido al aislamiento con respecto a la atmósfera.

2.7 Elección de parámetros

El estudio “Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos” (2009) de la Dirección general de aguas, fija como objetivo desarrollar las bases metodológicas para caracterizar químicamente los cuerpos de aguas subterráneas, debido a la creciente demanda del agua en el país afectando tanto su disponibilidad como calidad.

De acuerdo a este estudio, la calidad química de las aguas subterráneas queda definida por los valores de concentración de todos los parámetros fisicoquímicos que puedan evaluar y contrastar con una normativa vigente. Además, se propone definir un índice de calidad para lo cual es necesario escoger un cierto número de parámetros químicos con los que trabajar, estos son elegidos según cada caso.

La metodología para definir índices de calidad propuesta por la DGA (2009) establece dos grupos de trabajo (Tabla 2.7):

El primero conformado por los parámetros: sólidos totales disueltos (SDT), cloruros (Cl^-), Sulfatos (SO_4^{-2}), Calcio (Ca^{+2}), Sodio (Na^+) y magnesio (Mg^{+2}), que corresponden a parámetros comúnmente analizados en cualquier muestra de agua. Estos parámetros se

encuentran siempre disueltos en las aguas en forma natural y el aumento de sus concentraciones puede deberse a efectos antrópicos.

El grupo 2 está conformado por parámetros que se definen de acuerdo a la singularidad de cada acuífero y está conformado por un máximo de tres parámetros: nitratos (NO_3) más la concentración de dos elementos minoritarios escogidos libremente que reflejen la singularidad de cada acuífero, por ejemplo, se podría considerar las concentraciones de Arsénico (As) y Boro (B) en el agua subterránea de la zona norte de Chile.

Tabla 2.7 Parámetros del grupo 1 y grupo 2 (DGA, 2009)

Grupo 1	Grupo 2
SDT	NO_3^-
Cl^-	Parámetro local 1
SO_4^{2-}	Parámetro local 2
Ca^{+2}	
Na^+	
Mg^{+2}	

En el estudio se propone elegir los parámetros locales (grupo 2) de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Recopilar antecedentes de los posibles valores que elevan el valor de la concentración de parámetros químicos en el sector acuífero escogido:
 - a. Efectos naturales: geología, salares, volcanes, termas, mar.
 - b. Efectos de origen antrópico: derrames industriales, tranques de relave, vertederos, actividades agrícolas, ganaderas, etc.
2. Analizar las fuentes contaminantes en relación a los parámetros químicos asociados y los valores propuestos por normas nacionales e internacionales de agua potable y riego.
3. Escoger dos parámetros según:
 - a. Parámetros más abundantes con respecto a una de las normas establecidas
 - b. Parámetros más riesgosos para la salud
 - c. Elementos minoritarios de mayor concentración
 - d. Parámetros representativos de actividades antrópicas.

2.7.1 Elección de posibles elementos de ocurrencia natural

Según los antecedentes geológicos e hidrogeológicos, los flujos de agua en Chile atraviesan unidades geológicas en distancias relativamente cortas y con gradientes topográficos relativamente altos. Por esta razón no se asigna un rol de importancia a la litología como elemento influyente a nivel nacional, salvo algunas excepciones. Los elementos contaminantes de origen natural estarán relacionados con la concentración naturalmente anómala de elementos presentes donde se ubican yacimientos naturales. La Tabla 2.8 presenta una recopilación de los principales posibles contaminantes de origen natural.

Tabla 2.8 Contaminantes naturales típicos de aguas superficiales y subterráneas de Chile (DGA 2009 y referencias incluidas)

Región	Considerados en NCh409/1	No considerados en NCh409/1
XV y I	Cl, SO ₄ , SDT, As, Mn	Al, B, Li, Mo, Ag, Ba, Asbestos, Sb, Na, U
II	As, Cl	Al, B, Li, Mo, Ag, Be, Ba, Sb, Na, U
III	SO ₄ , SDT	Al, B, Li, Mo, Va, Ag, Ba, Sb, Na, U
IV		Mo, V, Ag, Ba, Asbesto, Sb, U
V	Fe, Mn	Al, Mo, Ba
RM	Fe	Al, Mo, Ba
VI		Al, Mo, Sb, U
VII	Fe	Al, Li, V, Asbesto
VIII	Fe, Mn	Al, Ni, Asbesto
IX	Fe, Mn	Al, Ni, Asbesto
XIV y X		Al, Ni, Asbesto, Sb
XI	Fe	Mo, Ag, U
XII		Sb

2.7.2 Elección de posibles elementos de ocurrencia antrópico

Las principales fuentes contaminantes de origen antrópico corresponden a residuos industriales líquidos y aguas servidas domésticas, los efectos de la actividad agrícola producto de la incorporación de fertilizantes y pesticidas al acuífero y el aporte de metales pesados por parte de actividades industriales. La Tabla 2.9 resume los principales metales pesados asociados a las actividades desarrolladas en la cuenca de Santiago (DGA, 2009).

Tabla 2.9 Metales asociados a distintos tipos de actividad en la cuenca de Santiago (Antinao (1998), extraído de DGA (2009))

Actividad	Tipo de actividad	Metales asociados
Industria	Metalúrgica	As, Be, Bi, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, V, Zn
	Química	Ba, As, Cd, Cr, Cu, Pb, Sn, V, Zn
	Papel	Cr, Cu, Pb, Hg, Ni
	Textiles	As, Ba, Cd, Cu, Pb, Hg, Ni
	Agroquímicos	As, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Mn, Ni, Zn
Agricultura	Impurezas en fertilizantes	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn
	Pesticidas	Cu, As, Hg, Pb, Mn, Zn
	Abonos	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn
	Líquidos percolados	Cd, Ni, Cu, Pb, Zn
Otros	Preservantes de la madera y corrosión de objetos metálicos	As, Cu, Zn, Cd
Residuos urbanos	Aguas servidas	Pb, Cu, Zn, Cr
	Rellenos sanitarios	Cd, Cu, Pb, Sn, Cr, Hg, Co

3 DEFINICIÓN DE LA METODOLOGÍA

En el presente capítulo se presenta la metodología aplicada para alcanzar los objetivos establecidos en esta memoria, es decir, analizar la validez de la propuesta metodológica.

El objetivo de esta propuesta es formular de manera ordenada los pasos a seguir para determinar la condición de calidad natural o línea base de las aguas subterráneas de un sector determinado. La implementación de la metodología está basada en la cantidad y calidad de la información que se puede recopilar de la zona de estudio, además de los análisis que se puedan realizar de las muestras de aguas obtenidas en terreno. Se asumirá que el usuario dispone de los datos geoquímicos previamente, por lo tanto, la toma de datos no se detallará en este capítulo.

La metodología de trabajo consiste en ocho etapas ordenadas las cuales son: 1.- Caracterización temporal y espacial de los datos, 2.- Sectorización de la zona de estudio, 3.- Recopilación y revisión de antecedentes, 4.- Elección de los parámetros, 5.- Inspección de datos, 6.- Estadística descriptiva, 7.- Determinación de la condición de calidad natural y/o línea base y 8.- Análisis final.

La Figura 3.1 representa esquemáticamente la metodología de trabajo propuesta:

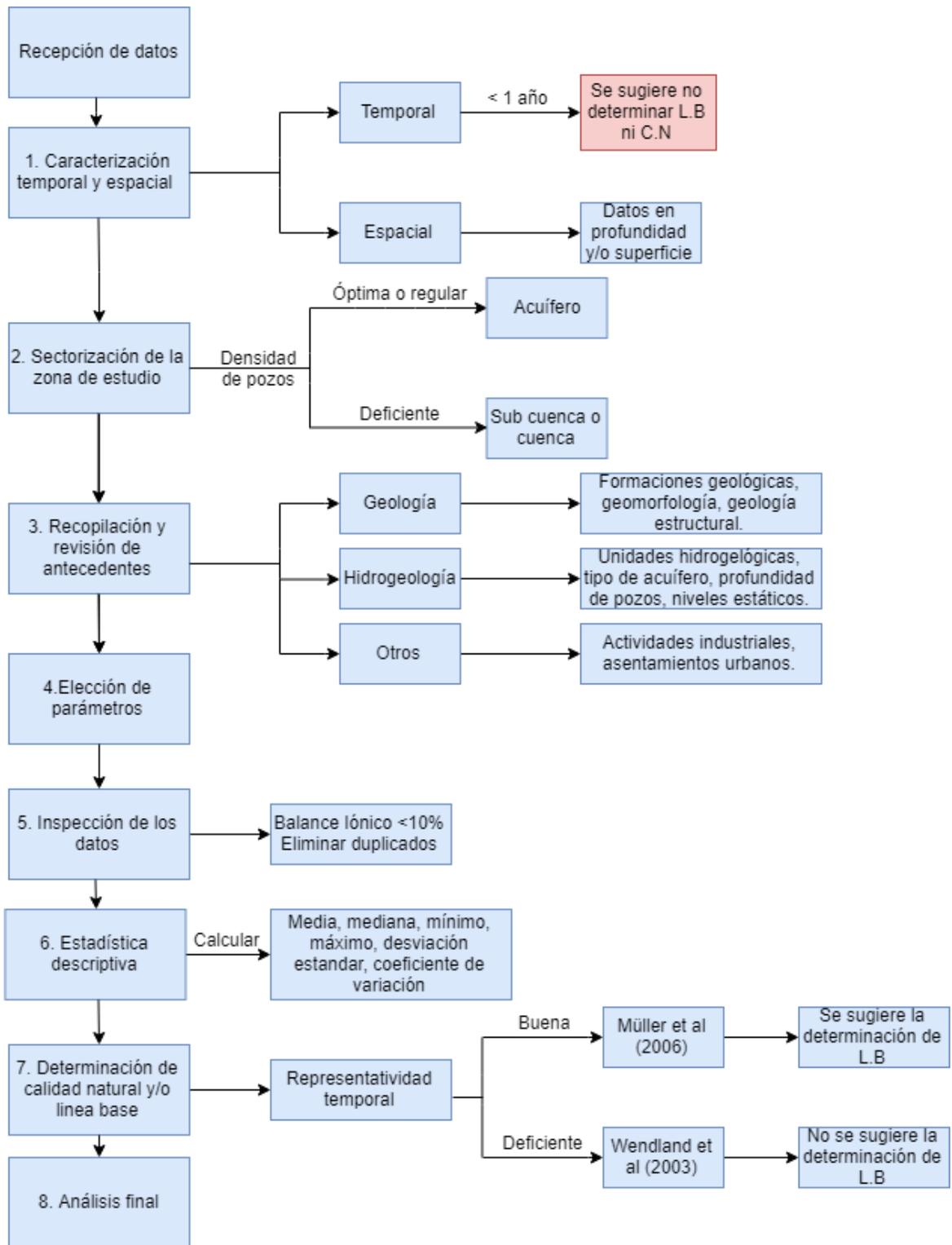


Figura 3.1 Esquema que describe resumidamente la metodología propuesta (Elaboración propia)

Etapa 1: Caracterización temporal y espacial de los datos:

En esta etapa se debe caracterizar la temporalidad de los datos geoquímicos, es decir, describir la información a lo largo de un periodo de tiempo. Aguilera (2010) sugiere tener un mínimo de 5 años de monitoreo histórico para determinar la calidad natural. A pesar de que no sea lo recomendable, la cantidad de años mínimo podrá ser menor siempre y cuando sea compensado con una base de datos robusta en el tiempo que se tenga disponible, de lo contrario se recomienda no determinar la condición de calidad natural. En algunos casos esta información es difícil de conseguir o simplemente inexistente por lo que se debe hacer un estudio bibliográfico detallado con el fin de obtener la mejor caracterización de la calidad natural del sector.

Posteriormente es necesario conocer cómo se distribuyen los datos en el espacio y en profundidad con el fin de obtener una buena representatividad espacial de la información. Se recomienda tener datos a lo largo de todo el acuífero con el fin de tener claridad de cómo va variando la calidad a lo largo de este. Esta información será fundamental para definir cuál será la sectorización con la se trabajará.

Etapa 2: Sectorización de la zona de estudio

La densidad de pozos será un factor que reflejará las condiciones de la zona de estudio y el nivel de información que se tiene de este. La DGA (2009, y referencias incluidas) señala que para estudiar adecuadamente las condiciones de un acuífero debe existir una densidad de pozos de 25 km² y 100 km² en sitios impactados y no impactados respectivamente. En casos de que exista intrusión salina la densidad de los pozos debe ser mayor (entre 5 y 10 km²). La Tabla 3.1 resume representatividad de información del acuífero según la densidad de pozos. (DGA, 2009)

Tabla 3.1 Representatividad de información según la densidad de pozos (km²/pozo) (DGA, 2009 y referencias incluidas)

Condición del acuífero		Óptima	Regular	Deficiente
Sin Intrusión salina	Sobreexplotada	Menor a 25	Entre 25 y 150	Mayor a 150
	Sustentable	Menor a 100	Entre 100 y 200	Mayor a 200
Con Intrusión salina	Sobreexplotada	Menor a 5	Entre 5 y 15	Mayor a 15
	Sustentable	Menor a 10	Entre 10 y 20	Mayor a 200

La definición del sitio de estudio debe realizarse en función de cómo se distribuyen los datos en superficie y el tamaño de la zona (densidad de pozos). Se recomienda priorizar que la zona de estudio quede definida en primer lugar por sector acuífero, si la densidad de pozos no es óptima o regular, entonces los datos se agruparán por subcuenca o cuenca (Asumiendo que al aumentar la superficie de trabajo se tendrá una mayor disponibilidad de pozos). Aquellos datos que no se encuentren dentro de la sectorización definida (sector acuífero o cuenca), no deberán ser considerados en el estudio.

Etapa 3: Recopilación y revisión de antecedentes

Posteriormente será necesario definir las características geológicas e hidrogeológicas de la zona de estudio. Caracterizar la geología de la zona significa identificar claramente las distintas unidades y formaciones geológicas que componen la zona, reconocer los distintos elementos geomorfológicos y distinguir las principales estructuras que forman parte de la geología estructural ya que podrían condicionar la dirección del flujo subterráneo. Esto será importante para tener en especial consideración los elementos que pueden ser aportados a las aguas subterráneas por las distintas unidades de rocas presentes en la zona de estudio.

Con respecto a la hidrogeología es necesario caracterizar los diferentes elementos que definen las aguas subterráneas en el lugar de estudio como son: tipo de acuífero (confinado, semiconfinado, libre), unidades hidrogeológicas, direcciones de flujo, profundidad de los pozos, transmisividad, niveles estáticos, etc. Con el fin de poder estimar los tiempos de residencia del agua, evolución geoquímica del acuífero y entender en general el funcionamiento hidrogeológico de la zona de estudio.

Además de la información geológica e hidrogeológica es importante tener conocimiento de las actividades industriales (actividad minera, actividad agrícola, otras industrias, etc.) y de los asentamientos urbanos presentes en los alrededores de la zona. Estos elementos pueden significar un cambio directo e indirecto en la química de las aguas subterráneas. La Tabla 2.9 relaciona los distintos elementos que podrían estar presentes en un acuífero por actividades industriales.

Para recopilar esta información, se puede hacer uso de estudios anteriores, publicaciones académicas, cartas geológicas (idealmente a una escala 1:100000 o menor que detallen las unidades y formaciones geológicas presentes en la zona, además de la geología estructural (zonas de falla y pliegues principales)), imágenes satelitales o el uso de sistemas de información geográficos además de estudios desarrollados por entidades estatales o privadas. La escala de la información a recopilar deberá estar en función de cómo es la distribución de los datos a lo largo de la sectorización definida en el paso anterior. Si los datos están distribuidos en una escala regional (mayor que 1:100000) la información geológica e hidrogeológica también debe ser de las mismas dimensiones, de lo contrario, si se trabaja a escala local (menor que 1:100000), se puede hacer uso de la información regional, pero debe incluirse información de mayor detalle (geología e hidrogeología a escala local). De no existir esta información, ya sea en organismos públicos o privados, se recomienda realizar campañas de terreno enfocadas en levantar información local de la geología e hidrogeología de la zona.

Etapa 4: Elección de parámetros

La medición de la condición de calidad natural se define a través de los distintos parámetros físicos y químicos presentes en las aguas subterráneas. La DGA en su estudio del 2009 “Diagnostico y clasificación de sectores acuíferos (2009)” sugiere analizar los elementos separados según dos grupos:

- Primer grupo: SDT, Cl⁻, SO₄⁻², Ca⁺², Na⁺, Mg⁺²
- Segundo grupo: NO₃⁻, parámetro local 1, parámetro local 2.

Los parámetros locales 1 y 2 son elementos que se escogen según el acuífero y que representan la particularidad de cada sector. Por ejemplo, se podría escoger elementos traza como el arsénico o el boro.

Por otro lado, Aguilera (2010), menciona que los parámetros mínimos que deben considerarse son:

- pH, potencial redox, TDS, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto.
- NO_2^- , NO_3^- , HCO_3^- , Cl^- , SiO_2 , Ca^{+2} , Na^+ , Mg^{+2} , SO_4^{-2} , K^+ , PO_4^{-3} , NH_4^+ , Cu, As, Fe, Mn, HS^- , Al

Considerando lo mencionado anteriormente, el usuario tiene la libertad para seleccionar los parámetros mencionados por la DGA (2009), Aguilera (2010) o bien elegir los parámetros que estime conveniente según un objetivo específico o el contexto geológico de la zona de estudio (Por ejemplo, la concentración de elementos tóxicos cercano a una zona de relave minera). En este trabajo se analizaron aquellos iones (Cl , Na, K, Mg, NO_3 y SO_4) que su presencia puede estar asociado a un factor antrópico según Custodio y Llamas (1976).

Etapa 5: Inspección de los datos

Con el fin de poder asegurar una buena calidad de los datos químicos del agua se calcula el error asociado al balance iónico. De acuerdo con Apelo y Postma (2004) el análisis para los iones principales será confiable si el error en balance iónico (B.I.) es menor a un 5%, ya que en el agua la suma de las cargas positivas y negativas debe ser igual. Sin embargo, en este caso se considerará un error de un 10% en función de lo que menciona Müller y colaboradores (2006).

Se utilizará la siguiente fórmula para calcular el balance iónico (BI) del agua:

$$BI = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{aniones}} \times 100$$

donde la suma de cationes y aniones se expresan como meq/L. Para la suma de cationes se consideran el Na^+ , K^+ , Mg^{+2} y Ca^{+2} , mientras que para la suma de aniones se consideran el Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{-2} y NO_3^- .

Etapa 6: Estadística descriptiva

Para tener una mejor estimación de la condición de calidad natural, es necesario realizar un análisis estadístico básico para caracterizar los datos geoquímicos. Se debe calcular el mínimo, máximo, promedio, desviación estándar, coeficiente de variación y mediana de los datos para cada ion a analizar. Esto será importante para relacionar los resultados de calidad natural con el sector acuífero.

Etapa 7: Determinación de la condición de calidad natural y/o línea base

Si la representatividad de los datos temporales es buena (más de 5 años de información) se sugiere la determinación de la calidad natural a través de una

metodología de preselección, como la metodología de Müller et al (2006). Donde la calidad natural quedará definida por el rango entre el percentil 10 y 90 o 97.7 una vez que son eliminados por distintos criterios.

En estos casos también se podrá determinar la condición de línea base, aplicando la misma metodología a una ventana temporal más acotada.

Si la representatividad de los datos temporales es deficiente (menos de 5 años de información) se sugiere la determinación de la calidad natural a través de una metodología de preselección, como la metodología de Wendland et al (2003). Donde la calidad natural quedará definida por el rango entre el percentil 10 y 90. En estos casos no se recomienda la medición de la condición de línea base.

4 SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

4.1 Caso Regional (Región IV, V, VI, VII y RM)

4.1.1 Introducción

En Chile las aguas subterráneas son importantes como fuente del recurso hídrico para la población y para las distintas actividades económicas del país (DGA, 2018a). De acuerdo al Banco Mundial (2011) la sostenibilidad de los acuíferos en Chile se encuentra en riesgo, debido a un sobre otorgamiento de derechos de aprovechamiento y, además, porque existe una deficiente gestión de su calidad la cual está asociada a la falta de información respecto a su cantidad y calidad (DGA, 2018a).

Para este caso, los datos se obtuvieron de los diagnósticos de calidad de agua para las regiones IV, V, RM, VI y VII en los cuales se levantó información de calidad de aguas para los acuíferos de las zonas mencionadas. En la realización de estos estudios participó el Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (DCPRH), Soluciones en Gestión Ambiental S.A (SGA) y la Dirección General de Aguas (DGA). Los estudios se resumen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Tabla de estudios utilizados para obtener datos hidrogeológicos

Autor	Título del informe/estudio	Objetivo / Cantidad de datos.
Región de Coquimbo (IV)		
DGA 2017	Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Coquimbo. (S.D.T N° 397)	Generar información de la condición fisicoquímica de las aguas subterráneas en la IV región. / 119 pozos.
DGA 2018b	Seguimiento de la calidad del agua subterránea – Pozos APR región de Coquimbo (DCPRH N°/19)	Analizar los resultados del seguimiento a la calidad del agua de las muestras tomadas durante los años 2016 y 2017. /15 pozos, 30 datos
Región de Valparaíso (V)		
DGA 2016c	Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Valparaíso (S.D.T N°382)	Conocer la condición actual de calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos de la V región. / 49 pozos
Región Metropolitana (RM)		
DGA-SGA 2016b	Diagnóstico de calidad de aguas subterráneas en la región metropolitana – complementario diagnostico plan maestro de recursos hídricos región metropolitana de Santiago (S.D.T N°390)	Generar información de la condición fisicoquímica de las aguas subterráneas en la región Metropolitana. / 96 pozos, 191 datos
Región del Libertador Bernardo O'Higgins (VI)		
DGA 2015	Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región Lib. Bernardo O'Higgins (S.D.T N°368)	Conocer la condición actual de calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos de la VI región. / 70 pozos
DGA 2016a	Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región Lib. Bernardo O'Higgins (S.D.T N°383)	Conocer la condición actual de calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos de la VI región y comparar cómo han evolucionado estos datos con respecto al estudio del 2015./ 40 pozos
Región del Maule (VII)		
DGA 2018a	Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región del Maule (S.D.T N°409)	Realizar un diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas en la VII región. / 143 pozos

4.1.2 Contexto geológico

Debido a la gran extensión de la zona de estudio, se determinó el contexto geológico trabajando de manera genérica, con estudios de la DGA y distintas cartas geológicas.

4.1.2.1 IV Región, Región de Coquimbo

La región de Coquimbo se ubica entre los 29° 20' y los 32° 15' latitud sur, tiene una superficie de 40580 km². A nivel regional la distribución lito estratigráfica tiene dirección norte-sur, las formaciones geológicas son principalmente volcánicas con intercalaciones sedimentarias marinas y/o continentales, intruidas por cuerpos intrusivos los cuales son más jóvenes de oeste a este, salvo excepciones. (DGA y DCPRH 2017, Fernández 2018).

En el segmento central y oriental (alta cordillera) predominan las unidades volcánicas, sedimentarias continentales y marinas de edades asociadas al cretácico inferior intruidas por rocas de composición variable, predominantemente granodioritas que poseen edades entre el jurásico superior a eoceno. (Fernández, 2018), por otro lado, existen unos pocos cuerpos metamórficos paleozoicos, que afloran cercanos a la frontera internacional (DGA y DCPRH 2017).

En el sector central-occidental, principalmente en la cuenca del Río Limarí aparecen rocas sedimentarias y volcánicas estratificadas con intercalaciones marinas pertenecientes al cretácico y probablemente al terciario inferior, en menor proporción se encuentran rocas intrusivas (DGA y DCPRH 2017).

Los depósitos sedimentarios no consolidados y semi consolidados se disponen en el borde costero y a lo largo de los principales cauces de la región corresponden a gravas, arenas, depósitos aluviales, fluviales y eólicos del cuaternario. (Fernández 2018, DGA y DCPRH 2017).

Con respecto a la geología estructural, la región de Coquimbo se encuentra en un segmento de subducción subhorizontal de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Esta configuración explicaría la ausencia de volcanismo, así como el mayor grado de sismicidad en la placa continental (Fernández, 2018 y referencias incluidas).

Las principales estructuras que se encuentran son el Sistema de Falla Romeral, la cual se extiende en dirección Norte-Sur y se ha asociado a la Zona de Falla Atacama y el conjunto de Fallas Vicuña y Rivadavia, también distribuidas en dirección Norte-Sur, asociado al sistema de Falla de Domeyko (Fernández, 2018 y referencias incluidas).

4.1.2.2 V Región, Región de Valparaíso

La región de Valparaíso se ubica entre los 32°00' y 33°57' latitud sur, tiene una superficie de 16396 km². A nivel regional, las unidades geológicas de la región de

Valparaíso se distribuyen en orientación norte-sur. Las principales unidades estratigráficas que se presentan en esta región son: rocas sedimentarias clásticas y calcáreas (Formación Lagunillas y Formación San José), rocas sedimentarias clásticas (Formación Cristo Redentor), rocas volcánicas y volcanoclásticas andesíticas (Formación Las Chilcas), tobas y tobas soldadas (Formación Lo Valle y Formación Farellones) y rocas volcánicas y volcanoclástica (Formación Abanico) (Moscoso, 1982).

Los depósitos no consolidados son principalmente sedimentos aluviales, fluviales, fluvio-glaciales, morrénicos y gravitacionales, mientras que las rocas intrusivas corresponden a stocks monzograníticos a dioríticos (del cretácico superior al neógeno) y a cuerpos hipabisales dacíticos a basálticos (Mioceno) (Moscoso, 1982).

De acuerdo con la carta 52 de Moscoso et al. (1982), la zona de estudio se puede caracterizar por un amplio sinclinorio asimétrico, el cual en su flanco occidental se dispone suavemente inclinado hacia el este cortado por diversas fallas que tienen dirección norte – sur. Por otro lado, el sector oriental, presenta fuertes manteos hacia el oeste, incluso se dispone subvertical en algunas zonas (Moscoso, 1982).

Algunas de las fallas que se pueden encontrar en región es la zona de falla Chacabuco (orientación N30°E) que pone en contacto la formación Abanico y Lo Valle y la Zona de Falla Pocuro (orientación promedio N10°W) caracterizada por un conjunto de fallas normales y la presencia de brecha de falla, a esta última falla se le considera la responsable de la formación de la depresión central (Moscoso, 1982).

Por último, en la región se encuentran presentes yacimientos metálicos que corresponden a mineralización de cobre en vetas y mantos, alojados en rocas volcánicas y volcanoclástica de las formaciones Abanico y Las Chilcas, mientras que los yacimientos no metálicos corresponden a calizas, mármoles, yeso y arcillas. Además, es posible encontrar zonas de alteración hidrotermal del tipo argílica y cuarzo-sericítica (Moscoso, 1982).

4.1.2.3 RM, Región Metropolitana

La región Metropolitana se ubica entre los 32° 55' y los 34° 19' latitud sur, tiene una superficie de 15403 km². En esta región se reconocen tres unidades morfoestructurales orientadas norte-sur que son la Cordillera de la Costa, Depresión Central y la Cordillera Principal (Figura 4.1).

Las formaciones que se pueden encontrar a lo largo de las Cordillera de la Costa son Formación Las Chilcas (secuencia volcánica y sedimentaria continental, lavas andesíticas y dacíticas), Formación Veta Negra (secuencia de lavas intermedias a ácidas, con escasas intercalaciones sedimentarias) Formación Lo Prado (secuencia volcánica con intercalaciones sedimentarias marinas) (DGA, 2016).

Las formaciones que se encuentran en la cordillera de los Andes son: Formación Farellones (secuencia volcánico-volcánico sedimentaria, predominan las lavas andesitas basálticas) y Formación Abanico (lavas, básicas e intermedias y rocas piroclásticas ácidas con intercalaciones de sedimentos continentales) (DGA, 2016).

Las rocas intrusivas presentes en la zona son muy variables y van desde intrusivos Paleozoicos, hasta intrusivos del miocenos Inferior como la granodiorita La Obra, la composición de estos es principalmente intermedia (dacitas a granodioritas) (DGA, 2016).

Los depósitos no consolidados se concentran principalmente en la cordillera de la costa y la cordillera principal, corresponden a depósitos coluviales de pie de monte en las laderas y depósitos fluviales en el fondo de los valles, muchas veces acompañados de depósitos fluviales que forman terrazas. En la depresión central se encuentran depósitos aluviales de los ríos Maipo y Mapocho, mientras que al sur de Paine se encuentran depósitos aluviales del Río Angostura (DGA, 2016).

De acuerdo a la hoja de Santiago de la región metropolitana, en esta región se reconocen yacimientos de cobre, molibdeno, plomo, plaza y zinc, agrupados en los distritos mineros El Volcán y Disputada-Río Blanco. Los recursos minerales no metálicos explotados más importantes son el carbonato de calcio, yeso y materiales de construcción (Thiele, 1980).

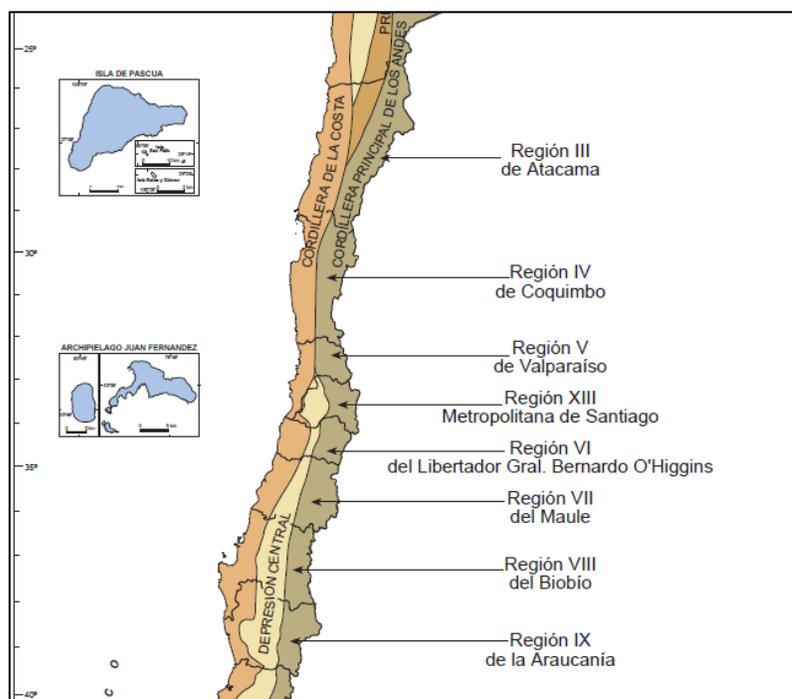


Figura 4.1 Dominios geomorfológicos de la zona de estudio (modificado de Sernageomin, 2003)

4.1.2.4 VI Región, Región del Libertador Bernardo O'Higgins

La región del Libertador Bernardo O'Higgins se ubica entre los 33° 51' y los 35° 01' latitud sur, tiene una superficie de 16387 km². Al igual que otras regiones de Chile se reconocen tres unidades morfoestructurales orientadas norte-sur que de oeste a este son la Cordillera de la Costa, Depresión Central y la Cordillera Principal.

Las formaciones que se pueden encontrar en esta hacia el occidente son la formación Lo Prado (secuencia volcánica con intercalaciones sedimentarias marinas del Jurásico superior al Cretácico inferior) y la formación Las Chilcas (secuencia volcánica y

sedimentaria continental, lavas andesíticas y dacíticas del Cretácico inferior) (Godoy et al., 2009).

Las formaciones que se encuentran hacia el oriente en la cordillera de los andes son la formación Farellones (secuencia volcánico-volcánico sedimentaria, predominan las lavas andesitas basálticas) y formación Abanico (lavas, básicas e intermedias y rocas piroclásticas ácidas con intercalaciones de sedimentos continentales) (Godoy et al., 2009).

Con respecto a los depósitos cuaternarios, estos se ubican principalmente en la Depresión Intermedia. Los depósitos más cercanos a los afluentes corresponden a depósitos fluviales compuestos principalmente por bolones y gravas con intercalaciones de arenas y limo. En las salidas de los cursos fluviales se pueden encontrar depósitos aluviales que comprenden gravas clastosoportadas que forman abanicos aluviales. (DGA, 2015).

En esta región destaca el mega yacimiento de El Teniente, que contiene alrededor de un 20% de los recursos de cobre de Chile. También en esta región se desarrolla el distrito minero de Alhué, donde la mina El Membrillo es la más importante perteneciente a este distrito por la explotación de oro, cobre y hierro de una veta de baja sulfidación. (Godoy et al., 2009).

4.1.2.5 VII Región, Región del Maule

La región del Maule se ubica entre los 34° 41' y los 36° 33' latitud sur, tiene una superficie de 30296 km². Al igual que en otras regiones de Chile, los rasgos geomorfológicos principales son La Cordillera de la Costa, La Depresión Intermedia, y La Cordillera de Los Andes.

La Cordillera de la Costa se compone principalmente de basamento cristalino y metamórfico paleozoico hacia el oeste, mientras que hacia el este afloran rocas intrusivas del Mesozoico Inferior. El borde oriental está compuesto de secuencias estratificadas volcánicas y sedimentarias mesozoicas. Además, se encuentra la presencia de afloramientos N-S de roca metamórficas que pertenecen al período silúrico-carbonífero en el sector costero (DGA, 2018a).

En esta región, la Depresión Central se encuentra rellena por depósitos aluviales y volcánicos del Pleistoceno al Holoceno. El basamento corresponde a rocas Mesozoicas y Cenozoicas que son observables en cerros islas y cordones que cortan la depresión. (DGA, 2018a).

La Cordillera Principal consiste en su parte occidental por rocas pertenecientes a la Formación Abanico y Formación Cola de Zorro. Además de secuencias volcánicas levemente plegadas provenientes del arco volcánico actual. El flanco oriental consiste en rocas de la Formación Abanico y secuencias Mesozoicas fuertemente deformadas las que se encuentran en contacto por un sistema de fallas de vergencia Este de la Falla el Fierro (DGA, 2018a).

Por último, es importante mencionar que los sedimentos no consolidados de edad cuaternarios que se encuentran relleno las cuencas son de origen fluvial, fluvio-glacial,

glacial, coluvial y lacustre. Además, en la cordillera de la Costa se encuentra la presencia de terrazas marinas desarrolladas durante el Pleistoceno y Holoceno (DGA, 2018a).

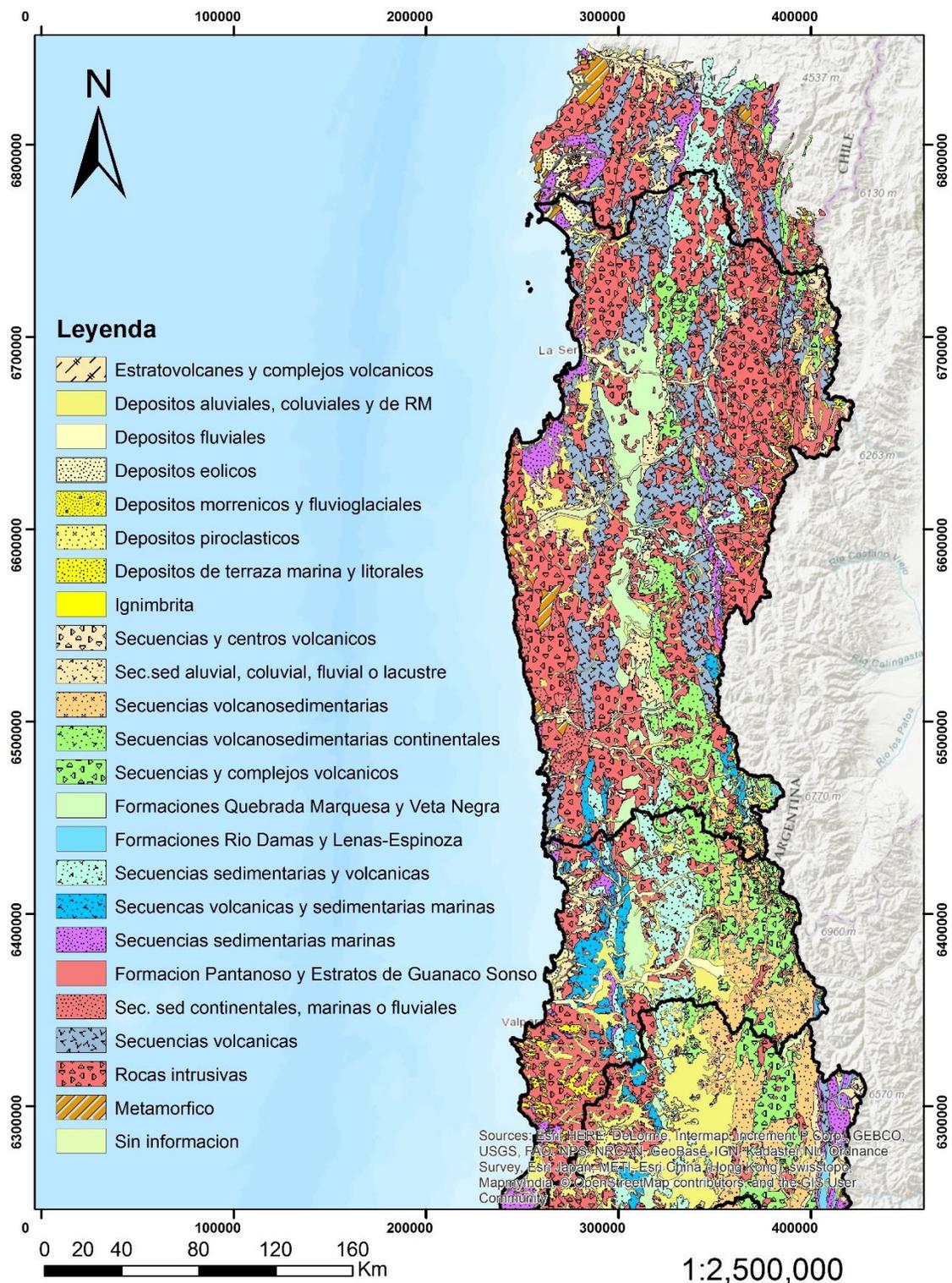


Figura 4.2 Mapa geológico IV y V región, escala 1:2500000 (Elaboración propia con shapefile de Sernageomin 2010)

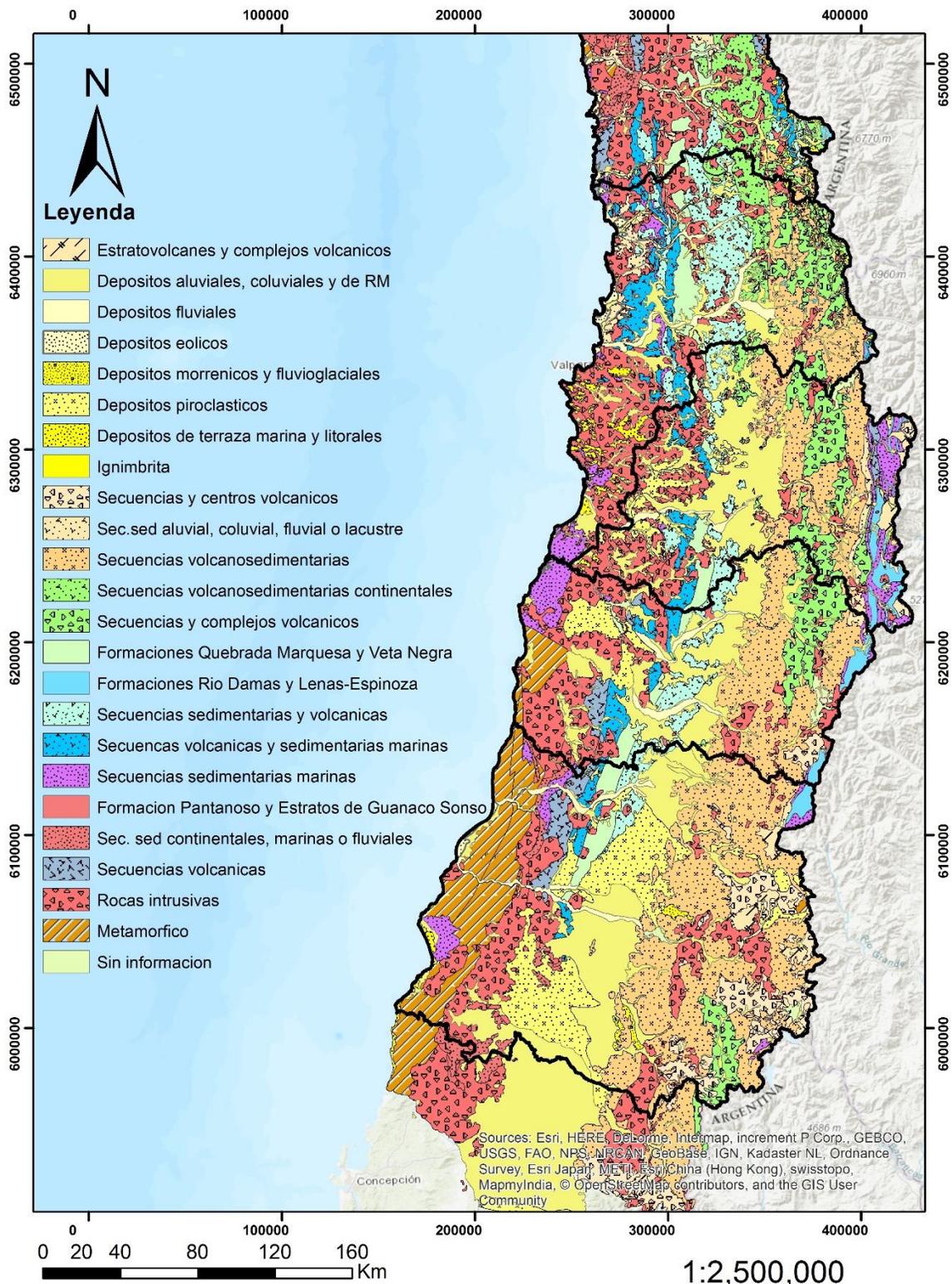


Figura 4.3: Mapa geológico V, VI, VII región y RM, escala 1:2500000 (Elaboración propia con shapefile de Sernageomin 2010)

4.1.3 Contexto hidrogeológico

Debido a la extensión de la zona de estudio se analizará la distribución y la importancia de las distintas unidades hidrogeológicas a partir de estudios de la DGA y el uso de sistemas de información geográfica en ArcGis.

A partir de la Figura 4.4 y Figura 4.5 se reconoce que los datos se encuentran principalmente en unidades hidrogeológicas que corresponden a depósitos no consolidados y de relleno. Estos están formados por materiales sueltos como arenas, gravas o mezcla de ambos con orígenes geológicos muy distintos como fluvial, aluvial, eólico o glacial. Estos depósitos son de alta importancia hidrogeológica debido a sus condiciones de porosidad y permeabilidad y a la poca profundidad del nivel piezométrico (Custodio y Llamas, 1976).

En segundo lugar, los datos se encuentran en unidades hidrogeológicas que corresponden a rocas sedimentarias y volcánicas. Las primeras pueden ser unidades de rocas detríticas (conglomerados, areniscas, limolitas, etc.) o químicas (por ejemplo, calizas o dolomías). La porosidad en rocas sedimentarias de grano fino puede ir de 0,1 a 0.25 en su estado original y puede disminuir hasta 0.02 bajo efectos de compactación, mientras que la permeabilidad está comprendida entre 10^{-3} y 10^{-8} m/día. Es por esto que estas unidades son de poca importancia hidrogeológica, incluso son consideradas como unidades impermeables según ciertos autores (Custodio y Llamas, 1976).

Las rocas volcánicas son aquellas que se han formado por enfriamiento de lava cercano a la superficie terrestre, como los basaltos o andesitas. La porosidad y permeabilidad de estas rocas es variable ya que depende de la manera en que se enfría el magma, por lo que al igual que el caso anterior son consideradas como unidades de poca importancia hidrogeológica. (Custodio y Llamas, 1976).

Un número menor de datos se ubica en unidades hidrogeológicas que corresponden a rocas plutónicas e hipabisales. Estas unidades incluyen a todos los tipos de rocas formadas por un enfriamiento lento del magma al interior de la corteza terrestre como el granito o la diorita. En general tienen una muy baja permeabilidad incluso si presentan fracturas ya que estas pueden estar rellenas por material más fino que impermeabilicen la zona. Por lo anterior son considerados como zonas de nula importancia hidrogeológica (Custodio y Llamas, 1976).

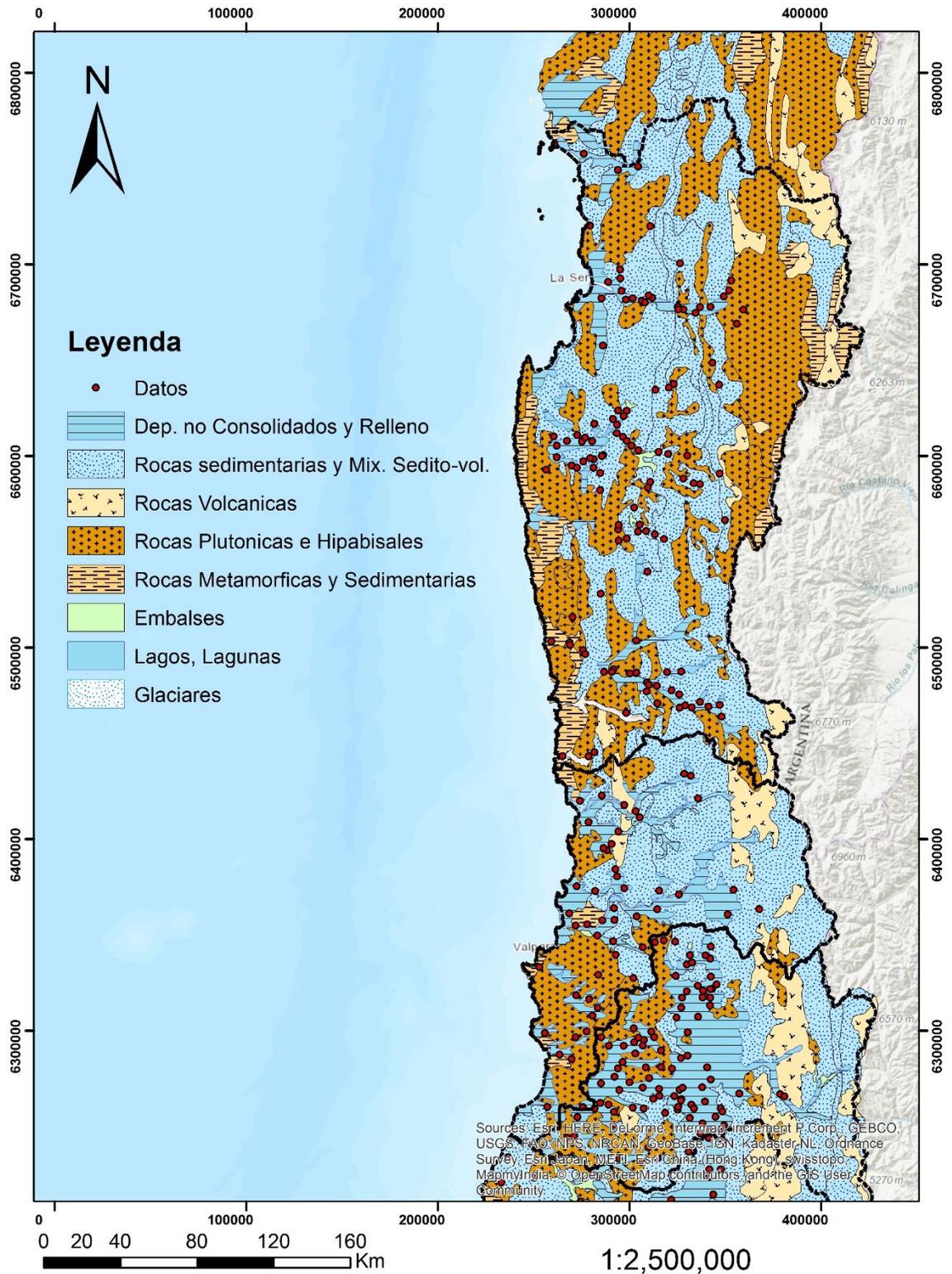


Figura 4.4 Mapa hidrogeológico de la IV y V región. Escala 1:2500000 (Elaboración propia con shapefile de la DGA).

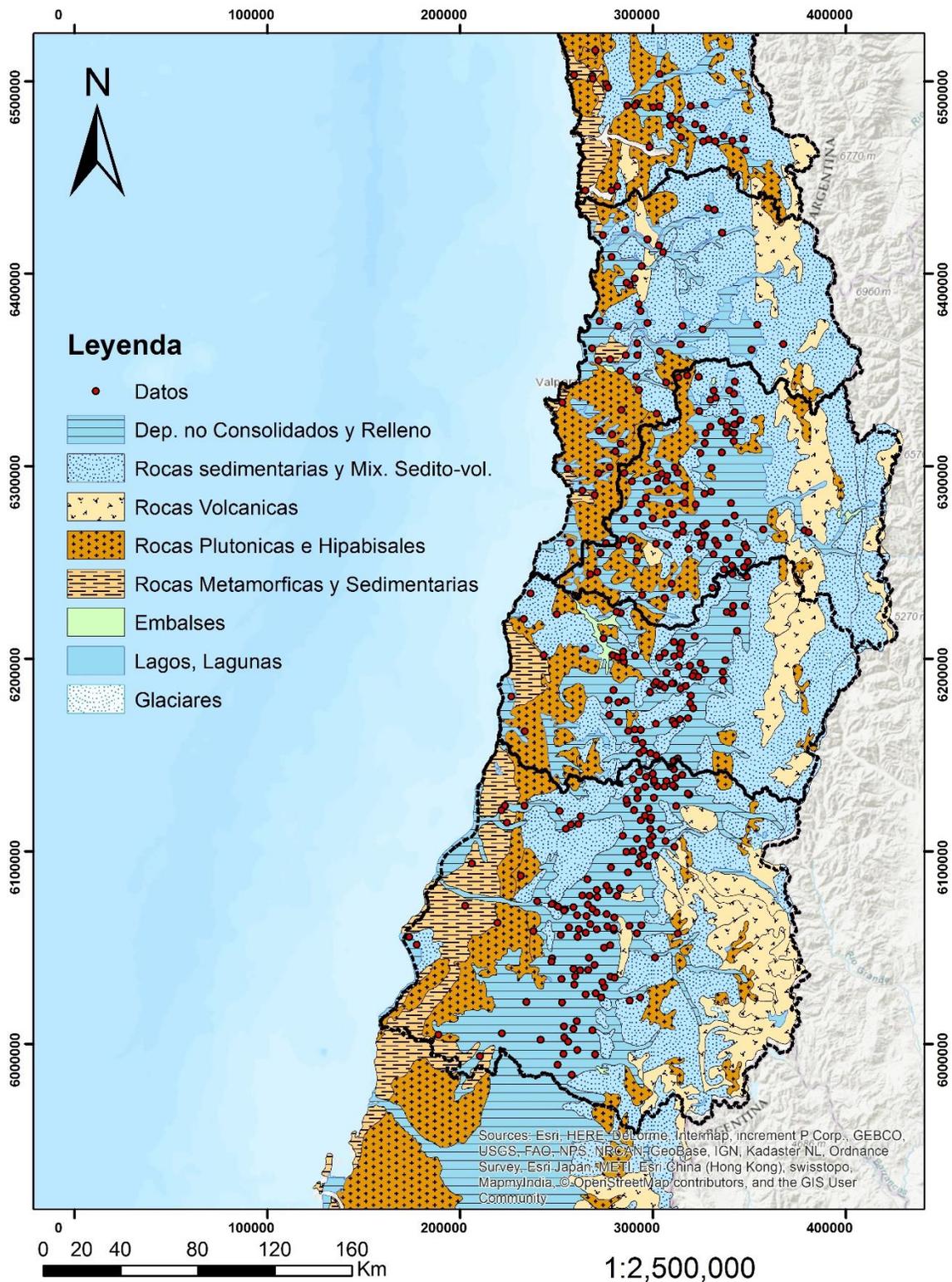


Figura 4.5 Mapa hidrogeológico de la RM, V, VI, VII región. Escala 1:2500000 (Elaboración propia con shapefile de la DGA).

4.1.4 Selección de los puntos de muestreo y análisis hidroquímico

De los informes mencionados anteriormente se recopilieron 642 datos de 517 pozos (Figura 4.6), esta información corresponde tanto a parámetros físicos como químicos. En primer lugar, se tiene la información de profundidad del pozo, del nivel estático, del nivel dinámico, de la temperatura, pH, conductividad, sólidos totales disueltos (STD), entre otros.

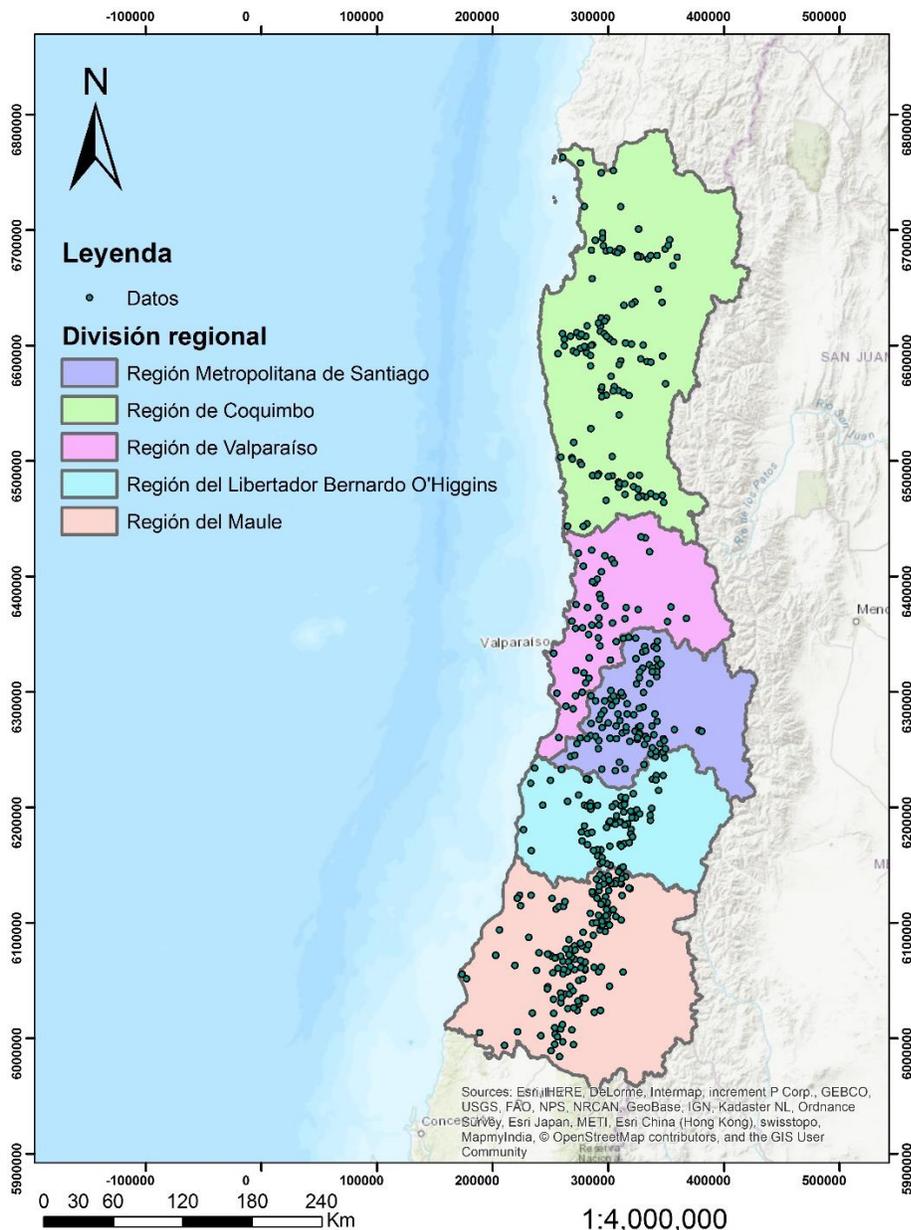


Figura 4.6 Distribución regional de los datos hidroquímicos

En el ámbito hidroquímico se midió la concentración de: cloruro, sodio, calcio, magnesio, nitrato, amonio, sulfato, bicarbonato y fosfato. Los elementos trazas medidos varían según el estudio y estos se resumen en la Tabla 4.2

Tabla 4.2 Elementos traza medidos según el estudio (Elaboración propia)

Región	IV	IV	V	RM	VI	VI	VII
Estudio/Año	S.D.T N° 397 / 2017	DCPRH N°19 / 2018	S.D.T N° 382 / 2016	S.D.T N° 368 / 2016	S.D.T N° 368 / 2015	S.D.T N° 383 / 2016	S.D.T N° 409 / 2018
As	x	x	x	x	x	x	x
Al		x			x		
B					x		
Cd	x	x	x		x	x	x
Co	x	x	x		x	x	
Cu	x	x	x		x	x	x
Cr					x		x
F							x
Fe	x	x	x		x	x	x
Hg	x	x	x		x	x	x
Mn	x	x	x		x	x	x
Mo		x			x		
Ni	x	x	x		x	x	
Ag		x			x		
Pb	x	x	x		x	x	x
Se	x	x	x		x	x	x
SiO₂					x		
Zn	x	x	x		x	x	x

Para los datos de la IV, V, VI y VII región, se seleccionaron datos de acuerdo con tres etapas que se mencionan a continuación.

En la primera etapa se les da prioridad a aquellos pozos ubicados en acuíferos delimitados por la DGA y aquellos sectores acuíferos con limitación de explotación. Luego, en la segunda etapa, se consideran aquellos que tengan disponibilidad de equipo de bombeo en el pozo, que capturan aguas subterráneas del acuífero libre y, además, que sean más factible de contener sustancias de origen antrópico infiltradas desde la superficie del terreno. Por último, se seleccionan los pozos de acuerdo a la factibilidad de ejecutar el muestreo de forma expedita y que tengan una adecuada distribución espacial.

Con respecto a los parámetros de calidad de aguas se midieron los iones mayoritarios, los iones minoritarios (microelementos) y las condiciones fisicoquímicas del agua. Los análisis de los elementos mayoritarios fueron realizados por un laboratorio externo (ANALAB o SGS) y los minoritarios por el Laboratorio Ambiental DGA (LADGA y/o SGS), las condiciones fisicoquímicas fueron medidas en terreno.

En el caso de la RM, los datos se tomaron en dos campañas de terreno. Para la selección de los puntos de monitoreo se utilizaron criterios hidrogeológicos como la profundidad del pozo, la profundidad del nivel freático y características de las cribas. Los datos fisicoquímicos, como el nivel estático, fueron medidos in situ con un pozometro, mientras que el análisis de los elementos fue realizado por el laboratorio externo SGS y el Laboratorio Ambiental DGA (LADGA).

La Tabla 4.3 resume los laboratorios que participaron en el análisis hidroquímico por este estudio. Esta información será importante al momento de calcular el error aceptado para el balance iónico.

Tabla 4.3 Laboratorios que realizaron los análisis de iones y microelementos por región (caso regional) (Elaboración propia)

Región	Estudio	Iones	Microelementos
IV	S.D.T N° 397	ANALAB	LADGA

Región	Estudio	lones	Microelementos
	DCPRH N°/19	ANALAB y SGS	LADGA
V	S.D.T N° 382	ANALAB	LADGA
RM	S.D.T N° 390	SGS	SGS (Primera campaña) y LADGA (Segunda campaña)
VI	S.D.T N° 368	ANALAB	LADGA
	S.D.T N° 383	ANALAB	LADGA
VII	S.D.T N° 409	SGS	SGS y LADGA

4.2 Caso proyecto Monturaqui (II Región de Antofagasta)

4.2.1 Introducción

Minera Escondida Limitada (MEL) es una empresa minera ubicada 140 km al sureste de la región de Antofagasta dedicada a la producción de concentrados y cátodos de cobre. En este contexto de operaciones, MEL opera un campo de pozos en el sector de Monturaqui ubicado 78 km al este de su faena minera para abastecer sus operaciones.

La operación de campo de pozos de Monturaqui fue aprobada ambientalmente y se consideró la extracción de agua subterránea desde el sector de Monturaqui, por un periodo de 21 años a una tasa de 1400 l/s. El proyecto Monturaqui consiste en la extensión de la operación del sistema de extracción de agua subterránea desde el campo de pozos Monturaqui, por un periodo entre los años 2020 y 2030 y un caudal medio anual de bombeo de 640 l/s durante todo ese periodo.

La zona de estudio corresponde al sector de Monturaqui – Negrillar – Tilopozo (MNT) emplazado en la comuna de Antofagasta, al sur de la cuenca del salar de Atacama. La geología de esta zona incluye rocas que van desde el paleozoico hasta depósitos aluviales cuaternarios.

4.2.2 Contexto geológico

A nivel regional, se reconoce en la segunda región la presencia de cuatro elementos morfológicos principales que corresponden de oeste a este a la Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera de Domeyko (Precordillera) y Cordillera de los Andes (Figura 4.7).

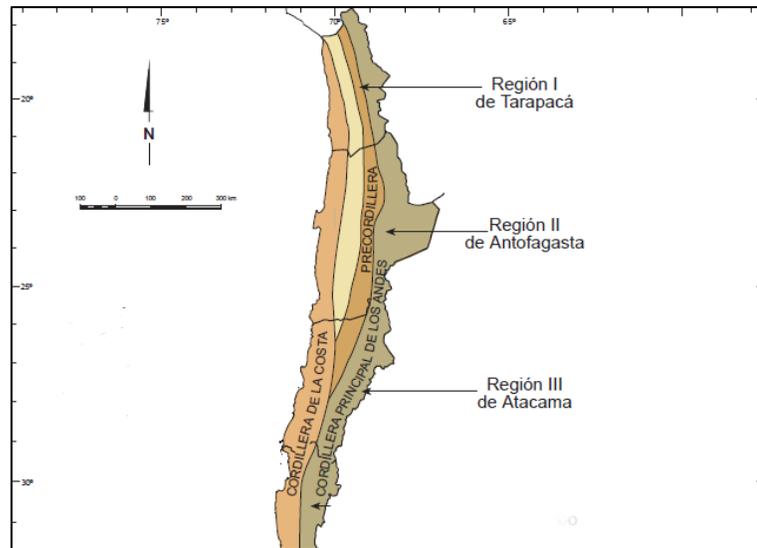


Figura 4.7 Dominios geomorfológicos de la segunda región (modificado de Sernageomin, 2003)

4.2.2.1 Unidades del Paleozoico, Triásico y Cretácico (Pre-Cenozoico)

El Paleozoico se encuentra representando por el complejo ígneo-sedimentario de Lila, formado por lavas basálticas, lavas dacíticas y tobas brechosas submarinas con intercalaciones de turbiditas, y las formaciones Quebrada Grande (conglomerados, areniscas y limolitas), Quebrada Ancha (areniscas marinas) y Lila (areniscas, siltitas y conglomerados) (Golder, 2017).

Las Formaciones Peine, Cas y Cerros Negros pertenecen a las rocas estratificadas del Triásico. Estas rocas son de ambiente continental y están constituidas principalmente por andesitas, areniscas y areniscas tobáceas, tobas, lutitas y conglomerados (Golder, 2017).

Por último, la Formación que pertenece al Cretácico es la Formación Purilactis formada por conglomerados continentales (Golder, 2017).

4.2.2.2 Unidades Cenozoicas

4.2.2.2.1 Estratos de Tilocalar (¿Oligoceno - Mioceno?)

Secuencia continental compuesta por intercalaciones entre gravas areno-limosas y arenas gravo-limosas, se presentan matriz soportadas, su grado de compactación y espesor es variable (Golder, 2017).

4.2.2.2.2 Estratos de Quebrada de Salín (Mioceno-Plioceno)

Secuencia volcanoclástica continental caracterizada por sus fuertes variaciones de facie, constituido por gravas pobremente estratificadas con lentes de arena gruesa, clastos casi exclusivamente volcánicos neógenos, con niveles arenosos, ignimbritas y depósitos piroclásticos. Se divide en dos subunidades: Salín Superior y Salín Inferior. La primera se caracteriza por ser un depósito homogéneo y sin consolidación, compuesto

principalmente por arenas de grano fino a medio, con un contenido de ceniza significativo y horizontes discontinuos de grava local. La subunidad inferior se caracteriza por una secuencia de depósitos heterogéneos, polimícticos y no consolidados a semiconsolidados, compuestos por intercalaciones de gravas limosas, gravas arenosas, arenas limosas y limos de manera aleatoria (Golder, 2017).

4.2.2.2.3 Depósitos de Gravas Antiguas (Mioceno – Plioceno)

Alternancia de carbonatos con intercalaciones de halita finamente laminados con 10 m de espesor expuestos y afloran al noreste del Cordón Chinquilchoro (Golder, 2017).

4.2.2.2.4 Ignimbrita Tucúcaro (Plioceno)

Toba moderna soldada con fenocristales de plagioclasa y biotita, además de fragmentos achatados y escasos fragmentos líticos. Tiene una potencia promedio de 20 m, aflora en el sector de Callejón formando el techo de los Estratos de quebrada Salín y Estratos de Tilocalar (Golder, 2017).

4.2.2.2.5 Volcanes del Cuaternario (Pleistoceno)

Flujos de lava constituido por andesitas y dacitas vítreas que origina coladas de 30 a 50 m de espesor. Se observan en la zona limítrofe entre Monturaqui y Negrillar (Golder, 2017).

4.2.2.2.6 Formación el Tambo (Pleistoceno)

Depósitos de calizas que se disponen al sureste del Salar de Atacama. Se presentan como capas bien estratificadas, duras, en partes compactas y en otras cristalizadas en fibras perpendiculares a la estratificación. Contienen intercalaciones de sedimentitas clásticas. (Golder, 2017).

4.2.2.2.7 Unidades salinas del Salar de Atacama (Pleistoceno – Holoceno)

Esta unidad presenta una zonación bien definida, la parte central está formada por un núcleo homogéneo de costras salinas de cloruros que presenta zonas de mezclas de sales y aportes sedimentarios laterales. Rodeando este núcleo se distribuye de adentro hacia afuera se distribuye la transición de cloruro, la yesífera, la cloruro yesífera y las costras limo salinas (Golder, 2017).

4.2.2.2.8 Unidades salinas del Salar de Atacama (Pleistoceno – Holoceno)

En el estudio de Golder (2017) se definieron cuatro unidades salinas, la primera corresponde a depósitos evaporíticos, compactos, rugosos y fracturados denominada costra de halita. Las otras tres corresponden a la costra de halita y yeso (compuesta por finos granos de sulfato y cristales de halita), costra salina suave (compuesta por cristales de sulfato y cloruro) y la costra salina clásica (limos y arcillas terrígenas que presenta cantidades de cloruro depositado en sus cavidades) (Golder, 2017).

4.2.2.2.9 Depósitos de avalancha Volcán Socompa (Holoceno)

Corresponde a un depósito de 500 km² asociado al colapso del volcán Socompa ubicado principalmente en la Cuenca Montraqui. El depósito está constituido en un 80% por ignimbritas, gravas y arenas de los Estratos de Quebrada Salín y un 20% por lavas brechizadas y depósitos volcanoclásticos provenientes de domos dacíticos y lavas del edificio volcánico propiamente tal (Golder, 2017).

4.2.2.2.10 Depósitos aluviales y coluviales (Holoceno)

Corresponde a los depósitos que cubren los flancos de los relieves principales. Están formados por bloques cuya litología es local y está relacionada directamente con las zonas de donde proviene (Golder, 2017).

4.2.3 Contexto hidrogeológico

4.2.3.1 Generalidades

El acuífero MNT tiene condiciones mayormente de acuífero libre, está compuesto principalmente por una combinación de arenas, gravas y cenizas que tienen permeabilidad media a alta. Las precipitaciones son responsables de la recarga que ocurre principalmente en el sector sur del acuífero, mientras que la descarga ocurre naturalmente en el sector de Tilopozo debido a la evaporación y evapotranspiración.

En condiciones naturales, el flujo subterráneo se da en sentido sur-norte desde el sector de Monturaqui hasta Tilopozo. La Figura 4.8 presenta un esquema general del funcionamiento del acuífero MNT.

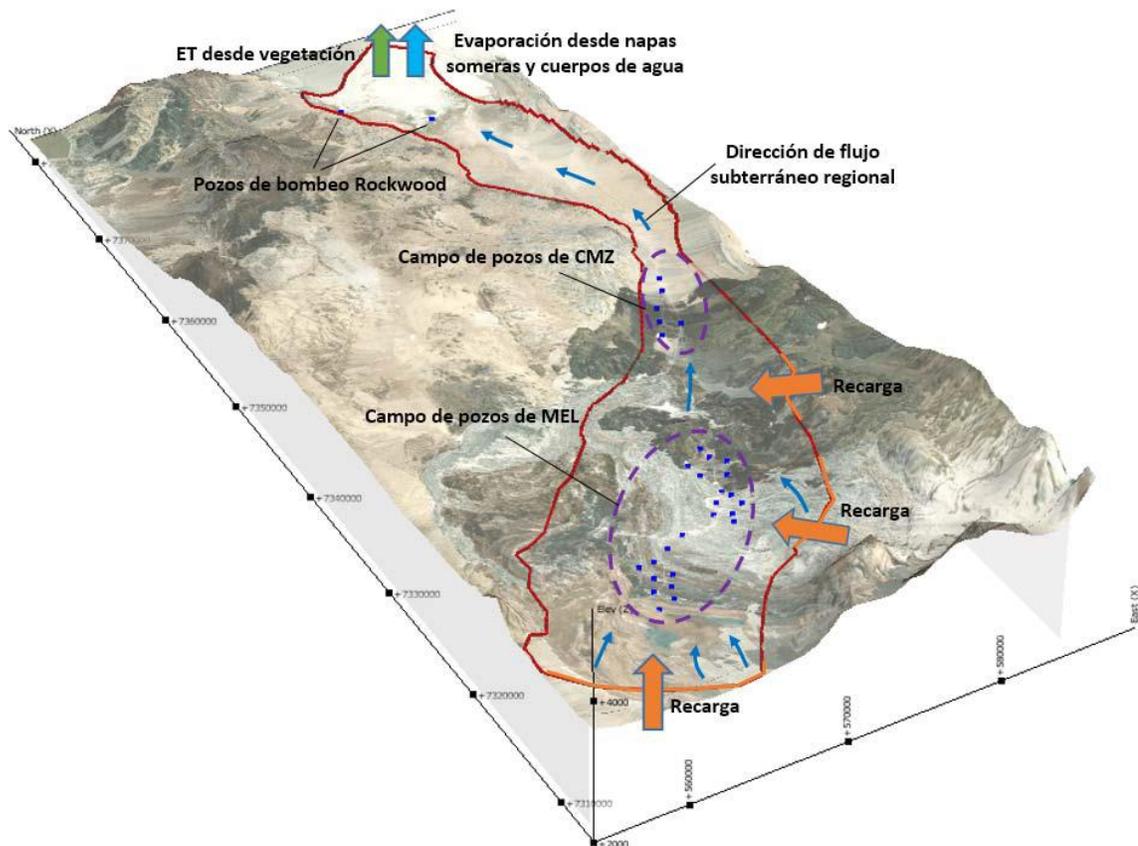


Figura 4.8 Funcionamiento del sistema hidrogeológico, acuífero MNT (Golder, 2017)

4.2.3.2 Geometría del acuífero

El sector acuífero MNT se encuentra en una cuenca alargada en dirección suroeste-noreste, limitada en superficie por rasgos geomorfológicos y estructurales. El acuífero está conformado principalmente por depósitos aluviales de muy baja a moderada consolidación de las unidades geológicas Estratos de Quebrada Salín, Estratos de Tilocalar y las Unidades Salinas de Atacama.

El acuífero está limitado en el este por las rocas intrusivas paleozoicas asociadas al Complejo ígneo-sedimentario del Cordón de Lila. Por el este se encuentra limitado por rocas que conforman los edificios volcánicos (Formación Purilactis) o por sedimentos finos con baja capacidad de transmitir agua, así como estructuras que generan bordes de muy baja conductividad hidráulica. El límite sur lo conforman rocas intrusivas y sedimentarias de la Formación Purilactis mientras que por el norte queda limitado por la zona denominada canal de disolución, que corresponde al límite donde la interfase salina alcanza la superficie generando un límite para el flujo que viene del sur (Golder, 2017). La forma y la sectorización de la zona de estudio son presentadas en la Figura 4.9.

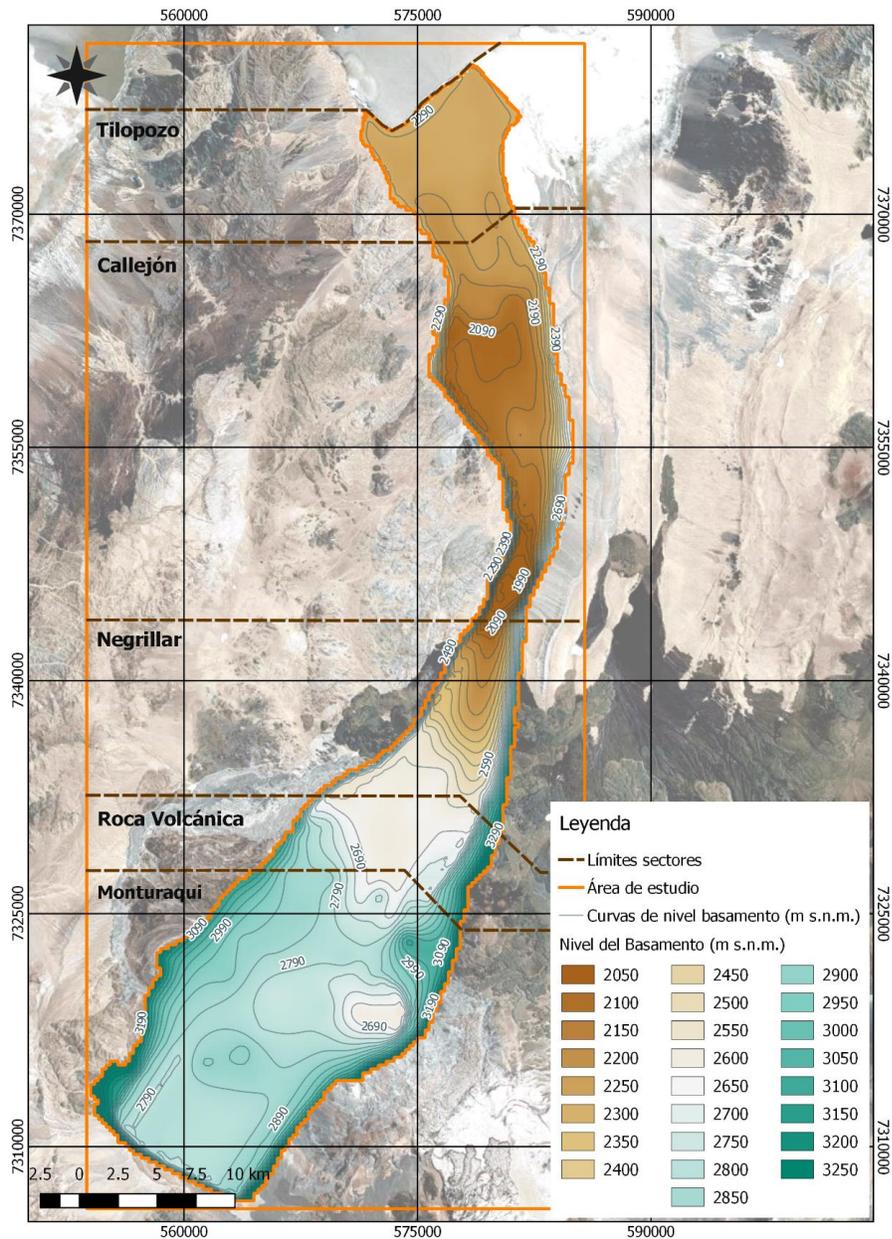


Figura 4.9 Sectorización de la zona de estudio y profundidad del basamento (Extraído de Golder, 2017).

4.2.3.3 Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos son importantes ya que permiten caracterizar las velocidades de flujo y el almacenamiento en las distintas unidades hidrogeológicas definidas en el sector. En el citado estudio (Golder, 2017) la medición de los distintos parámetros fue realizada a través de pruebas de bombeo, ensayos de permeabilidad y porosidad.

4.2.3.3.1 Transmisividad

Los valores de transmisividad (T) varían según el sector de la zona estudio. Para el sector de Monturaqui los valores se encuentran entre 100 a 750 m²/día, mientras que para el sector de Negrillar la transmisividad supera los 2000 m²/día.

4.2.3.3.2 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica (k) en el sector de Monturaqui alcanzan valores de 0,15 a 7,9 m/día mientras que en Negrillar varía entre 0,54 y 33,7 m/día. Por último, la conductividad hidráulica para los depósitos salinos del sector de Tilopozo se encuentra entre 1 y 100 m/día.

4.2.3.3.3 Porosidad eficaz

Se midieron los valores de porosidad eficaz en las unidades Salín Inferior y Superior de los sectores Monturaqui y Roca Volcánica. Los valores de porosidad eficaz de la unidad Salín Superior varían entre 11 y 29% mientras que para la unidad Salín Inferior se presenta un rango entre 4 y 37%.

4.2.3.4 Unidades hidrogeológicas (UH)

Las unidades hidrogeológicas fueron definidas a partir de las descripciones litológicas, el potencial de almacenar y transmitir agua, los parametros hidraulicos y la información geofisica.

Las siguiente unidades hidrogeológicas (Tabla 4.4) fueron integradas en un perfil SO – NE que atraviesa el sector de Monturaqui hasta el sector sur de Negrillar.

Tabla 4.4 Resumen de las unidades hidrogeológicas sector acuífero (MNT) (Elaboración propia, con datos de Golder, 2017)

Nombre (UH)	Composición	Espesor saturado	Conductividad Hidráulica	Porosidad eficaz	Ubicación en el acuífero
Depósitos salinos	Depósitos evaporíticos	Hasta 50 m	1 a 7 m/d. En algunos sectores se obtuvo 50 a 100 m/d.		Tilopozo
Gravas y cenizas	Depósitos detríticos de gravas, arenas y limos con intercalaciones de cenizas.	40 a 50 m	0,3 a 1,2 m/d. En algunos sectores se obtuvo 50 a 100 m/d.		Acuífero MNT
Ignimbrita	Estrato continuo de toba soldada		<0,5 m/d	0,1 a 5%	Acuífero MNT
Tilocalar superior	Gravas arenosas a limosas y arenas gravosas a limosas, clasto soportada y cementada por carbonatos.	30 a 50 m	1 a 5 m/d		Negrillar - Callejón - Tilopozo
Salín superior	Depósitos de arenas y cenizas poco consolidados	Hasta 100 m	Variable según el sector. Promedio de 5 a 20 m/d.	14 a 23%	Monturaqui – Roca volcánica
Tilocalar principal	Arenas gravosas a limosas con bajo grado de consolidación	200 - 250m (Callejón) 350 - 400m (Negrillar)	5 a 25 m/d	2 a 20%	Negrillar - Callejón - Tilopozo

Nombre (UH)	Composición	Espesor saturado	Conductividad Hidráulica	Porosidad eficaz	Ubicación en el acuífero
Salin Inferior	Depósitos poco a moderadamente consolidados de gravas arenosas, arenas limosas y capas de limos/cenizas.	50 a 150 m. Con un máximo de 200 m	1 a 5 m/d	2 a 15%	Monturaqui – Roca volcánica
Tilocalar Inferior	Gravas arenosas a limosas de moderada a moderada-alta consolidación.		0,1 a 5 m/d	1 a 8%	Negrillar - Callejón
Basamento	Rocas pre Cenozoicas con muy baja capacidad para transmitir agua.		<0.001 m/d	0,1 a 1%	Acuífero MNT

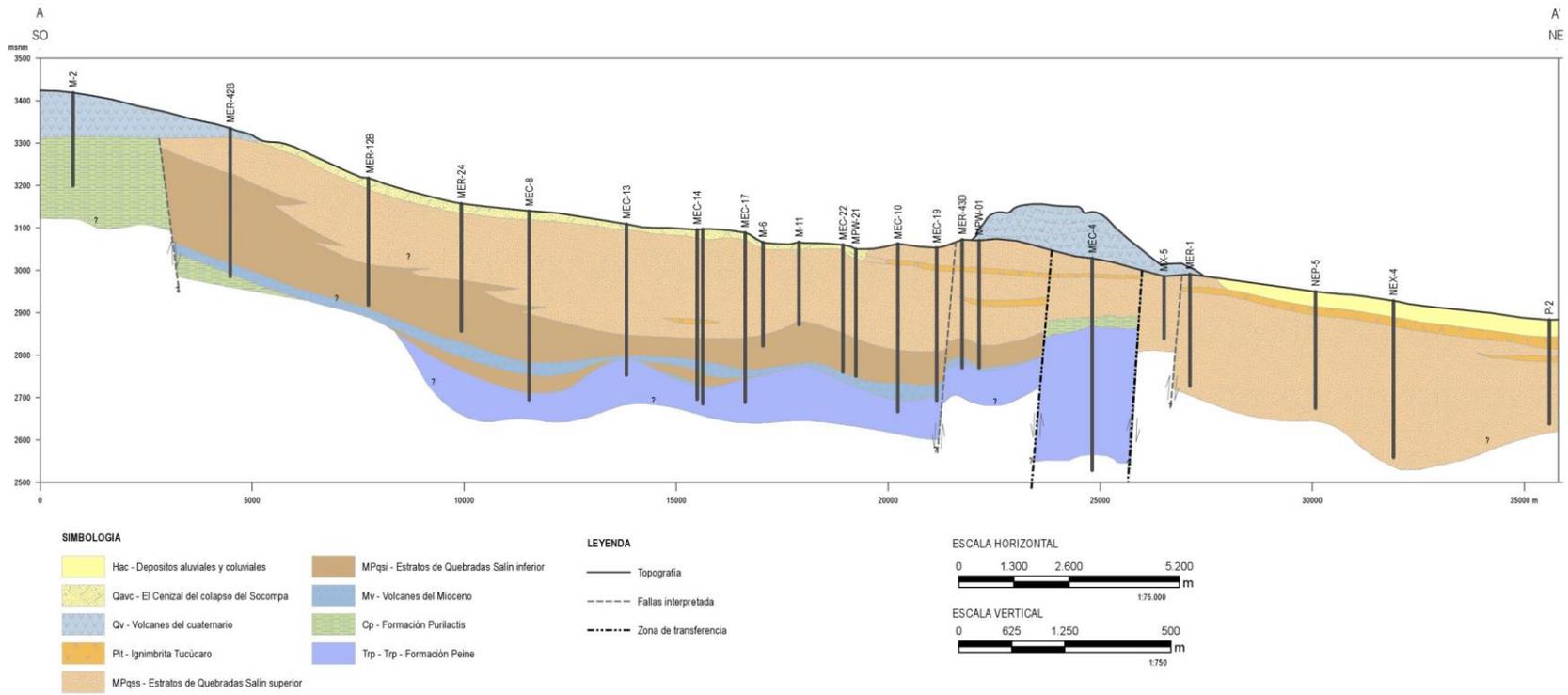


Figura 4.10 Perfil geológico longitudinal sector Monturaqui - Negrillar (Golder, 2017)

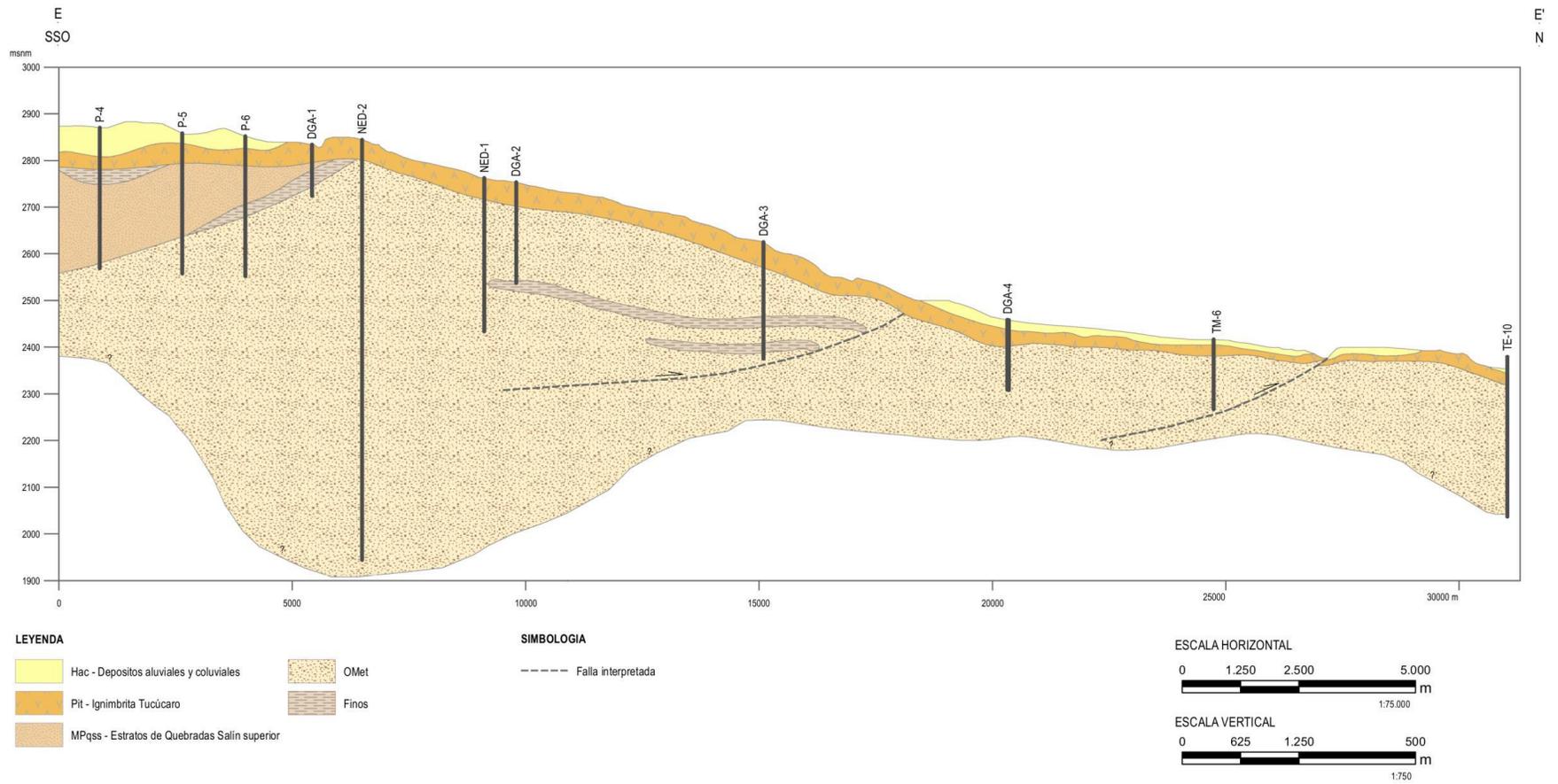
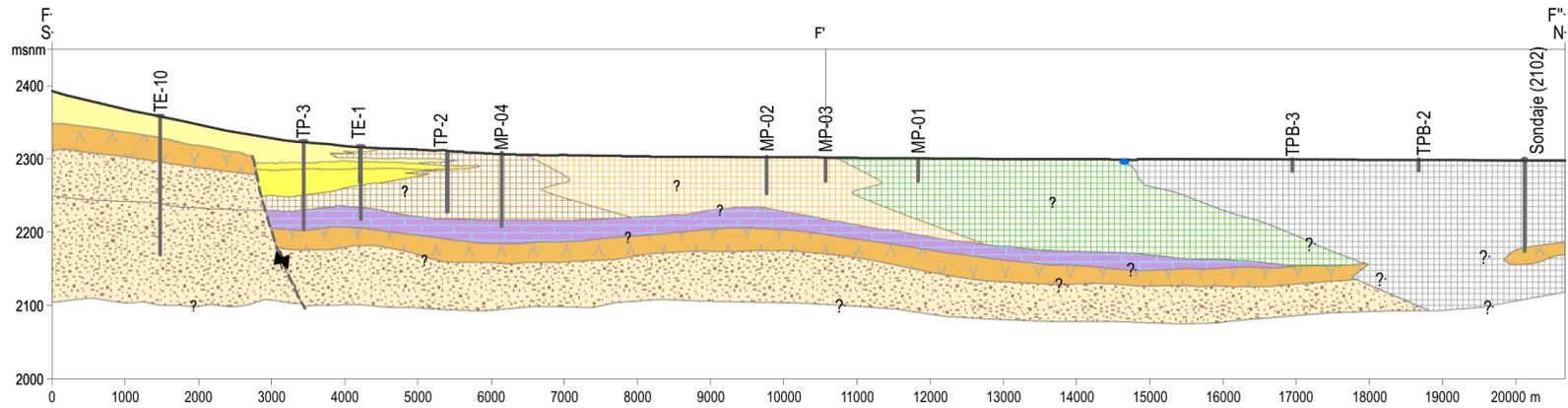


Figura 4.11 Perfil geológico longitudinal sector Callejón (Golder, 2017)



SIMBOLOGIA

- Hac - Depositos aluviales y coluviales
- Plhs(2a) - Costra clorurada limosa
- Plhs(2b) - Costra rugosa de cloruro menor limo
- Plhs(3a) - Costra de Sulfato menor cloruro
- Plhs(5a) - Costra de Hailta
- Plgm - Depósitos de gravas modernas
- Plfet - Formación El Tambo
- Pit - Ignimbrita Tucúcaro
- OMet - Estratos de Tilocalar

LEYENDA

- Topografía
- Falla interpretada

Figura 4.12 Perfil geológico longitudinal sector Tilopozo (Golder, 2017)

4.2.4 Selección de los puntos de muestreo

La red de monitoreo de las aguas subterráneas del sector acuífero MNT consiste en un total de 127 pozos distribuidos en los distintos sectores. La instalación de los pozos se realizó en distintas fechas y estuvo a cargo de varios propietarios entre los que se incluye Compañía Minera Zaldivar (CMZ), Compañía Minera Escondida (MEL) y Rockwood (RW). La Tabla 4.5 resume las estaciones de monitoreo según el sector en que se encuentran.

Tabla 4.5 Red de monitoreo del acuífero MNT (Golder, 2017)

Sector	Zona	Propietario	Estaciones de monitoreo	Cantidad
Monturaqui	Sur	MEL	M(8A,16,17,20,24,25,3) MEP (2) / MX (1,2,3,6) MER(5,11,12B,21-2,22,24) MPW(16,17,18,19,20,22,23A,24,25)	27
	Centro	MEL	M (4, 5, 6, 7, 21A, 28) / MX (7) MER (16-1, 16-2, 19/2A, 23) MPW (08, 09, 10, 11, 12, 13, 14, 15)	19
	Norte	MEL	M (14,22) / MER (14, 15-3, 20, 3) MPW (01, 02, 03, 04, 05, 07, 21)	13
Roca Volcánica		CMZ	MEP (1) /MX (4, 5) / NEP (6)	4
Negrillar	Sur	CMZ	NEP (1, 3, 11)	3
	Norte	CMZ	P (1, 2, 3, 4, 5, 6) NEP (2,7,8, 9, 10)	11
Callejón	Sur	MEL	TM (6)	1
		RW	TE (8)	1
	Norte	MEL	TM (1)/ TP (1,3)/ TE (7)	4
		RW	TE (1)/ TM (2)	2
Tilopozo		MEL	PZ (2,3B,4,5A,7,8,9,10,12,13B,16) TE (4)/ TPZ (12)/ TPDV (2)/ TP (2)	15
		RW	MP (01A, 01B, 02A, 02B, 03A, 03B, 04A, 04B, 05A, 05B, 06A, 06B) PZ (16A)/ TPDV (9)/ TPZ (1A) HH (1)	16
Salar		MEL	TPB (2, 3, 4, 5, 6)/ TPDV (8)	6
		RW	CL (6)/ PN (14B, 16B)/ P (02, 05)	5
Total de estaciones de monitoreo				127

De la red de monitoreo se analizaron los parámetros fisicoquímicos como el pH, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, temperatura y alcalinidad total (solo para los sectores de Callejón, Tilopozo y Salar) en todos los pozos, así como los elementos mayores: calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg), sodio (Na), cloruro (Cl), sulfato (SO₄) y bicarbonato (HCO₃).

El análisis de los otros elementos minoritarios varía según el sector, la Tabla 4.6 resume la presencia de los elementos reportados según el sector.

Tabla 4.6 Elementos minoritarios registrados según sector (Golder, 2017)

	Monturaqui	Roca Volcánica y Negrillar	Callejón, Tilopozo y Salar
Al			X
As	X	X	X
B	X	X	
Ba			X
Cd	X	X	
Cu	X	X	
F	X	X	X
Fe (II)	X		
Fe (III)	X		
Fe total	X	X	X
Hg total	X	X	
Li			X
Mn	X	X	X
Mo	X		
NO ₃		X	X
Pb	X	X	
SiO ₂	X	X	
Sr	X	X	X
Zn	X	x	

El muestreo de calidad de agua fue realizado por la empresa Investigaciones Mineras & Geológicas (IMG). Se tomó una muestra representativa de los pozos de producción teniendo en consideración que estos deben guardarse en envases fríos, bien sellados y protegidos de la luz.

Los parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y potencial redox) fueron medidos en terreno con un medidor multiparámetros previamente calibrado.

Posteriormente, para las muestras del sector de Monturaqui, las muestras obtenidas para calidad fueron enviadas al laboratorio SGS, Chile para el análisis de los parámetros solicitados, mientras que las muestras de los sectores Callejón, Tilopozo y Salar fueron enviadas a los laboratorios ALS Enviromental Antofagasta para el análisis de nutrientes y ActLabs para el análisis de cationes, aniones y metales.

5 RESULTADOS

5.1 Resultados caso 1

Debido a la gran escala de trabajo de este caso se decidió trabajar con el programa ArcGis para integrar de mejor manera la información. En primer lugar, se trabajó con el shapefile de la mapoteca digital de la Dirección General de Aguas Acuíferos_estudiados_2017. Este shapefile contiene información de los acuíferos del país separados por distintas categorías: región, sector, cuenca, etc.

Con respecto a la sectorización, en este caso se trabajó a escala de acuífero debido a que se buscar mantener características geológicas e hidrogeológicas homogéneas para un mismo conjunto de datos.

Se utilizó la herramienta Dissolve del ArcGis para unir todos los polígonos que caracterizan los distintos acuíferos y posteriormente se cruzó la información con los puntos de los distritos estudios con la herramienta Clip e intersect.

De los 642 datos existían 18 datos (13 pozos) que se encontraban fuera del shapefile, por lo que fueron excluidos de la base de datos por no estar considerados dentro de ningún sector acuífero.

Posteriormente se analizó la densidad de pozos por acuífero (Tabla 5.1) y se decidió trabajar solo con los sectores que tuvieran una densidad de pozos menor a 200 km²/pozo, es decir, una condición regular u óptima para un acuífero sustentable sin intrusión salina según la Tabla 3.1.

Tabla 5.1 Densidad de pozos por acuífero

Acuífero	Región	Datos	Pozos	Área km ²	Área km ² /pozo
Limarí	IV	74	56	11705.1	209.02
Quillimarí	IV	3	3	741.6	247.20
Choapa	IV	33	29	7635.5	263.29
Culebrón Lagunillas	IV	2	2	785.1	392.55
Elqui	IV	29	23	9725.3	422.84
Los Choros	IV	4	4	4188.0	1047.00
Maipo	RM	176	91	8422.0	92.55
Alhué	RM	12	6	1454.9	242.48
Estero El Rosario	V	4	4	255.6	63.90
Casablanca	V	4	4	377.7	94.43
Estero Puchuncavi	V	1	1	110.2	110.20
Estero Cartagena	V	2	2	237.0	118.50
Quintero	V	2	2	247.0	123.50
Catapilco	V	2	2	307.8	153.90
Estero Guaquén	V	1	1	163.1	163.10
Estero Laguna Verde	V	1	1	204.1	204.10

Acuífero	Región	Datos	Pozos	Área km ²	Área km ² /pozo
Yali	V	5	3	771.8	257.27
Aconcagua	V	19	19	7312.6	384.87
Petorca	V	5	5	1982.3	396.46
La Ligua	V	5	5	2054.2	410.84
Estero Viña del Mar	V	1	1	424.1	424.10
Cachapoal	VI	63	62	2866.8	46.24
Pupuya	VI	1	1	50.1	50.10
Laguna de Cahuil	VI	1	1	99.0	99.00
Tinguiririca	VI	34	34	3785.7	111.34
Topocalma	VI	1	1	138.0	138.00
Paredones	VI	1	1	222.5	222.50
Rio Rapel antes junta estero Rosario	VI	1	1	376.1	376.10
Topopalma	VI	1	1	393.8	393.80
Maule Medio	VII	90	88	11079.0	125.90
Mataquito	VII	45	45	6407.1	142.38
Cauquenes	VII	1	1	1568.3	1568.30

Basándose en el criterio de la Tabla 3.1 se decidió trabajar con los acuíferos que tuvieran una densidad de pozos menor a 200 km²/pozo, por lo tanto, se eliminaron los datos de los acuíferos Quillimarí, Culebrón Lagunillas, Los Choros, Alhué, Estero Puchuncaví, Estero Guaquen, Estero Laguna Verde, Yali, Petorca, La Ligua, Estero Viña del Mar, Laguna de Cahuil, Topocalma, Paredones, Rio Rapel antes junta estero Rosario, Topopalma y Cauquenes. Para este caso, se consideró trabajar con los datos de los acuíferos Limarí, Choapa, Aconcagua y Elqui a pesar de tener una densidad deficiente, debido a que tenían un número importante de pozos en comparación con los acuíferos que fueron eliminados.

5.1.1 Determinación de la condición de calidad natural según metodología de Wendland et al (2003)

Una vez construida la base de datos, se procedió a eliminar los datos duplicados y los que no cumplieran con el criterio del balance iónico. Wendland no especifica el error mínimo aceptable para el balance iónico por lo que, como se mencionó en el capítulo 3, se aceptará un error de 10%, al igual como lo hace la metodología de Müller et al. (2006). Se eliminaron 93 datos (16,1% del total) por no cumplir con tener un balance iónico menor al 10% o por ser datos duplicados. La Tabla 5.2 resume la cantidad de datos que serán utilizados para determinar la condición de calidad natural por acuífero.

Tabla 5.2 Datos utilizados para determinar calidad natural (Wendland), caso 1 (Elaboración propia)

Acuífero	Región	Datos	Datos con error en balance iónico > 10%	Datos para determinar Calidad Natural
Choapa	IV	33	1	32
Elqui	IV	29	0	29
Limarí	IV	74	3	71
Maipo	RM	176	0	176
Aconcagua	V	19	0	19
Casablanca	V	4	0	4
Catapilco	V	2	0	2
Estero Cartagena	V	2	0	2
Estero El Rosario	V	4	0	4
Quintero	V	2	0	2
Cachapoal	VI	63	1	62
Tinguiririca	VI	34	0	34
Mataquito	VII	45	16	29
Maule Medio	VII	90	72	18
Total		577	93	484

Posteriormente se describirán los datos estadísticamente según el ion a analizar y por acuífero definido. También se calculará el percentil 90 de los datos el cual corresponderá al límite superior de la calidad natural definida por la metodología de Wendland.

A pesar de que en el capítulo 3 (etapa 4) se recomienda trabajar con dos grupos de parámetros, para este caso se decidió trabajar con los iones Cl, Na, K, Mg, NO₃ y SO₄ ya que corresponden a aquellos iones que pueden estar asociados a un efecto antrópico según Custodio y Llamas (1976). La Tabla 5.3 muestra el valor del percentil 90 al cual se le asocia el límite superior de la condición de línea base por sector acuífero. La descripción estadística por elementos se encuentra detallada en la Tabla 9.1 en anexos.

Tabla 5.3 Resultados de la metodología de Wendland, caso 1 (Elaboración propia)

CI	Acuífero			K	Acuífero			NO ₃	Acuífero		
	Nº	P90 [mg/L]			Nº	P90 [mg/L]			Nº	P90 [mg/L]	
	Choapa	32	54.5		Choapa	32	3.01		Choapa	32	12.37
	Elqui	29	148.6		Elqui	29	4.14		Elqui	29	40
	Limarí	71	482.4		Limarí	71	5.7		Limarí	71	26.4
	Maipo	176	217		Maipo	176	5.37		Maipo	176	52.25
	Aconcagua	19	83.4		Aconcagua	19	3.96		Aconcagua	19	38.98
	Casablanca	4	44.56		Casablanca	4	2.13		Casablanca	4	50.91
	Catapilco	2	210.9		Catapilco	2	1.89		Catapilco	2	18.47
	Estero Cartagena	2	239.6		Estero Cartagena	2	3.56		Estero Cartagena	2	40.68
	Estero El Rosario	4	100.51		Estero El Rosario	4	2.87		Estero El Rosario	4	20.87
	Quintero	2	150.74		Quintero	2	2.02		Quintero	2	17.56
	Cachapoal	62	68.63		Cachapoal	62	3.98		Cachapoal	62	42.38
	Tinguiririca	34	52.84		Tinguiririca	34	5		Tinguiririca	34	37.79
	Mataquito	29	55.89		Mataquito	29	5.4		Mataquito	29	26.26
	Maule Medio	18	32.02		Maule Medio	18	5.59		Maule Medio	18	39.5
Na	Acuífero			Mg	Acuífero			SO ₄	Acuífero		
	Nº	P90 [mg/L]			Nº	P90 [mg/L]			Nº	P90 [mg/L]	
	Choapa	32	112.74		Choapa	32	29.51		Choapa	32	119.94

Acuífero	Nº	P90 [mg/L]	Acuífero	Nº	P90 [mg/L]	Acuífero	Nº	P90 [mg/L]
Elqui	29	157.46	Elqui	29	36.3	Elqui	29	280.04
Limarí	71	302.7	Limarí	71	79.5	Limarí	71	457.8
Maipo	176	107	Maipo	176	59.85	Maipo	176	403
Aconcagua	19	66.74	Aconcagua	19	43.26	Aconcagua	19	238.48
Casablanca	4	33.41	Casablanca	4	23.5	Casablanca	4	16.01
Catapilco	2	100.43	Catapilco	2	28.31	Catapilco	2	63.46
Estero cartagena	2	147.97	Estero cartagena	2	60.8	Estero cartagena	2	275.94
Estero El Rosario	4	61.12	Estero El Rosario	4	28.72	Estero El Rosario	4	27.63
Quintero	2	116.3	Quintero	2	29.77	Quintero	2	129.44
Cachapoal	62	51.99	Cachapoal	62	41.64	Cachapoal	62	207.6
Tinguiririca	34	32.81	Tinguiririca	34	30.19	Tinguiririca	34	157.22
Mataquito	29	23.96	Mataquito	29	17.96	Mataquito	29	118.24
Maule Medio	18	40.37	Maule Medio	18	23.83	Maule Medio	18	40.91

5.1.2 Determinación de la condición de calidad natural según la metodología de Müller et al (2006)

Una vez construida la base de datos, se procedió a eliminar los datos duplicados y los que no cumplieran con el criterio del balance iónico. Müller y colaboradores (2006) señalan que se puede aceptar un error de hasta un 10%. Se eliminaron 93 datos (16% del total) por no cumplir con este criterio o por ser duplicados.

Posteriormente se eliminaron las filas (pozos) que contuvieran datos que no cumplieran los criterios de preselección, siendo el criterio más importante el que señala que la concentración de nitrato (NO_3^-) no sea mayor a 10 mg/L y en segundo lugar que la concentración de $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ no fuera mayor a 1000 mg/L. Debido a estos criterios se eliminaron 333 datos (57.1% del total).

La Tabla 5.4 resume la cantidad de datos que fueron eliminados por los distintos criterios y el número que fue utilizado para determinar la condición de línea base.

Tabla 5.4 Datos utilizados para determinar calidad natural (Müller et al., 2006), caso 1 (Elaboración propia)

Acuífero	Región	Datos	Datos con error en balance iónico > 10%	Datos eliminados por criterio preselección	Datos para determinar Calidad Natural
Choapa	IV	33	1	4	28
Elqui	IV	29	0	20	9
Limarí	IV	74	3	28	43
Maipo	RM	176	0	137	39
Aconcagua	V	19	0	15	4
Casablanca	V	4	0	4	0
Catapilco	V	2	0	2	0
Estero Cartagena	V	2	0	2	0
Estero El Rosario	V	4	0	2	2
Quintero	V	2	0	2	0
Cachapoal	VI	63	1	54	8
Tinguiririca	VI	34	0	31	3

Acuífero	Región	Datos	Datos con error en balance iónico > 10%	Datos eliminados por criterio preselección	Datos para determinar Calidad Natural	para Calidad
Mataquito	VII	45	16	20		9
Maule Medio	VII	90	72	12		6
Total		577	93	333		151

Posteriormente, al igual que con la metodología de Wendland et al.(2003), se describirán los datos estadísticamente según el ion a analizar y por acuífero definido. Müller et al. (2006) señalan que el límite superior de la calidad natural queda determinado por el percentil 90 o 97.7, según la cantidad de datos. Sin embargo, como en este caso ninguno de los acuíferos posee más de 60 datos, se considera que la información es poco robusta y que la calidad natural quedará definida por el percentil 90.

Los iones analizados fueron los mismos que fueron estudiados para la metodología de Wendland et al. (2003). La Tabla 5.5 muestra el valor del percentil 90 al cual se le asocia el límite superior de la condición de línea base por sector acuífero. La descripción estadística por elementos se encuentra detallada en la Tabla 9.2 en anexos.

Tabla 5.5 Resultados de la metodología de Müller, caso 1 (Elaboración propia)

Cl ⁻	Acuífero	Nº	P90 [mg/L]	K ⁺	Acuífero	Nº	P90 [mg/L]	NO ₃ ⁻	Acuífero	Nº	P90 [mg/L]
		Choapa	28		56.45		Choapa		28	2.20	
	Elqui	9	93.20		Elqui	9	3.60		Elqui	9	6.46
	Limarí	43	230.00		Limarí	43	3.80		Limarí	43	7.18
	Maipo	39	138.00		Maipo	39	3.74		Maipo	39	8.97
	Aconcagua	4	70.73		Aconcagua	4	1.09		Aconcagua	4	7.75
	Estero El Rosario	2	96.40		Estero El Rosario	2	3.01		Estero El Rosario	2	4.78
	Cachapoal	8	47.06		Cachapoal	8	2.33		Cachapoal	8	9.13
	Tinguiririca	3	47.50		Tinguiririca	3	4.69		Tinguiririca	3	8.80
	Mataquito	9	50.95		Mataquito	9	4.52		Mataquito	9	8.07
	Maule Medio	6	21.94		Maule Medio	6	5.64		Maule Medio	6	7.10
Na ⁺	Acuífero	Nº	P90 [mg/L]	Mg ⁺²	Acuífero	Nº	P90 [mg/L]	SO ₄ ⁻²	Acuífero	Nº	P90 [mg/L]
		Choapa	28		118.00		Choapa		28	28.70	
	Elqui	9	159.40		Elqui	9	47.16		Elqui	9	444.18
	Limarí	43	170.16		Limarí	43	55.52		Limarí	43	378.87
	Maipo	39	77.76		Maipo	39	22.90		Maipo	39	300.60
	Aconcagua	4	52.85		Aconcagua	4	43.63		Aconcagua	4	442.06
	Estero El Rosario	2	59.29		Estero El Rosario	2	18.40		Estero El Rosario	2	26.88
	Cachapoal	8	68.25		Cachapoal	8	25.36		Cachapoal	8	149.37
	Tinguiririca	3	40.28		Tinguiririca	3	22.42		Tinguiririca	3	150.00
	Mataquito	9	17.03		Mataquito	9	13.02		Mataquito	9	88.09
	Maule Medio	6	35.75		Maule Medio	6	12.91		Maule Medio	6	19.49

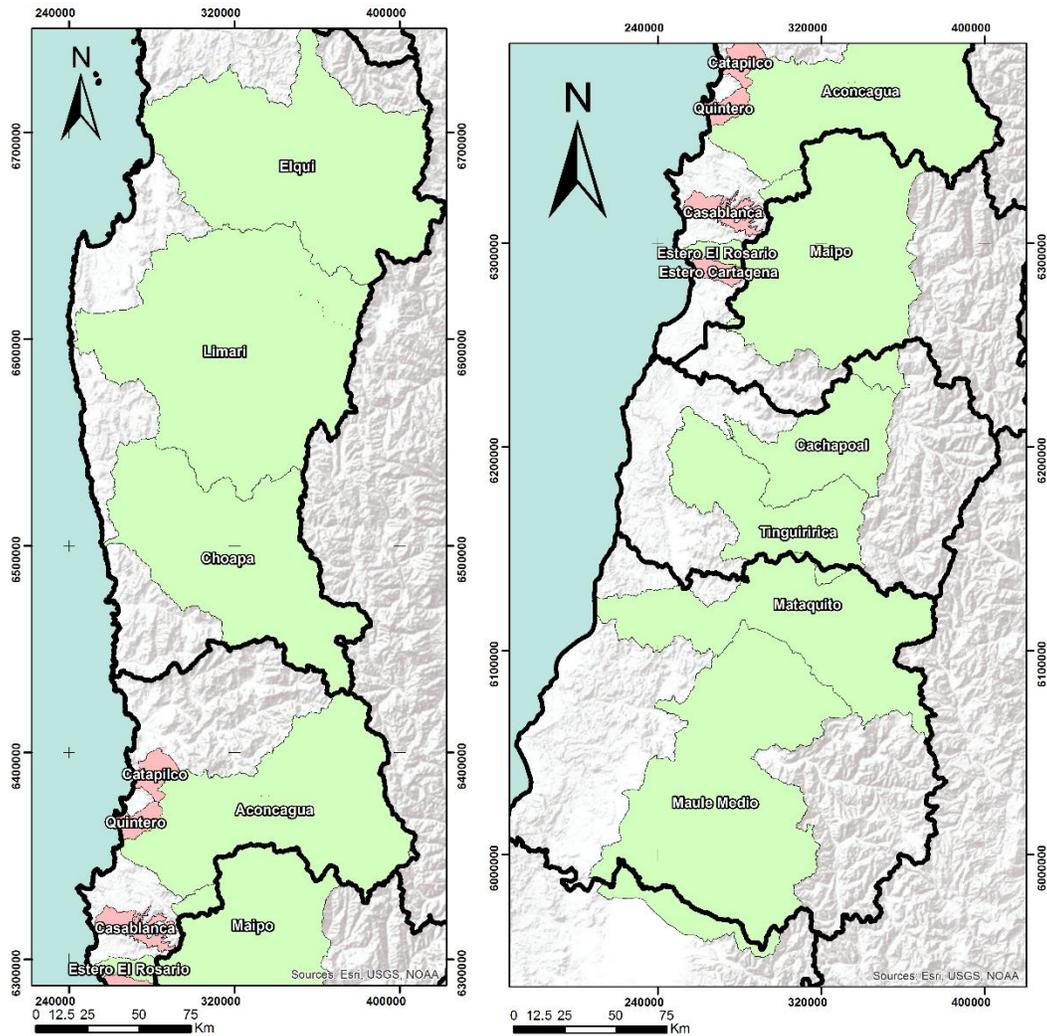


Figura 5.1 Acuíferos estudiados para el caso 1, con rojo aquellos acuíferos estudiados con la metodología de Wendland et al. (2003) y con verde los acuíferos estudiados por ambas metodologías (Elaboración propia)

5.1.3 Análisis por profundidad

Es esperable que las características de los sectores acuíferos estudiados no sean las mismas a medida que varía la profundidad. Es por eso que se decidió determinar la condición de calidad natural para un mismo acuífero según la profundidad y ver como varían con los resultados obtenidos en la Tabla 5.3 y Tabla 5.5.

Sin embargo, no todos los acuíferos seleccionados anteriormente contaban con suficientes datos de profundidad, por lo que se decidió trabajar con los datos del acuífero de Choapa y Limarí.

De acuerdo con DGA (1986), los acuíferos Choapa y Limarí corresponden a acuíferos sedimentarios rellenos por gravas, ripio o arena. La profundidad del nivel estático para el caso del acuífero del Choapa es cercana a los 5 m, mientras que para el río Limarí es cercano a los 10m. El espesor de las respectivas unidades sedimentarias no supera los 20m para el acuífero del río Choapa y para el acuífero del río Limarí no es mayor a 15m.

Para determinar la calidad natural por acuífero se utilizó la metodología de Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006), descritas en el capítulo 2 y aplicadas según se indica en el capítulo 3. La Tabla 5.6 muestra los resultados obtenidos por ion y por acuífero según profundidad.

Tabla 5.6 Resultados de calidad natural para acuíferos Choapa y Limarí por profundidad y por metodología (Elaboración propia)

Wendland								
Acuífero	Profundidad	N°	P ₉₀ Cl (mg/L)	P ₉₀ Na (mg/L)	P ₉₀ K (mg/L)	P ₉₀ Mg (mg/L)	P ₉₀ NO ₃ ⁻ (mg/L)	P ₉₀ SO ₄ ⁻² (mg/L)
Choapa	1-20m	13	86.96	155.54	3.07	38.89	7.93	126.00
	20-100m	18	38.60	51.44	2.40	26.73	14.48	104.10
Limarí	1-15m	24	320.60	275.88	7.69	73.44	21.87	372.30
	15-100m	47	529.10	300.12	5.34	79.48	27.00	422.54
Müller								
Acuífero	Profundidad	N°	P ₉₀ Cl (mg/L)	P ₉₀ Na (mg/L)	P ₉₀ K (mg/L)	P ₉₀ Mg (mg/L)	P ₉₀ NO ₃ ⁻ (mg/L)	P ₉₀ SO ₄ ⁻² (mg/L)
Choapa	1-20m	12	91.02	160.23	3.18	40.17	6.75	126.00
	20-100m	15	33.20	46.14	2.02	14.96	7.89	90.82
Limarí	1-15m	13	41.70	65.98	2.34	70.46	3.08	456.86
	15-100m	30	236.65	171.97	3.91	53.58	8.06	308.31

5.1.4 Análisis por tipo de acuífero (litología)

Por último, se hizo un análisis de como variaban los valores asociados a la calidad natural según el tipo de litología señalado por el shapefile de la DGA. En general, la mayoría de los datos de los acuíferos estudiados se encontraban en depósitos no consolidados. Es por eso que se decidió trabajar con el acuífero Limarí (Tabla 5.7) y Maipo (Tabla 5.8) ya que estos acuíferos eran los que presentaban mayor cantidad de datos disponibles sobre los distintos tipos de litologías definidas.

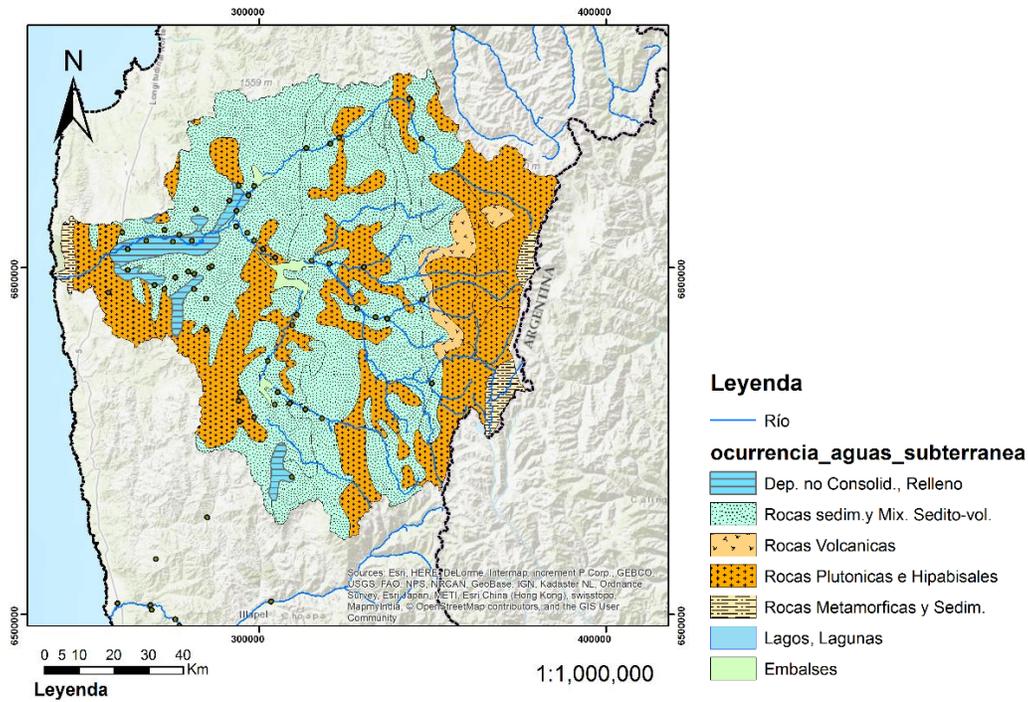


Figura 5.2 Acuífero Limarí según unidades hidrogeológicas 1:1000000 (Elaboración propia con shapefile de la DGA)

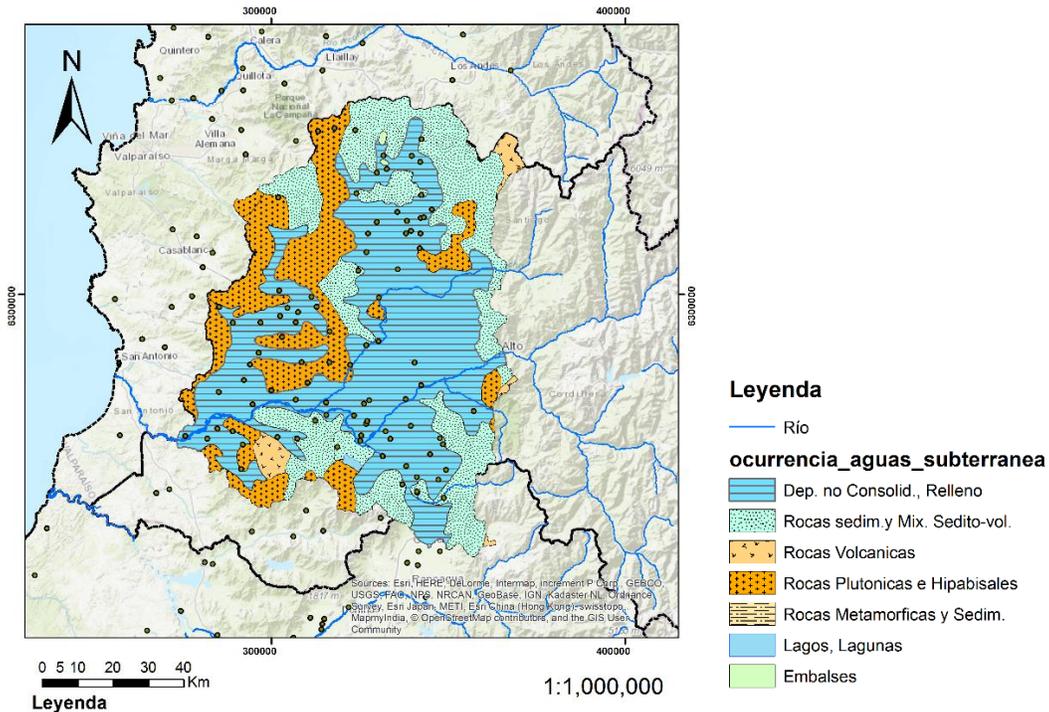


Figura 5.3 Acuífero Maipo según unidades hidrogeológicas 1:1000000 (Elaboración propia con shapefile de la DGA)

Tabla 5.7 Resultados de calidad natural acuíferos Limarí por litología del acuífero y por metodología (Elaboración propia)

Wendland		Percentil 90					
Tipo de acuífero	N°	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)
Depósitos no Consolidados	10	751.01	366.69	7.61	105.96	12.75	465.70
Rocas Plutónicas e Hipabisales	21	232.21	170.70	6.50	59.30	16.50	298.23
Rocas sedimentarias y sedimentario-volcánicas	40	297.14	186.40	4.25	51.61	28.36	259.37
Müller		Percentil 90					
Tipo de acuífero	N°	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)
Depósitos no Consolidados	5	529.10	328.70	5.70	74.60	5.05	457.80
Rocas Plutónicas e Hipabisales	14	230.00	163.43	3.10	72.47	4.64	459.35
Rocas sedimentarias y sedimentario-volcánicas	24	76.08	86.06	2.44	29.29	8.53	227.83

Tabla 5.8 Resultados de calidad natural acuíferos Maipo por litología del acuífero y por metodología (Elaboración propia)

Wendland		Percentil 90					
Tipo de acuífero	N°	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)
Depósitos no Consolidados	136	230.50	110.00	5.48	61.50	49.65	437.00
Rocas Plutónicas e Hipabisales	21	198.00	86.70	4.15	61.60	57.50	335.00
Rocas sedimentarias y sedimentario-volcánicas	19	81.84	61.00	1.94	28.46	42.24	279.40
Müller		Percentil 90					
Tipo de acuífero	N°	Cl ⁻ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ⁺² (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁻² (mg/L)
Depósitos no Consolidados	28	118.40	82.23	3.41	22.95	8.10	279.10
Rocas Plutónicas e Hipabisales	5	53.48	27.48	1.62	22.00	9.38	81.78
Rocas sedimentarias y sedimentario-volcánicas	6	140.00	72.50	3.80	22.00	7.46	306.00

5.1.5 Comentarios Caso 1

A pesar de que los datos obtenidos para este caso se caracterizan por estar bien distribuidos a lo largo de los distintos acuíferos estudiados, la representatividad temporal de estos datos es deficiente, incluso llegando a tener pozos que solo tienen un muestreo.

Es deseable que la base de datos para determinar tanto la condición calidad natural sea robusta en temporalidad y espacialidad para poder obtener mejores resultados. Debido a lo anteriormente mencionado, se decidió que para este caso no se puede determinar la condición de línea base con la metodología propuesta. Ante la necesidad de un valor de línea base, se sugiere el uso de otras metodologías o herramientas estadísticas que permitan llegar a un valor determinado.

Con respecto a los resultados obtenidos, la Tabla 5.9 muestra una comparación entre los resultados de calidad natural obtenidos para un mismo acuífero con la metodología de Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006).

Tabla 5.9 Comparación de resultados entre ambas metodologías (Elaboración propia)

	Acuífero	Nº	P ₉₀ [mg/L]	Nº	P ₉₀ [mg/L]	Variación % Wendland vs Müller		Acuífero	Nº	P ₉₀ [mg/L]	Nº	P ₉₀ [mg/L]	Variación % Wendland vs Müller
Cl ⁻	Choapa	32	54.50	28	56.45	-3.45	Mg ⁺²	Choapa	32	29.51	28	28.70	2.82
	Elqui	29	148.60	9	93.20	59.44		Elqui	29	36.30	9	47.16	-23.03
	Limarí	71	482.40	43	230.00	109.74		Limarí	71	79.50	43	55.52	43.18
	Maipo	176	217.00	39	138.00	57.25		Maipo	176	59.85	39	22.90	161.35
	Aconcagua	19	83.40	4	70.73	17.91		Aconcagua	19	43.26	4	43.63	-0.85
	Casablanca	4	44.56	0	-	-		Casablanca	4	23.50	0	-	-
	Catapilco	2	210.90	0	-	-		Catapilco	2	28.31	0	-	-
	Estero cartagena	2	239.60	0	-	-		Estero cartagena	2	60.80	0	-	-
	Estero El Rosario	4	100.51	2	96.40	4.26		Estero El Rosario	4	28.72	2	18.40	56.09
	Quintero	2	150.74	0	-	-		Quintero	2	29.77	0	-	-
	Cachapoal	62	68.63	8	47.06	45.84		Cachapoal	62	41.64	8	25.36	64.20
	Tinguiririca	34	52.84	3	47.50	11.24		Tinguiririca	34	30.19	3	22.42	34.66
	Mataquito	29	55.89	9	50.95	9.70		Mataquito	29	17.96	9	13.02	37.95
Maule Medio	18	32.02	6	21.94	45.96	Maule Medio	18	23.83	6	12.91	84.61		
Na ⁺	Choapa	32	112.74	28	118.00	-4.46	NO ₃ ⁻	Choapa	32	12.37	28	7.80	58.70
	Elqui	29	157.46	9	159.40	-1.22		Elqui	29	40.00	9	6.46	519.58
	Limarí	71	302.70	43	170.16	77.89		Limarí	71	26.40	43	7.18	267.69
	Maipo	176	107.00	39	77.76	37.60		Maipo	176	52.25	39	8.97	482.50
	Aconcagua	19	66.74	4	52.85	26.28		Aconcagua	19	38.98	4	7.75	402.97
	Casablanca	4	33.41	0	-	-		Casablanca	4	50.91	0	-	-
	Catapilco	2	100.43	0	-	-		Catapilco	2	18.47	0	-	-
	Estero cartagena	2	147.97	0	-	-		Estero cartagena	2	40.68	0	-	-
	Estero El Rosario	4	61.12	2	59.29	3.09		Estero El Rosario	4	20.87	2	4.78	336.61
	Quintero	2	116.30	0	-	-		Quintero	2	17.56	0	-	-
	Cachapoal	62	51.99	8	68.25	-23.82		Cachapoal	62	42.38	8	9.13	364.18
	Tinguiririca	34	32.81	3	40.28	-18.55		Tinguiririca	34	37.79	3	8.80	329.43
	Mataquito	29	23.96	9	17.03	40.67		Mataquito	29	26.26	9	8.07	225.62
Maule Medio	18	40.37	6	35.75	12.95	Maule Medio	18	39.50	6	7.10	456.66		
K ⁺	Choapa	32	3.01	28	2.20	36.82	SO ₄ ⁻²	Choapa	32	119.94	28	108.78	10.26
	Elqui	29	4.14	9	3.60	15.00		Elqui	29	280.04	9	444.18	-36.95
	Limarí	71	5.70	43	3.80	50.00		Limarí	71	457.80	43	378.87	20.83
	Maipo	176	5.37	39	3.74	43.43		Maipo	176	403.00	39	300.60	34.07
	Aconcagua	19	3.96	4	1.09	263.34		Aconcagua	19	238.48	4	442.06	-46.05
	Casablanca	4	2.13	0	-	-		Casablanca	4	16.01	0	-	-
	Catapilco	2	1.89	0	-	-		Catapilco	2	63.46	0	-	-
	Estero cartagena	2	3.56	0	-	-		Estero cartagena	2	275.94	0	-	-
	Estero El Rosario	4	2.87	2	3.01	-4.71		Estero El Rosario	4	27.63	2	26.88	2.79
	Quintero	2	2.02	0	-	-		Quintero	2	129.44	0	-	-
	Cachapoal	62	3.98	8	2.33	70.82		Cachapoal	62	207.60	8	149.37	38.98
	Tinguiririca	34	5.00	3	4.69	6.70		Tinguiririca	34	157.22	3	150.00	4.81

Acuífero	Nº	P ₉₀ [mg/L]	Nº	P ₉₀ [mg/L]	Variación % Wendland vs Müller	Acuífero	Nº	P ₉₀ [mg/L]	Nº	P ₉₀ [mg/L]	Variación % Wendland vs Müller
Mataquito	29	5.40	9	4.52	19.57	Mataquito	29	118.24	9	88.09	34.23
Maule	18	5.59	6	5.64	-0.82	Maule	18	40.91	6	19.49	109.88
Medio						Medio					

Hay que señalar que, debido a los criterios de preselección, la metodología de Müller et al. (2006) analiza menos acuíferos que la metodología de Wendland et al. (2003).

En general las diferencias porcentuales más significativas entre ambas metodologías se registran para el análisis de nitrato (NO₃⁻), esto debido a que fue el principal criterio de preselección por el cual fueron eliminados los datos por la metodología de Müller et al. (2006). Los mayores valores asociados a la calidad natural (P90) se encuentran asociado a aquellos acuíferos que presentan mayores coeficientes de variación, es decir, existe una relación directa entre estos dos elementos. El único ion donde no ocurre esto es para los nitratos donde la relación es inversa.

El acuífero Choapa y Tinguiririca son los que presentan menor diferencia entre los resultados de calidad natural entre ambas metodologías.

Cuando para un mismo acuífero existan diferencias entre la litología predominante, es fundamental determinar la condición calidad natural según los distintos tipos de litologías. En este caso se analizaron los datos del acuífero Limarí y Maipo se obtuvo que los valores asociados a la calidad natural variaban de acuerdo a la agrupación de la litología. En general, los depósitos no consolidados concentraban los valores más altos, en comparación a las litologías volcánicas o volcano-sedimentarias.

En coherencia con lo anterior, también debe separarse según la profundidad en que son tomados los datos. Ya que la determinación de la calidad natural y línea base puede quedar sujeta a las variaciones que se encuentran en profundidad, o de donde son tomados los datos.

Es necesario cuestionarse también si es válido o no determinar la condición natural para los acuíferos con tan poca información, por ejemplo, los acuíferos Catapilco, Casablanca o Quintero. A pesar de que en varios de estos sectores acuíferos la densidad de pozos es aceptable no es recomendable trabajar con tan pocos datos ya que puede ser poco representativo. La recomendación para estos casos es buscar/generar más información geoquímica, conseguir más pozos o simplemente no estimar las condiciones de calidad natural ni línea base.

5.2 Resultados caso 2

En primer lugar, se integró en una tabla Excel la información geoquímica de 127 pozos distribuidos a lo largo del sector acuífero MNT. La información de estos

pozos permite caracterizar la zona de estudio tanto en superficie como en el tiempo, ya que hay información desde el año 1984 hasta el año 2015.

5.2.1 Determinación de la condición de calidad natural según metodología de Wendland et al (2003)

Una vez construida la base de datos, se procedió a eliminar los datos duplicados y los que no cumplieran con el criterio del balance iónico. Se eliminaron 222 datos (9% del total) por no cumplir con tener un balance iónico menor al 10% o por ser datos duplicados.

La Tabla 5.10 resume la cantidad de datos que fueron eliminados por los distintos criterios y el número que fue utilizado para determinar la calidad natural del acuífero.

Tabla 5.10 Datos utilizados para determinar calidad natural (Wendland), caso 2 (Elaboración propia)

Sector	Número de pozos	Datos	Datos con error en balance iónico > 10%	Datos utilizados para calidad natural
Salar	11	212	64	148
Tilopozo	31	515	122	393
Callejón	8	94	21	73
Negrillar	14	14	8	6
Roca Volcánica	4	4	4	0
Monturaqui	59	1255	3	1252
Total	127	2094	222	1872

Después de filtrar los datos de acuerdo al error en el balance iónico, se describieron los datos estadísticamente según el ion a analizar y por sector del acuífero MNT. Se calcularon datos estadísticos como el mínimo, máximo, promedio, desviación estándar, coeficiente de variación y mediana para los iones Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Na^+ , K^+ y Mg^{+2} al igual que en el caso anterior. También se calculó el percentil 90 de los datos, para determinar el límite superior de la calidad natural según Wendland et al. (2003). La Tabla 5.11 resume los datos calculados por los iones mencionados anteriormente según el sector del acuífero MNT.

Tabla 5.11 Estadística descriptiva y resultados de la metodología de Wendland et al. (2003), caso 2 (Elaboración propia)

Ion	Sector	N°	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Promedio (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Coeficiente de variación	Mediana (mg/L)	P ₉₀ (mg/L)
Cl^-	Salar	148	140009	224000	188904	12885.55	0.07	190798	201000.00
	Tilopozo	393	628	207301	41509	67117.18	1.62	3331	177645.62
	Callejón	73	151	186768	9657	37794.70	3.91	804	1032.20
	Negrillar	6	82	851	471	335.15	0.71	511	789.00
	Monturaqui	1252	53	1950	252	244.66	0.97	186	411.00
SO_4^{2-}	Salar	148	4520	23364	10211	3443.02	0.34	10000	14430.60
	Tilopozo	393	225	16983	3165	3928.33	1.24	891	9479.80

Ion	Sector	N°	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Promedio (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Coefficiente de variación	Mediana (mg/L)	P ₉₀ (mg/L)
NO ₃ ⁻	Callejón	73	176	14571	1042	2853.54	2.74	394	477.83
	Negrillar	6	170	603	381	166.97	0.44	393	549.00
	Monturaqui	1252	3	1670	332	255.49	0.77	296	506.00
	Salar	148	0	417	15	38.00	2.53	10	22.23
	Tilopozo	380	0	113	4	7.46	2.02	1	10.02
	Callejón	71	0	8	3	2.37	0.84	1	5.60
	Negrillar	6	0	2	1	0.54	0.57	1	1.50
Na ⁺	Monturaqui	0							
	Salar	148	60190	134048	99601	14032.39	0.14	98990	115978.10
	Tilopozo	393	335	131663	21733	35402.60	1.63	1890	89644.80
	Callejón	73	195	117972	5090	20050.26	3.94	433	612.80
	Negrillar	6	97	520	314	180.68	0.58	330	492.50
K ⁺	Monturaqui	1252	56	1480	221	182.70	0.83	185	359.90
	Salar	148	4350	30700	14039	5707.13	0.41	13397	21063.50
	Tilopozo	393	12	21459	3690	6030.18	1.63	313	15700.00
	Callejón	73	8	26260	1050	4382.94	4.18	44	75.20
	Negrillar	6	8	54	34	20.91	0.62	38	53.00
Mg ⁺²	Monturaqui	1252	2	120	18	14.82	0.80	15	28.00
	Salar	148	1700	19882	6491	2845.48	0.44	6226	9447.00
	Tilopozo	393	68	12495	1534	2404.18	1.57	208	5880.00
	Callejón	73	51	6614	363	1244.15	3.42	72	89.80
	Negrillar	6	28	124	78	38.66	0.50	80	117.00
	Monturaqui	1252	0	198	55	25.85	0.47	55	84.00

5.2.1.1 Ion cloruro

El cloruro alcanza un valor mínimo de 53 mg/L en Monturaqui y un máximo de 224000 mg/L registrado en el sector del Salar. Según la metodología de Wendland et al. (2003) el valor de la condición de calidad natural más alto es de 201000 mg/L registrado en el sector del Salar y el más bajo es en Monturaqui con una concentración de 411 mg/L.

5.2.1.2 Ion sulfato

El sulfato alcanza un valor mínimo de 3 mg/L en Monturaqui y un máximo de 23364 mg/L registrado en el sector del Salar. Según la metodología de Wendland et al. (2003) el valor de la condición de calidad natural más alto es de 14430.6 mg/L registrado en el sector del Salar y el más bajo es en Monturaqui con una concentración de 506 mg/L.

5.2.1.3 Ion nitrato

El nitrato alcanza un valor mínimo de 0 mg/L en Negrillar, Callejón, Tilopozo y el Salar y un máximo de 417 mg/L registrado en el sector del Salar. Según la metodología de Wendland et al. (2003) el valor de la condición de calidad natural más alto es de 22.23 mg/L registrado en el sector del Salar y el más bajo es en Negrillar con una concentración de 1.5 mg/L. No se tienen datos de concentración de nitrato en Monturaqui.

5.2.1.4 Ion sodio

El sodio alcanza un valor mínimo de 56 mg/L en Monturaqui y un máximo de 134048 mg/L registrado en el sector del Salar. Según la metodología de Wendland et al. (2003) el valor de la condición de calidad natural más alto es de 115978.1 mg/L registrado en el sector del Salar y el más bajo es en Monturaqui con una concentración de 359.9 mg/L.

5.2.1.5 Ion potasio

El potasio alcanza un valor mínimo de 2 mg/L en Monturaqui y un máximo de 30700 mg/L registrado en el sector del Salar. Según la metodología de Wendland et al. (2003) el valor de la condición de calidad natural más alto es de 21063.5 mg/L registrado en el sector del Salar y el más bajo es en Monturaqui con una concentración de 28 mg/L.

5.2.1.6 Ion magnesio

El magnesio alcanza un valor mínimo de 0 mg/L en Monturaqui y un máximo de 19882 mg/L registrado en el sector del Salar. Según la metodología de Wendland et al. (2003) el valor de la condición de calidad natural más alto es de 9447 mg/L registrado en el sector del Salar y el más bajo es en Monturaqui con una concentración de 84 mg/L.

5.2.2 Determinación de la condición de calidad natural según metodología de Müller et al. (2003)

Una vez construida la base de datos, se procedió a eliminar los datos duplicados y los que no cumplieran con el criterio del balance iónico. Müller y colaboradores (2006) señalan que se aceptará un error de hasta un 10%. Se

eliminaron 222 datos (9% del total) por no cumplir con este criterio o por ser duplicados.

Posteriormente se eliminaron las filas (pozos) que contuvieran datos que no cumplieran los criterios de preselección, siendo el criterio más importante el que señala que la concentración de $\text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ no fuera mayor a 1000 mg/L y en segundo lugar que la concentración de nitrato (NO_3^-) no sea mayor a 10 mg/L. Debido a estos criterios se eliminaron 643 datos (30.7% del total)

La Tabla 5.12 resume la cantidad de datos que fueron eliminados por los distintos criterios y el número que fue utilizado para determinar la calidad natural.

Tabla 5.12 Datos utilizados para determinar calidad natural (Müller et al. (2006)), caso 2
(Elaboración propia)

	Número de pozos	Datos	Datos eliminados por balance iónico y duplicados	Datos eliminados por preselección	Datos utilizados para calidad natural
Salar	11	212	64	148	0
Tilopozo	31	515	122	392	1
Callejón	8	94	21	44	29
Negrillar	14	14	8	3	3
Roca	4	4	4	0	0
Volcánica					
Monturaqui	59	1255	3	56	1196
Total	127	2094	222	643	1229

Posteriormente, al igual que con la metodología de Wendland et al. (2003), se describirán los datos estadísticamente según el ion a analizar y por acuífero definido. Müller et al. (2006) señalan que el límite superior de la calidad natural queda determinado por el percentil 90 o 97.7 según la cantidad de datos. Por lo que en este caso la calidad natural quedará definida con el percentil 97.7 para los iones del sector de Monturaqui debido a que hay más de 60 datos disponibles, mientras que para los sectores de Tilopozo, Negrillar y Callejón la calidad natural quedará definida por el percentil 90.

Los iones analizados fueron los mismos que fueron estudiados con la metodología de Wendland et al. (2003). La Tabla 5.13 resume los datos calculados por los iones mencionados anteriormente según el sector del acuífero MNT.

Tabla 5.13 Estadística descriptiva y resultados de la metodología de Müller et al. (2006), caso 2
(Elaboración propia)

Ion	Sector	N°	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Promedio (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Coefficiente de variación	Mediana (mg/L)	P ₉₀ (mg/L)	P _{97.7} (mg/L)
Cl⁻	Tilopozo	1	650	650	650	-	-	650	650.00	-
	Callejón	29	151	467	362	69.11	0.19	375	415.00	-
	Negrillar	3	82	298	175	111.22	0.64	144	267.20	-
	Monturaqui	1196	53	639	206	114.62	0.56	181	-	457.09
SO₄²⁻	Tilopozo	1	409	409	409	-	-	409	409.00	-
	Callejón	29	336	522	391	36.76	0.09	387	409.40	-
	Negrillar	3	170	323	241	77.02	0.32	231	304.60	-
	Monturaqui	1196	3	646	291	159.69	0.55	290	-	519.00
NO₃⁻	Tilopozo	1	0	0	0	-	-	0	0.05	-
	Callejón	28	0	6	3	1.99	0.78	1	5.37	-
	Negrillar	3	1	2	1	0.62	0.52	1	1.72	-
	Monturaqui	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Na⁺	Tilopozo	1	335	335	335	-	-	335	335.00	-
	Callejón	29	195	386	300	46.17	0.15	300	348.40	-

Ion	Sector	N°	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Promedio (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Coefficiente de variación	Mediana (mg/L)	P ₉₀ (mg/L)	P _{97.7} (mg/L)
	Negrillar	3	97	228	156	66.56	0.43	142	210.80	-
	Monturaqui	1196	56	500	188	90.98	0.48	182	-	382.00
K ⁺	Tilopozo	1	44	44	44	-	-	44	43.90	-
	Callejón	29	8	72	33	11.82	0.36	31	37.26	-
	Negrillar	3	8	26	16	9.50	0.61	13	23.40	-
	Monturaqui	1196	2	70	16	7.82	0.49	15	-	31.35
Mg ⁺²	Tilopozo	1	85	85	85	-	-	85	85.40	-
	Callejón	29	51	101	64	9.74	0.15	62	71.84	-
	Negrillar	3	28	60	45	16.04	0.36	46	57.20	-
	Monturaqui	1196	0	158	51	19.82	0.39	54	-	101.00

5.2.2.1 Ion cloruro

El cloruro alcanza un valor mínimo de 53 mg/L en Monturaqui y un máximo de 650 mg/L registrado en el sector de Tilopozo. Según la metodología de Müller et al. (2006) el valor de la condición de calidad natural más alto es de 650 mg/L registrado en el sector de Tilopozo y el más bajo es en Negrillar con una concentración de 267.2 mg/L.

5.2.2.2 Ion sulfato

El sulfato alcanza un valor mínimo de 3 mg/L en Monturaqui y un máximo de 646 mg/L en la misma zona. Según la metodología de Müller et al. (2006) y colaboradores el valor de la condición de calidad natural más alto es de 519 mg/L registrado en el sector del Monturaqui y el más bajo es en Negrillar con una concentración de 304.6 mg/L.

5.2.2.3 Ion nitrato

El nitrato alcanza un valor mínimo de 0 mg/L en Callejón y Tilopozo mientras que el máximo es de 6 mg/L registrado en el sector del Callejón. Según la metodología de Müller et al. (2006) y colaboradores el valor de la condición de calidad natural más alto es de 5.37 mg/L registrado en el sector del Callejón y el más bajo es en Tilopozo con una concentración de 0.05 mg/L. No se tienen datos de concentración de nitrato en Monturaqui.

5.2.2.4 Ion sodio

El sodio alcanza un valor mínimo de 56 mg/L en Monturaqui y un máximo de 134048 mg/L registrado en el sector del Salar. Según la metodología de Müller et

al. (2006) y colaboradores el valor de la condición de calidad natural más alto es de 115978.1 mg/L registrado en el sector del Salar y el más bajo es en Monturaqui con una concentración de 359.9 mg/L.

5.2.2.5 Ion potasio

El potasio alcanza un valor mínimo de 2 mg/L en Monturaqui y un máximo de 72 mg/L registrado en el sector de Callejón. Según la metodología de Müller et al. (2006) y colaboradores el valor de la condición de calidad natural más alto es de 43.9 mg/L registrado en el sector del Tilopozo y el más bajo es en Negrillar con una concentración de 23.4 mg/L.

5.2.2.6 Ion magnesio

El magnesio alcanza un valor mínimo de 0 mg/L en Monturaqui y un máximo de 158 mg/L en el mismo sector. Según la metodología de Müller et al. (2006) y colaboradores el valor de la condición de calidad natural más alto es de 101 mg/L registrado en el sector del Monturaqui y el más bajo es en Negrillar con una concentración de 57.2 mg/L.

5.2.3 Propuesta de Línea Base

Con respecto a este caso hay que destacar la representatividad temporal de los datos. El hecho de contar con una base de datos robusta con información desde los años 90 hasta el 2015 permite analizar con más precisión la evolución geoquímica que existe en el acuífero MNT y poder acercarse de mejor manera a los valores asociados a la calidad natural y línea base.

Para entender como ha variado la concentración de los iones en el tiempo se decidió escoger cinco pozos para entender cómo se comporta el promedio acumulado de los iones en el tiempo. El sector de Monturaqui fue el único que contaba con información temporal suficiente para poder graficar los datos a partir del año 1994 hasta el 2015. Se escogieron los pozos MPW1, MPW2, MPW3, MPW4 y MPW5 del sector de Monturaqui y se graficó el promedió acumulado de la concentración de los iones en el tiempo (Figura 5.4 a Figura 5.8)

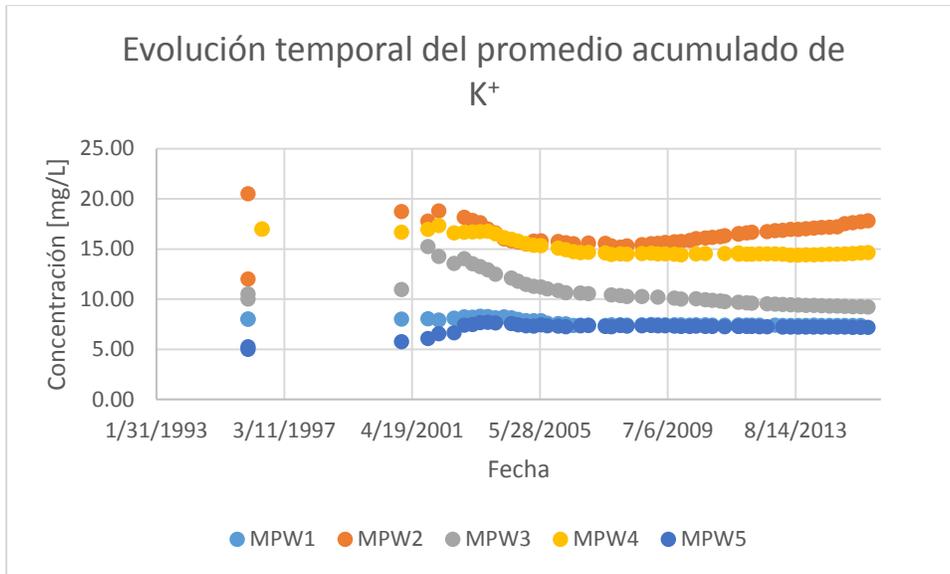


Figura 5.4 Evolución temporal del promedio acumulado en el tiempo de potasio en Monturaqui (Elaboración propia)

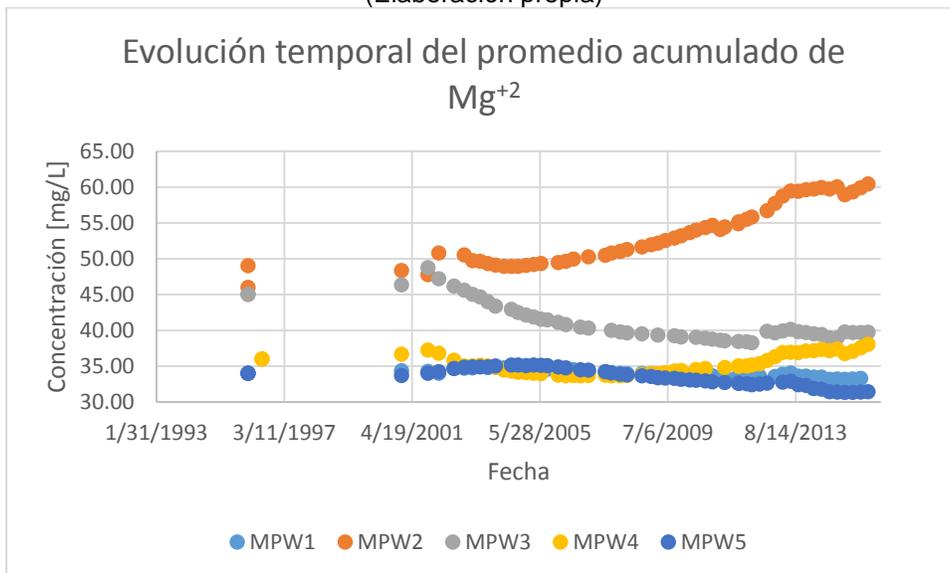


Figura 5.5 Evolución temporal del promedio acumulado en el tiempo de magnesio en Monturaqui (Elaboración propia)

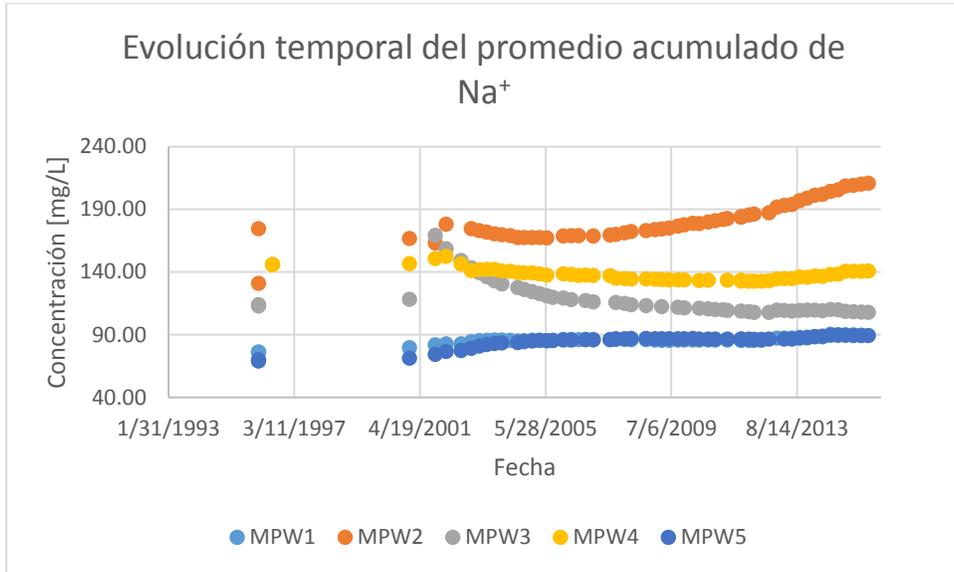


Figura 5.6 Evolución temporal del promedio acumulado en el tiempo de sodio en Monturaqui (Elaboración propia)

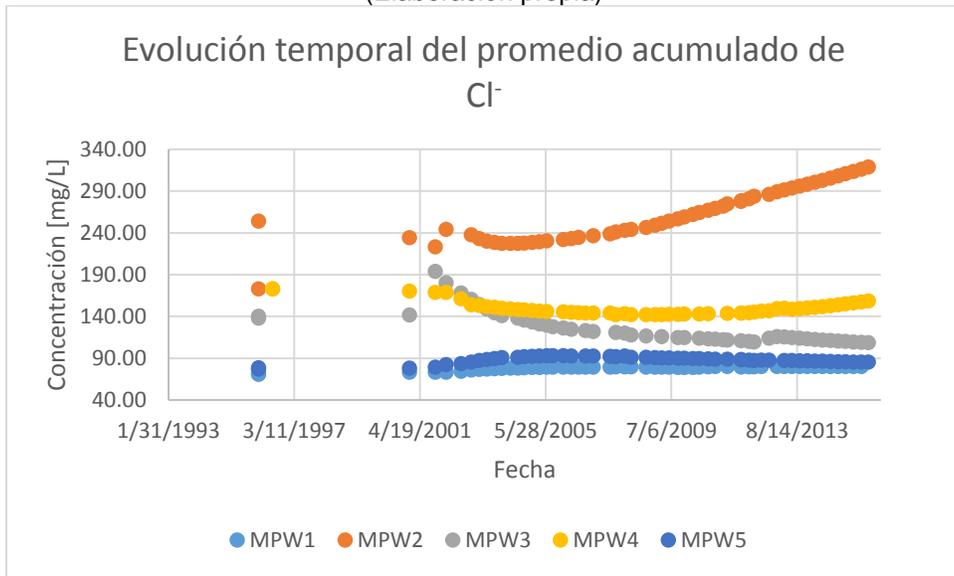


Figura 5.7 Evolución temporal del promedio acumulado en el tiempo de cloruro en Monturaqui (Elaboración propia)

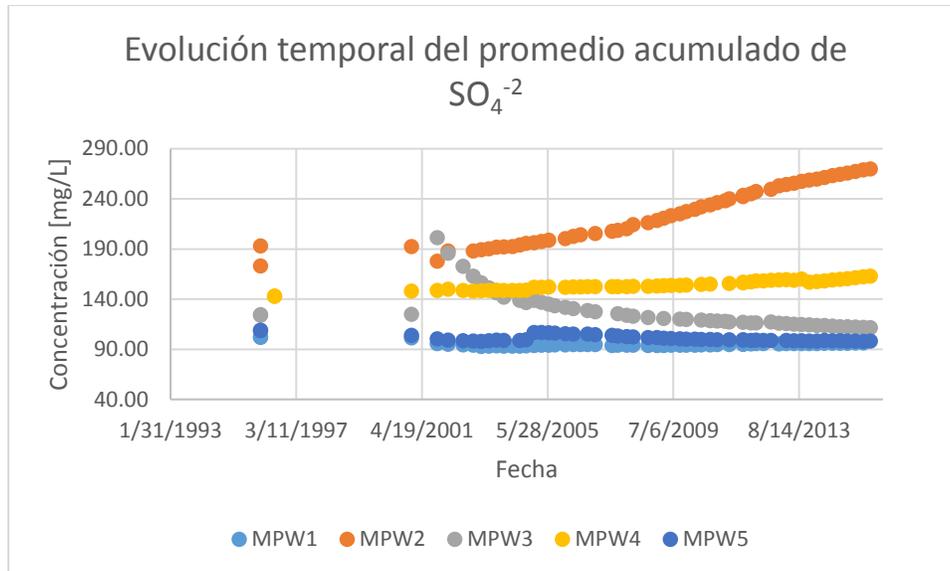


Figura 5.8 Evolución temporal del promedio acumulado en el tiempo de sulfato en Monturaqui (Elaboración propia)

La Tabla 5.14 muestra los valores de la pendiente de los gráficos anteriores. Se observa que en la mayoría de los iones, excepto el potasio, existe un aumento de concentración en el tiempo debido a que tienen una pendiente positiva. Aunque no se realizó este ejercicio para cada pozo, se espera que el comportamiento observado en los gráficos sea similar en los otros pozos y en los otros sectores del acuífero MNT.

Tabla 5.14 Valores de pendientes en grados para pozos del sector Monturaqui (Elaboración propia)

Pozo	K ⁺	Mg ⁺²	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
MPW1	-0.008	-0.013	0.074	0.062	-0.011
MPW2	0.003	0.124	0.420	0.917	0.877
MPW3	-0.034	-0.068	-0.276	-0.466	-0.403
MPW4	-0.026	0.016	-0.095	-0.110	0.147
MPW5	0.008	-0.032	0.131	0.024	-0.059
Suma	-0.058	0.027	0.255	0.426	0.551

Por último, se analizó la evolución temporal del arsénico en los mismos pozos del sector de Monturaqui (Figura 5.9). El comportamiento observado es similar a lo que ocurre en los gráficos anteriores con los otros elementos, lo que sugiere que el aumento en las concentraciones no es exclusivamente debido a un factor natural o geológico, sino que también puede estar asociado a un factor antrópico.

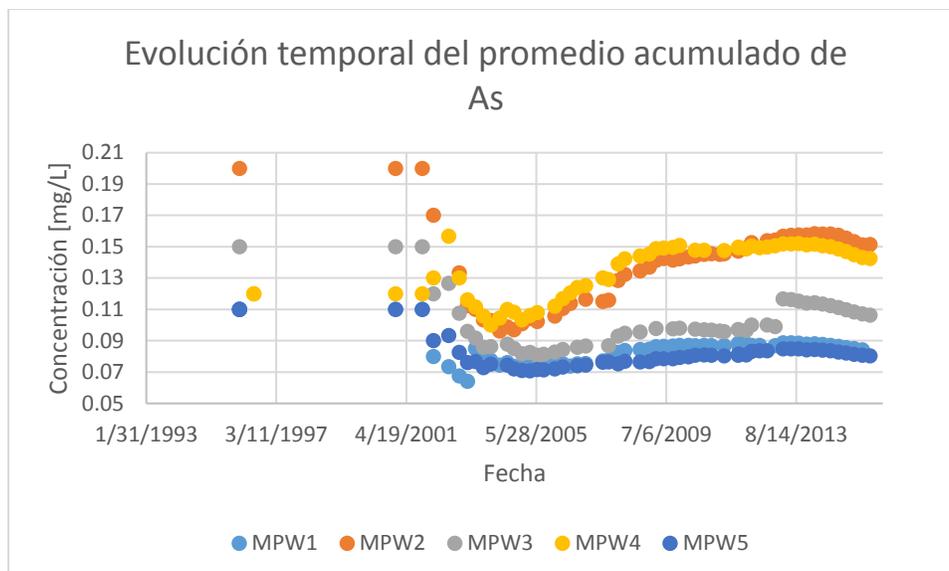


Figura 5.9 Evolución temporal del promedio acumulado en el tiempo de arsénico en Monturaqui (Elaboración propia)

Debido a lo anterior, se propone utilizar la metodología de Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006) para estimar la condición de línea base en los sectores del acuífero MNT usando un subconjunto de los datos disponibles.

En primer lugar, se trabajó con la misma base de datos que fue utilizada para calcular la calidad natural definida por Wendland et al. (2003). De los datos, se observa que existen 101 datos (5,4%) que son entre los años 1993 y 2000 que pertenecen principalmente al sector de Monturaqui, mientras que 1147 (94,6%) datos son entre los años 2001 y 2015.

Idealmente hubiese sido más correcto estimar la condición de línea base anterior y posterior al año 2000 debido a que el informe de Golder (2017) señala que los trabajos en el acuífero MNT comenzaron a realizarse por tres compañías distintas entre los años 1995 y 1998, lo que hubiese permitido identificar como era la calidad de las aguas subterráneas anterior a los trabajos de extracción realizados por las compañías (Antes del año 2000) y como fue evolucionando a partir desde esa fecha. Sin embargo, los datos por sector no eran suficientes para realizarlo de esa manera, es por eso que se decidió calcular la línea base para los últimos cinco años de datos (2010-2015) basándose en la metodología de Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006).

Se aplicó el mismo criterio para calcular la línea base, es decir, aplicar cada metodología a ambas bases de datos. Las diferencias radican en que las bases de datos son distintas ya que para la metodología de Wendland et al. (2003) se utilizaron 1128 datos entre los años 2010 y 2015, mientras que en el caso de Müller se tenían 549 datos entre el mismo periodo (recordemos que Müller et al. (2006) aplica un criterio de preselección que elimina datos).

La Tabla 5.15 y Tabla 5.16 presenta los resultados que se obtuvieron de calidad natural y línea base con la metodología de Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2007) respectivamente, para los distintos sectores del caso 2 y los compara

a través de la variación porcentual. Este índice relaciona la línea base (L.B) con la calidad natural (C.N) y se calculó con la siguiente formula:

$$\text{Variación porcentual} = \frac{CN-LB}{LB} \times 100$$

Cuando la variación porcentual es positiva, significará que la calidad natural es mayor que el valor de línea base, mientras que un valor negativo será debido a que el valor de la calidad natural es menor al de la línea base.

Tabla 5.15 Comparación entre condición de calidad natural y propuesta de línea base, metodología de Wendland et al. (2003) (Elaboración propia)

	Sector	Calidad Natural		Propuesta de Línea base		Variación porcentual
		Nº	P ₉₀ (mg/L)	Nº	P ₉₀ (mg/L)	
Cl ⁻	Salar	148	201000	141	198976	1.02
	Tilopozo	393	177645.62	382	178722.42	-0.60
	Callejón	73	1032.2	70	1055.94	-2.25
	Monturaqui	1252	411	535	424	-3.07
SO ₄ ⁻²	Salar	148	14430.6	141	14488	-0.40
	Tilopozo	393	9479.8	382	9624.3	-1.50
	Callejón	73	477.83	70	433.19	10.30
	Monturaqui	1252	506	535	509	-0.59
Na ⁺	Salar	148	115978.1	141	116963	-0.84
	Tilopozo	393	89644.8	382	89681	-0.04
	Callejón	73	612.8	70	616	-0.52
	Monturaqui	1252	359.9	535	366.6	-1.83
K ⁺	Salar	148	21063.5	141	18800	12.04
	Tilopozo	393	15700	382	15700	0.00
	Callejón	73	75.2	70	75.44	-0.32
	Monturaqui	1252	28	535	29	-3.45
Mg ⁺²	Salar	148	9447	141	9390	0.61
	Tilopozo	393	5880	382	5997	-1.95
	Callejón	73	89.8	70	89.82	-0.02
	Monturaqui	1252	84	535	83	1.20

Tabla 5.16 Comparación entre condición de calidad natural y propuesta de línea base, metodología de Müller et al. (2006) (Elaboración propia)

		Calidad Natural			Propuesta de Línea Base			Variación porcentual
		Nº	P ₉₀ (mg/L)	P _{97.7} (mg/L)	Nº	P ₉₀ (mg/L)	P _{97.7} (mg/L)	
Cl ⁻	Callejón	29	415	-	29	415		0.00
	Monturaqui	1196	-	457.09	520		497	-8.03
SO ₄ ⁻²	Callejón	29	409.4	-	29	409.4		0.00
	Monturaqui	1196	-	519	520		524	-0.95
Na ⁺	Callejón	29	348.4	-	29	348.4		0.00
	Monturaqui	1196	-	382	520		411.44	-7.16
K ⁺	Callejón	29	37.26	-	29	37.26		0.00
	Monturaqui	1196	-	31.35	520		33.21	-5.60
Mg ⁺²	Callejón	29	71.84	-	29	71.84		0.00
	Monturaqui	1196	-	101	520		109.06	-7.39

5.2.4 Comentarios caso 2

Como se dijo anteriormente, hay que destacar que para este caso se contaba con una gran representatividad temporal de los datos y a diferencia del caso anterior, se pudo calcular la condición de línea base.

A partir de la Tabla 5.11 y Tabla 5.13 se observa que, para un mismo ion, el valor de la calidad natural (P90 o P97.7) aumentan a medida que se acerca al sector del salar, es decir, los valores más altos para un mismo ion se encuentran en el sector del Salar y Tilopozo, mientras que lo más bajos se encuentran hacia Monturaqui y Negrillar.

Debido a que existe un flujo subterráneo de sur (Monturaqui) a norte (Salar–Tilopozo), se observa de la Figura 5.10 que las aguas subterráneas evolucionarían de ser “bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas” y “sulfatadas y/o cloruradas” y “sulfatadas cálcicas y/o magnésicas” a “cloruradas y/o sulfatadas sódicas”.

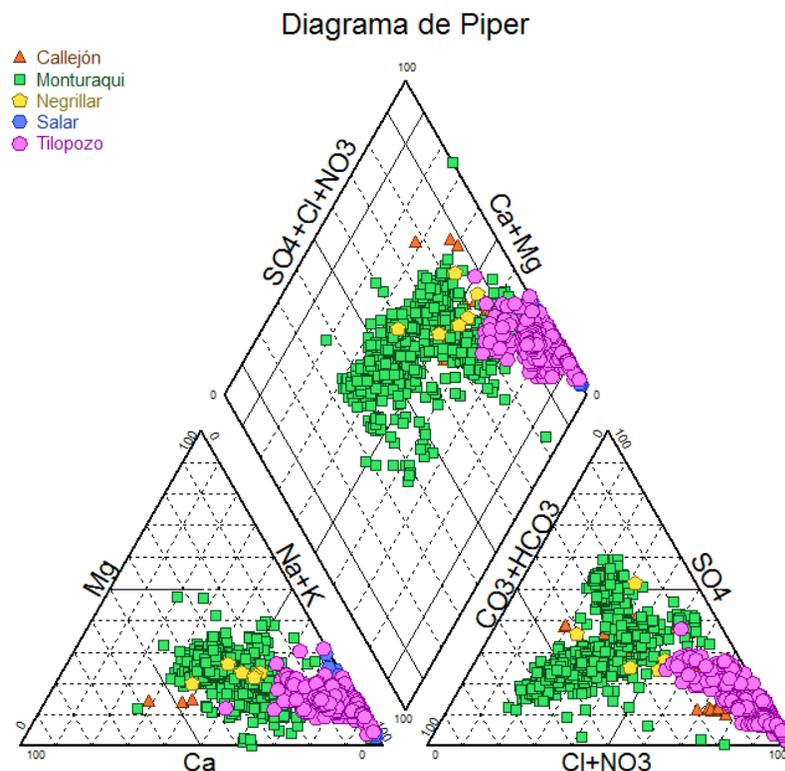


Figura 5.10 Diagrama de Piper, acuífero MNT (Elaboración propia)

Con respecto a los valores máximos, se observa que para un mismo sector acuífero y para un mismo ion, los valores son siempre mayores en la metodología de Wendland et al. (2003) que en la metodología de Müller et al. (2006), esto se explica porque la segunda metodología elimina valores por los criterios de

preselección que pueden ser valores atípicos (outliers) o estar asociados a un factor antrópico.

En los resultados de la metodología de Wendland et al. (2003) (Tabla 5.11), se observa que el coeficiente de variación siempre es mayor para el caso de Callejón, excepto para el nitrato. Al analizar la metodología de Müller (Tabla 5.13) el coeficiente de variación en el sector de Callejón siempre es el menor con respecto a los otros sectores acuíferos. Esto se puede explicar por las diferentes fuentes que pueden generar la presencia de los iones en las aguas subterráneas, y al aplicar la metodología de Müller et al. (2006) eliminamos una de estas fuentes (potencialmente antrópicas) a través de los criterios de preselección.

El menor valor del coeficiente de variación en la metodología de Wendland et al. (2003) (Tabla 5.11) se registra en el sector del Salar para todos los iones, excepto el nitrato. Por otro lado, los valores más altos asociados a la calidad natural (P90) se registran en este mismo sector. Esto se puede explicar debido a que, a pesar de las concentraciones de las aguas subterráneas sean altos, estos estarían asociados a una sola fuente.

Posterior a la aplicación de las metodologías se compararon los resultados de calidad natural obtenidos por Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006). La Tabla 5.17 resume los resultados de ambas metodologías por ion y sector acuífero.

Tabla 5.17 Comparación de los resultados de calidad natural según Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006), caso 2 (Elaboración propia)

	Sector	Wendland et al. (2003)		Müller et al. (2006)		Variación % Wendland vs Müller	
		N°	P90 (mg/L)	N°	P90 (mg/L)		P97.7 (mg/L)
Cl⁻	Salar	148	201000.00	0	-	-	
	Tilopozo	393	177645.62	1	650.00	-	27230.10
	Callejón	73	1032.20	29	415.00	-	148.72
	Negrillar	6	789.00	3	267.20	-	195.28
	Monturaqui	1252	411.00	1196	-	457.09	-10.08
SO₄⁻²	Salar	148	14430.60	0	-	-	-
	Tilopozo	393	9479.80	1	409.00	-	2217.80
	Callejón	73	477.83	29	409.40	-	16.72
	Negrillar	6	549.00	3	304.60	-	80.24
	Monturaqui	1252	506.00	1196	-	519.00	-2.50
NO₃⁻	Salar	148	22.23	0	-	-	-
	Tilopozo	380	10.02	1	0.05	-	19936.20
	Callejón	71	5.60	28	5.37	-	4.38
	Negrillar	6	1.50	3	1.72	-	-12.79
	Monturaqui	0	-	0	-	-	-
Na⁺	Salar	148	115978.10	0	-	-	-
	Tilopozo	393	89644.80	1	335.00	-	26659.64
	Callejón	73	612.80	29	348.40	-	75.89
	Negrillar	6	492.50	3	210.80	-	133.63
	Monturaqui	1252	359.90	1196	-	382.00	-5.79
K⁺	Salar	148	21063.50	0	-	-	-
	Tilopozo	393	15700.00	1	43.90	-	35663.10

	Wendland et al. (2003)		Müller et al. (2006)			
	Callejón	73 75.20	29	37.26	-	101.83
	Negrillar	6 53.00	3	23.40	-	126.50
	Monturaqui	1252 28.00	1196		31.35	-10.70
Mg⁺²	Salar	148 9447.00	0	-	-	
	Tilopozo	393 5880.00	1	85.40	-	6785.25
	Callejón	73 89.80	29	71.84	-	25.00
	Negrillar	6 117.00	3	57.20	-	104.55
	Monturaqui	1252 84.00	1196		101.00	-16.83

En el caso de Tilopozo y Negrillar, al aplicar los criterios de preselección (metodología de Müller et al. (2006)), quedaron disponibles 1 y 3 datos respectivamente para cada sector. A partir de esto, es necesario cuestionarse la validez de la metodología de Müller para esta zona. Para el sector de Callejón se contaba con 29 datos, aunque es deseable contar con más datos, en estos casos se puede determinar la calidad natural con el percentil 90.

Al analizar los datos de la Tabla 5.17 se observa que los valores calculados por las distintas metodologías son semejantes para los distintos iones del sector de Monturaqui, con una variación máxima cercana al 15% entre ambas metodologías. Es posible que estas semejanzas se produzcan debido a la cantidad de datos disponibles, ya que como sugieren los autores, la validez de esta metodología se basa en la cantidad y calidad de la información. Y el hecho de contar con una base de datos robusta (más de mil datos) específicamente para un sector es suficiente para poder caracterizar de mejor manera la condición de calidad natural.

Con respecto a los resultados de la tabla Tabla 5.15 y Tabla 5.16, se observa que se puede llegar a un resultado de línea base tanto con la metodología de Wendland et al. (2003) como Müller et al. (2006). Sin embargo, los valores obtenidos con ambas metodologías no se parecen entre sí, incluso hay algunos sectores donde no se puede determinar la línea base con la metodología de Müller et al. (2006) debido a que no hay datos posteriores a la aplicación de los criterios de preselección. Si bien, el valor de la línea base no es conocido a priori, en caso de usar las dos metodologías se podría definir un rango de línea base entre los valores obtenidos por ambas metodologías. En caso de solo usar una de las dos metodologías, el autor deberá decidir que valor de línea base se ajusta mejor a su objetivo de trabajo.

Los resultados de la tabla Tabla 5.18 y Tabla 5.19 muestran que no hay semejanza entre los valores obtenidos de línea base con los otros parámetros estadísticos como el promedio, máximo o mínimo calculados para el mismo periodo de tiempo (últimos 5 años de datos). Por lo tanto, a pesar de que no hay una metodología clara de cómo calcular la línea base, el hecho de aplicar las metodologías de calidad natural acotadas a una ventana temporal resulta mucho más válido que utilizar otros parámetros para determinar la línea base. Esto se explica porque el promedio, a diferencia de los percentiles, considera todos los datos presentes en la base de datos, incluso esos que son anómalamente altos y bajos.

Tabla 5.18 Estadística descriptiva (últimos 5 años) y resultados metodología de Wendland et al. (2003), caso 2 (Elaboración propia)

	Sector	Nº	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Promedio (mg/L)	Línea Base P90 (mg/L)	Calidad Natural P90 (mg/L)
Cl	Salar	141	140008.61	220000.00	188381.15	198976.00	201000.00
	Tilopozo	382	628.00	207300.60	42431.92	178722.42	177645.62
	Callejón	70	151.00	186768.00	10041.34	1055.94	1032.20
	Monturaqui	535	70.00	1216.00	241.30	424.00	411.00
SO4	Salar	141	4520.00	23364.00	10291.53	14488.00	14430.60
	Tilopozo	382	225.00	16983.00	3208.45	9624.30	9479.80
	Callejón	70	176.00	14571.00	1064.88	433.19	477.83
	Monturaqui	535	16.00	1329.00	324.37	509.00	506.00
Na	Salar	141	60189.54	134048.00	99666.09	116963.00	115978.10
	Tilopozo	382	335.00	131663.00	22220.46	89681.00	89644.80
	Callejón	70	195.40	117972.00	5291.01	616.00	612.80
	Monturaqui	535	56.00	1075.00	219.19	366.60	359.90
K	Salar	141	4350.00	30500.00	13921.76	18800.00	21063.50
	Tilopozo	382	12.34	21459.00	3770.20	15700.00	15700.00
	Callejón	70	7.70	26260.00	1092.72	75.44	75.20
	Monturaqui	535	5.69	93.70	17.86	29.00	28.00
Mg	Salar	141	1700.00	19881.97	6510.40	9390.00	9447.00
	Tilopozo	382	67.81	12495.00	1566.44	5997.00	5880.00
	Callejón	70	50.55	6614.00	375.94	89.82	89.80
	Monturaqui	535	0.00	158.00	54.38	83.00	84.00

Tabla 5.19 Estadística descriptiva (últimos 5 años) y resultados metodología de Müller et al. (2006), caso 2 (Elaboración propia)

	Nº	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Promedio (mg/L)	Línea Base		Calidad Natural	
					P90 (mg/L)	P97.7 (mg/L)	P90 (mg/L)	P97.7 (mg/L)
Cl	Callejón	151.00	467.00	361.86	415.00		415.00	-
	Monturaqui	520	70.00	557.00	218.48		-	457.09
SO4	Callejón	29	336.00	522.00	390.92	409.40	409.40	-
	Monturaqui	520	16.00	646.00	304.54		-	519.00
Na	Callejón	29	195.40	386.00	300.01	348.40	348.40	-
	Monturaqui	520	56.00	500.00	201.63		-	382.00
K	Callejón	29	7.70	72.30	32.80	37.26	37.26	-
	Monturaqui	520	5.69	69.40	16.55		-	31.35
Mg	Callejón	29	50.55	101.00	64.44	71.84	71.84	-
	Monturaqui	520	0.00	158.00	52.47		-	101.00

6 DISCUSIONES

6.1 Con respecto a las metodologías:

Las metodologías para determinar la condición de línea base y calidad natural dependen principalmente de la cantidad y la calidad de la información que se tiene de la zona de estudio.

A continuación, se analizará cada uno de los elementos que aportan información y su relevancia en la estimación de las condiciones de calidad natural y línea base de acuerdo a los resultados obtenidos:

- Temporalidad y espacialidad de los datos:

Como se pudo observar en los casos analizados, el hecho de contar con una base de datos robusta en temporalidad permite obtener resultados más certeros ya que se puede observar como varían las concentraciones a lo largo del tiempo en una determinada zona. En el caso 1 se determinó que no se pudo calcular la condición de línea base debido al poco rango temporal de los datos, a diferencia del caso 2, donde la base de datos se destacaba por su amplio rango temporal y si se pudo llegar a un valor de línea base trabajando con una ventana temporal de los datos.

Con respecto a la espacialidad superficial de los datos, se destaca la importancia de esta información para caracterizar como varía las concentraciones a lo largo del sector acuífero. Por ejemplo, gracias a la distribución espacial que tienen los datos en el caso 1, se pudo caracterizar como variaba las concentraciones y el valor asociado al percentil 90 según las características litológicas dentro del mismo acuífero y en el caso 2 se obtuvo que existía un aumento en la concentración de iones hacia al norte a lo largo de todo el acuífero MNT, lo que se puede explicar por la madurez que van adquiriendo las aguas subterráneas al ir interactuando con otro tipo de rocas o por la ubicación de la zona de recarga (Sur del acuífero MNT) y la zona de evaporación (Norte del acuífero MNT).

Los datos del caso 1 tenían información de la profundidad de pozos. Este parámetro debe considerarse para casos futuros debido a que los acuíferos rara vez son homogéneos en profundidad, de hecho, se deben complementar con estudios geofísicos para comprender cuales son las unidades hidrogeológicas presentes y como se extienden tanto en profundidad como a lo largo del acuífero a estudiar. De acuerdo a los resultados de la Tabla 5.6 el promedio de los valores asociados al percentil 90 del nivel somero y el nivel profundo se asemejan a los valores calculados en la Tabla 5.3 y Tabla 5.5 tanto para el acuífero Limarí como Choapa.

Se observó que para el acuífero Choapa, las concentraciones eran mayor en superficie que en profundidad (excepto para el nitrato) mientras que para el acuífero Limarí, las concentraciones eran mayores en profundidad que en superficie (excepto para el potasio). Esto puede estar directamente relacionado con el comportamiento geológico e hidrogeológico que tiene el acuífero ya que de acuerdo al estudio de la

DGA de la región de Coquimbo (DGA, 2017) el acuífero Limarí presenta unidades de alta permeabilidad, baja compactación y altas conductividades hidráulicas. Por su parte, el acuífero Choapa está constituido por sedimentos donde predominan gravas gruesas y sedimentos de muy baja permeabilidad. Es importante para estudios posteriores tener en consideración el factor de profundidad ya que, como muestran los resultados de la Tabla 5.6 los datos pueden estar asociados a distintas unidades hidrogeológicas y por lo tanto se obtendrán valores de calidad natural distinto.

Finalmente, en este punto, se rescata que la información temporal es mucho más valiosa para caracterizar la condición de línea base y calidad natural, mientras que la información espacial permite identificar de mejor manera los procesos que ocurren en relación con la ubicación de las unidades geológicas, hidrogeológicas, zona de recarga, etc.

- Densidad de pozos

La densidad de pozos por km^2 será un reflejo del nivel de información que se tiene del sector acuífero que se quiere estudiar. Es fundamental calcular la densidad de pozos antes de analizar el resto de la información ya que será determinante en el nivel de profundidad que se debe hacer el análisis de los elementos que caracterizan el acuífero.

Por ejemplo, en el caso 1 donde la densidad de pozos en algunos acuíferos superaba los $200 \text{ km}^2/\text{pozo}$ significa que existen pocos pozos para la zona que se quiere estudiar, o bien, que la superficie del sector acuífero es demasiado grande para la cantidad de pozos disponibles. Por lo tanto, en este tipo de casos si no se cuenta con una densidad de pozos inferior a $200 \text{ km}^2/\text{pozo}$ existiría una incongruencia en torno a la escala de trabajo y como ésta se relaciona con la información geológica disponible. En particular, si se tiene una alta densidad de pozos se recomienda trabajar con información geológica e hidrogeológica a gran escala o escala regional, mientras que, si se tiene una densidad de pozos menor, además de considerar la escala regional, se debe trabajar a escala local para integrar de mejor manera los datos de los pozos con el funcionamiento del acuífero.

De acuerdo a la bibliografía revisada (Tabla 2.1), los valores de densidad de pozos para los distintos casos rara vez superaba los $50 \text{ km}^2/\text{pozo}$, lo que significa que a pesar de que podemos trabajar en condiciones óptimas, según la Tabla 3.1, se debe aumentar la red de monitoreos de pozos para alcanzar el estándar que internacionalmente se está usando para trabajar en estos casos de determinación de línea base y calidad natural.

- Geología de hidrogeología

Como se ha mencionado anteriormente, la geología juega un rol fundamental en la química que tendrán las aguas subterráneas. En el caso 1 se realizó un análisis por litología predominante en el acuífero Limarí y Maipo. Para el caso del acífero Limarí, los valores asociados a la litología de rocas plutónicas e hipabisales era el que se asemejaba más a los valores de la Tabla 5.3 y Tabla 5.5. En el caso del Maipo, los valores asociados a los depósitos consolidados son los que más se asemejan a los valores de la Tabla 5.3 y Tabla 5.5, es por eso que es importante

tener una buena caracterización de la geología de la zona para tener en consideración cuales son los iones que pueden ser aportados al sistema acuífero. En el caso 1, debido a la gran escala de la zona de estudio, se trabajó con shapefiles que contenían información de la geología a escala 1:1000000 y shapefiles con las unidades hidrogeológicas, mientras que en el caso 2 se pudo caracterizar mejor el aporte de la geología debido a que se trabajó a una escala más detallada y con información acotada a la zona de estudio del informe de Golder (2017).

Otro factor geológico que hay que tener en consideración es la solubilidad de los minerales y la escala de tiempo, ya que existen minerales que son más solubles y otros más resistentes al ataque de las aguas, por lo que no todos los minerales se disuelven de la misma manera. Por ejemplo, en el caso 2 es más probable tener aportes de iones desde la zona de salar por la presencia de minerales solubles como la halita que de los depósitos volcánicos al sur del acuífero MNT.

La información obtenida para los casos de estudio de esta memoria se obtuvo principalmente de expediente públicos y de estudios de privados (Golder, 2017). Sin embargo, en muchos otros casos no se contará con la información bibliográfica de la zona, por lo que se debe considerar el trabajo en terreno que incluye la obtención de los datos deseados a una escala conveniente.

- Shapefiles

La importancia de los shapefiles y softwares que utilizan sistemas de información geográfica aparece cuando se está trabajando con zonas amplias donde la información geológica no se encuentra a la escala de trabajo de la información disponible en los pozos. Son muy relevantes para poder graficar los datos en una determinada zona, sobre todo para integrar de mejor manera los distintos elementos geológicos, hidrogeológicos y los datos de los pozos.

Por último, cabe señalar que los valores obtenidos para los distintos iones analizados con ambas metodologías tanto en el caso 1 como en el caso 2 están, mayoritariamente, bajo el límite permitido por las normas chilenas para agua potable, regadío, etc. (Tabla 6.1). A partir de esto, se puede sugerir en un futuro utilizar los valores de línea base como un límite de concentración sobre el cual los usuarios de las aguas subterráneas, de un determinado, sector no puedan superar, con el fin de mantener un estándar de calidad química.

Tabla 6.1 Valores límites de concentración para diferentes elementos considerados por Normas Chilenas (Modificado de Aguilera, 2010)

Parámetro	Unidad	Nch 409/1 2004	Nch 1333			D.S.N 46	
			Bebida Humanos	Bebida animal	Riego	V.baja	V.media
Cloruro	mg/L	400	400	400	200	250	250
Sulfato	mg/L	500	500	500	250	500	250
Magnesio	mg/L	125	125	126	-	-	-
Nitrato	mg/L	50	50	50	-	-	-
Nitrato + Nitrito	mg/L	-	-	-	-	15	10

6.2 Con respecto a los casos de estudios

6.2.1 Caso 1

Una de las grandes dificultades de este caso estuvo asociada a la falta de datos temporales que no permitían conocer cómo eran y como han evolucionado las concentraciones de los distintos iones en el tiempo.

Por otro lado, debido a la cantidad de información y la escala de trabajo se tuvo que trabajar con shapefiles y mapas de escala regional (1:1000000). Sin embargo, la información en el shapefile era poco detallada ya que la mayoría de los datos se encontraban en sectores acuíferos señalados como “Rellenos cuaternarios”, lo que significa que corresponde a sedimentos provenientes de las rocas de los alrededores, no obstante, es posible que para dos zonas señaladas como relleno cuaternario, el origen de esos sedimentos sea completamente distinta, lo que afecta directamente en la química presente en las aguas subterráneas de aquellos sectores.

Con respecto a los resultados de este caso, se observa que existe una relación directa entre el coeficiente de variación y el valor asociado a la condición de calidad natural (P90). Esto puede llevar a cometer errores al momento de determinar la calidad natural, ya que un alto valor de coeficiente de variación puede ser indicador de que hay más de una familia de datos, por lo que si no se logra diferenciar claramente esas familias de datos puede que se esté calculando el percentil 90 a una familia de datos que no necesariamente corresponden a la calidad natural. En general, para la mayoría de los iones analizados, con excepción del nitrato, los mayores valores del percentil 90 se encuentran asociado a aquellos datos que presentan un coeficiente de variación mayor.

La Tabla 5.6, Tabla 5.7 y Tabla 5.8 demuestran que existe un variación de los valores asociados a la calidad natural según la litología del acuífero al cual pueden estar asociados las muestras y según la profundidad del pozo. Es por esto que en estudios futuros se deben considerar estos factores para que al momento de determinar la calidad natural no se comentan errores asociados a las heterogeneidades que existen en los acuíferos.

Por último, a partir de los resultados obtenidos, se observa que si es posible llegar a un valor de calidad natural al utilizar la metodología de Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006). Sin embargo, hay algunos sectores acuíferos donde la calidad natural fue determinada con no más de 4 datos (Tinguiririca, Estero el Rosario, Catapilco, Casablanca, entre otros). Es necesario cuestionarse la validez de los resultados obtenidos, ya que la eficacia de la metodología será mejor mientras más datos se tengan disponibles de un sector.

6.2.2 Caso 2

La determinación de la condición de calidad natural y línea base en este caso fue menos complejo que el caso anterior, debido a que se contaba con la información del estudio de Golder, el cual aportó con información geológica, hidrogeológica e información geoquímica específica para el acuífero MNT. Al trabajar a una escala más pequeña, se pudo integrar de mejor manera la información geológica con la información de los pozos.

Los resultados de calidad natural con menor variación entre ambas metodologías se obtuvieron en el sector de Monturaqui, esto puede estar asociado a que era el sector que tenía mayor disponibilidad de datos, además de ser el que se encontraba más lejos de Salar de Atacama, por lo que los datos eliminados por el criterio de preselección fueron menores con respecto a los otros sectores.

Con respecto al sector de Callejón, se pudo determinar la calidad natural y la línea base con la metodología de Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006). Sobre esta última metodología, al momento de calcular la línea base, los datos utilizados fueron los mismos que se usaron para calidad natural, debido a que los datos de los últimos 5 años eran los únicos datos que había disponible. Por lo tanto, al calcular la línea base y la calidad natural con la metodología de Wendland se obtuvieron los mismos resultados (Tabla 5.16).

Por lo anterior, la aplicación de la metodología es factible a una escala local y con una base de datos como la del sector de Monturaqui.

6.3 Limitantes de la metodología

Es posible que determinar el valor asociado a la calidad natural sea muy difícil, incluso imposible debido a la omnipresencia del factor antrópico. Sin embargo, las metodologías aquí presentadas intentan acercarse lo más posible a esa condición. La principal limitante de ambas metodologías es la escasez de una base de datos histórica que permita caracterizar la evolución en el tiempo del acuífero, así como la escasa cantidad de pozos que representen espacialmente algunos acuíferos.

De los resultados obtenidos se observó que la metodología de Wendland tiene menos limitantes que la metodología de Müller debido a que no considera la aplicación de criterios de preselección. La metodología de Müller no funciona bien en acuíferos que pueden estar afectados por la presencia de un salar, una intrusión salina o que tengan una alta concentración de nitratos.

A pesar de los supuestos que puedan tener las metodologías, se puede llegar a valores a los cuales se les asocia la calidad natural y la línea base, sin embargo, así como dice la Tabla 2.2, la interpretación que se puede hacer de estos datos es confusa, ya que no necesariamente los valores sobre el percentil 90 significan que hay una diferencia antrópica. Para estos casos se sugiere complementar los estudios con modelos hidrogeológicos u otras metodologías para poder comparar los resultados obtenidos.

7 CONCLUSIONES

El objetivo de esta memoria consistía en proponer una metodología de trabajo para abordar diferentes contextos hidrogeológicos donde se requería determinar la condición natural y la condición de línea de base de la calidad de aguas subterráneas a partir del análisis de otras metodologías que han planteado alternativas de cómo resolver esta problemática. En primer lugar, hay que reconocer la complejidad de determinar la condición de calidad natural como de línea base. Estamos en un escenario donde es prácticamente imposible conocer la condición de calidad natural debido a la escasez de datos históricos, esta tarea se dificulta más teniendo en consideración la omnipresencia del efecto antrópico en el mundo.

Para cumplir este objetivo se estudiaron las metodologías propuestas por Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006) quienes sugieren hacer uso de una metodología de separación de componentes y preselección de datos, respectivamente, para determinar la calidad natural de las aguas subterráneas. A partir de eso se elaboró una propuesta metodológica de 8 etapas para abordar dos casos de estudios chilenos de distintas escalas de trabajo. El primero era un caso a nivel regional donde se trabajó con pozos APR de distintos estudios de la DGA mientras que el segundo correspondía a un proyecto realizado en la región de Antofagasta al sur del Salar de Atacama.

Los resultados obtenidos, permiten concluir que es posible definir una metodología capaz de estimar la condición calidad natural de las aguas subterráneas para distintos casos de estudio basándose en los criterios definidos por Wendland et al. (2003) y Müller et al. (2006). También, se concluye que si es posible estimar la condición de línea base a través de la aplicación de la metodología anterior a un subconjunto de los datos, definida por una ventana temporal de los últimos 5 años.

A pesar de que se pueden plantear algunos lineamientos generales de cómo abordar estos casos, el análisis realizado permite concluir que no existe un manual de instrucciones único que se pueda ajustar a todos los tipos de acuíferos ya que cada sector donde se requiera determinar las condiciones de calidad natural y línea base tienen características geológicas e hidrogeológicas que los hacen únicos y de los que dependerá la cantidad de datos a utilizar, los iones a analizar o la metodología utilizada. Por lo que la metodología debe ser trabajada cuidadosamente y teniendo en consideración las particularidades geológicas, hidrogeológicas y la escala de trabajo de cada caso de estudio.

7.1 Recomendaciones

Como principales recomendaciones para estudios donde se requiera determinar la condición de línea base y calidad natural se recomienda:

- Complementar los análisis de calidad natural y línea base con otras metodologías que buscan acercarse a este concepto como los gráficos de probabilidad acumulada o el uso de modelos hidrogeológicos, especialmente en aquellos datos que presenten una gran dispersión de los datos (por ejemplo, aquellos datos con coeficientes de variación mayor 1)
- Se sugiere para estudios posteriores enriquecer la metodología propuesta en este trabajo a través del estudio de otros sectores acuíferos.
- Complementar la información hidrogeológica con información de terreno y estudios geofísicos que integren la información en profundidad con los datos geoquímicos

Como recomendación para trabajar con la metodología de Müller se sugiere lo siguiente:

La metodología de Müller aplica criterios de preselección y por lo tanto no funciona bien en acuíferos salinos o con altas concentraciones de nitratos. Por lo tanto, para estos casos se sugiere considerar dos alternativas:

1. Si se desea conocer la condición de calidad natural o línea base, no aplicar la metodología en acuíferos afectados potencialmente por actividades agrícolas (caso nitrato) ni que tengan presencia de intrusión salinas o salares (caso cloruro y sodio)
2. Aplicar la metodología de Müller y ajustar los valores de los criterios de preselección según el acuífero elegido para no eliminar todos los datos disponibles. Por ejemplo, para el caso de los nitratos permitir aquellas muestras que tengan una concentración de nitratos cercana a los 50 mg/L o en el caso cloruro y sodio permitir aquellas muestras que tengan una concentración de Na + Cl de 10000 mg/L. Para elegir estos valores de nitratos, sodio y cloruros se debe complementar con estudios geológicos que justifiquen las concentraciones a elegir y que se ajusten a las configuraciones geológicas de la zona.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, F. (2010). Metodología para determinar calidad natural en acuíferos. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2004). *Geochemistry, groundwater and pollution*. CRC press.
- BRIDGE D10 2006 Impact of Hydrogeological Condition on Pollutant Behaviour in Groundwater and Related Ecosystems. Research for Policy Support 2006. <http://www.igme.es/bridge/bridge.pdf>
- Coetsiers, M., Blaser, P., Martens, K., & Walraevens, K. (2009). Natural background levels and threshold values for groundwater in fluvial Pleistocene and Tertiary marine aquifers in Flanders, Belgium. *Environmental geology*, 57(5), 1155-1168.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1976). *Hidrología subterránea* (Vol. 1). Barcelona: Omega.
- DGA (1986)b; Mapa hidrogeológico de Chile: texto explicativo, escala 1:2.500.000; Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Series: SEB; No. 3
- DGA (2009). Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos. (Volumen 1). Recuperado de sad.dga.cl
- DGA (2015). Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región Lib. Bernardo O'Higgins, (S.D.T N°368)
- DGA (2016). Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región Lib. Bernardo O'Higgins (S.D.T N°383)
- DGA (2016). Diagnóstico de calidad de aguas subterráneas en la región metropolitana – complementario diagnóstico plan maestro de recursos hídricos región metropolitana de Santiago (S.D.T N°390)
- DGA (2016). Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Valparaíso (S.D.T N°382)
- DGA (2017). Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Coquimbo. (S.D.T N° 397)
- DGA (2018a). Diagnóstico de la calidad de las aguas subterráneas de la región del Maule (S.D.T N°409)
- DGA (2018b). Seguimiento de la calidad del agua subterránea – Pozos APR región de Coquimbo (DCPRH N°/19)

- Edmunds, W. M., Shand, P., Hart, P., & Ward, R. S. (2003). The natural (baseline) quality of groundwater: a UK pilot study. *Science of the Total Environment*, 310(1-3), 25-35
- Fernández, G (2018). Evaluación geoquímica-ambiental de sedimentos fluviales de hoja La Serena (1:250.000) por medio de análisis de datos composicionales. Memoria para optar al título de geólogo. Universidad de Chile
- Godoy, E., Schilling, D., Solari, M., & Fock, A. (2009). Geología del Área Rancagua–San Vicente de Tagua Tagua, Región del Libertador General Bernardo O’Higgins. Servicio Nacional de Geología y Minería. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N°118. Santiago.
- Golder Associates (2017). Estudio de Impacto Ambiental “Proyecto Monturaqui” Capítulo 3 Línea de base (Sección 3.2 Geología, geomorfología, riesgos geológicos y geomorfológicos)
- Gunnarsdottir, M. J., Gardarsson, S. M., St. Jonsson, G., Armannsson, H., & Bartram, J. (2015). Natural background levels for chemicals in Icelandic aquifers. *Hydrology Research*, 46(4), 647-660. DOI: 10.2166/nh.2014.123
- Marandi, A., & Karro, E. (2008). Natural background levels and threshold values of monitored parameters in the Cambrian-Vendian groundwater body, Estonia. *Environmental geology*, 54(6), 1217-1225.
- Mazor, E., & Dekker, M. (1997). Chemical and isotopic groundwater hydrology. *Environment International*, 23(2), 265-265.
- Molinari, A., Guadagnini, L., Marcaccio, M., & Guadagnini, A. (2012). Natural background levels and threshold values of chemical species in three large-scale groundwater bodies in Northern Italy. *Science of the Total Environment*, 425, 9-19.
- Moscoso, R. (1982). Hoja Los Andes, Carta geológica de Chile. N°52, *SERNAGEOMIN*. 60p.
- Müller, D., Blum, A., Hart, A., Hookey, J., Kunkel, R., Scheidleder, A., & Wendland, F. (2006). D18: Final proposal for a methodology to set up groundwater threshold values in Europe. *BRIDGE project, Background Criteria for the Identification of Groundwater Thresholds, 6th Framework Programme Contract*, 6538.
- Nieto, P., Custodio, E., & Manzano, M. (2005). Baseline groundwater quality: a European approach. *Environmental Science & Policy*, 8(4), 399-409.
- Nordstrom, D. K. (2008). *Questa Baseline and Pre-mining Ground-water Quality Investigation 25. Summary of Results and Baseline and Pre-mining Ground-water Geochemistry, Red River Valley, Taos County, New Mexico, 2001-2005*. US Geological Survey.
- Preziosi, E., Giuliano, G., & Vivona, R. (2010). Natural background levels and threshold values derivation for naturally As, V and F rich groundwater bodies:

- a methodological case study in Central Italy. *Environmental Earth Sciences*, 61(5), 885-897.
- SERNAGEOMIN, 2003. Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0, 2003). Santiago.
- Shand, P., Edmunds, W. M., Lawrence, A. R., Smedley, P., & Burke, S. (2007). *The natural (baseline) quality of groundwater in England and Wales*. Environment Agency.
- Tedd, K., Coxon, C., Missteart, B., Daly, D., Craig, M., Mannix, A., & Williams, T. H. (2017). Assessing and developing Natural Background Levels for chemical parameters in Irish groundwater. *Environmental Protection Agency Research Report*.
- Thiele, R. (1980). Hoja Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Carta Geológica de Chile*, 29, 21.
- USGS NAWQA: Glossary. (2018). Revisado de: <https://water.usgs.gov/nawqa/glos.html>
- Wendland, F., Berthold, G., Blum, A., Elsass, P., Fritsche, J. G., Kunkel, R., & Wolter, R. (2007). Derivation of natural background levels and threshold values for groundwater bodies in the Upper Rhine Valley (France, Switzerland and Germany). *Desalination*, 226(1-3), 160-168
- Wendland, F., Blum, A., Coetsiers, M., Gorova, R., Griffioen, J., Grima, J., & Panagopoulos, A. (2008). European aquifer typology: a practical framework for an overview of major groundwater composition at European scale. *Environmental Geology*, 55(1), 77-85.
- Wendland, F., Hannapel, S., Kunkel, R., Schenk, R., Voigt, H., & Wolter, R. (2003). A procedure to define Natural Groundwater Conditions of Groundwater Bodies in Germany. *Diffuse Pollution Conference*, (pág 7). Dublin.

9 ANEXOS

Tabla 9.1 Estadística descriptiva, metodología de Wendland caso 1 (Elaboración propia)

	Acuífero	Nº	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Promedio (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Coefficiente de variación	Mediana (mg/L)	P ₉₀ (mg/L)
Cl	Choapa	32	4.99	253.00	37.80	42.81	1.13	25.00	54.50
	Elqui	29	5.00	266.00	66.55	61.93	0.93	43.50	148.60
	Limarí	71	3.00	1529.60	165.30	303.55	1.84	36.00	482.40
	Maipo	176	0.29	306.00	109.71	82.63	0.75	103.00	217.00
	Aconcagua	19	13.40	90.40	45.40	24.76	0.55	44.30	83.40
	Casablanca	4	36.50	44.80	40.95	4.08	0.10	41.25	44.56
	Catapilco	2	120.00	221.00	170.50	71.42	0.42	170.50	210.90
	Estero cartagena	2	146.00	250.00	198.00	73.54	0.37	198.00	239.60
	Estero El Rosario	4	12.70	105.70	62.38	42.46	0.68	65.55	100.51
	Quintero	2	53.00	161.60	107.30	76.79	0.72	107.30	150.74
	Cachapoal	62	2.50	90.00	44.15	18.96	0.43	44.50	68.63
	Tinguiririca	34	13.00	60.00	29.51	13.49	0.46	25.90	52.84
	Mataquito	29	9.25	103.19	31.62	19.61	0.62	28.50	55.89
	Maule Medio	18	2.75	46.32	16.29	11.32	0.69	13.36	32.02
	Na	Choapa	32	11.40	205.00	47.92	43.54	0.91	31.80
Elqui		29	5.30	201.10	74.32	49.53	0.67	47.20	157.46
Limarí		71	7.40	553.00	103.58	124.13	1.20	48.80	302.70
Maipo		176	7.50	166.00	59.39	36.45	0.61	56.10	107.00
Aconcagua		19	9.50	84.90	33.88	20.75	0.61	29.50	66.74
Casablanca		4	25.90	33.50	31.43	3.69	0.12	33.15	33.41
Catapilco		2	86.30	102.00	94.15	11.10	0.12	94.15	100.43
Estero cartagena		2	79.30	155.60	117.45	53.95	0.46	117.45	147.97
Estero El Rosario		4	22.30	63.40	43.40	19.38	0.45	43.95	61.12
Quintero		2	43.40	124.40	83.90	57.28	0.68	83.90	116.30
Cachapoal		62	6.30	94.00	30.18	16.55	0.55	25.75	51.99
Tinguiririca		34	10.00	45.20	21.30	9.46	0.44	18.10	32.81
Mataquito		29	9.75	32.41	16.53	5.77	0.35	15.55	23.96
Maule Medio		18	7.84	58.89	18.69	14.69	0.79	12.12	40.37
K		Choapa	32	0.30	3.70	1.71	0.79	0.46	1.60
	Elqui	29	0.40	6.00	3.01	1.08	0.36	3.00	4.14
	Limarí	71	0.90	10.20	2.87	2.23	0.77	2.10	5.70
	Maipo	176	0.02	10.00	2.40	2.15	0.89	1.58	5.37
	Aconcagua	19	0.20	8.14	2.04	1.86	0.91	1.54	3.96
	Casablanca	4	1.24	2.32	1.69	0.46	0.27	1.60	2.13
	Catapilco	2	1.80	1.90	1.85	0.07	0.04	1.85	1.89
	Estero cartagena	2	2.30	3.70	3.00	0.99	0.33	3.00	3.56

	Acuífero	Nº	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Promedio (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Coefficiente de variación	Mediana (mg/L)	P₉₀ (mg/L)
	Estero El Rosario	4	1.58	3.16	2.16	0.72	0.33	1.95	2.87
	Quintero	2	1.30	2.10	1.70	0.57	0.33	1.70	2.02
	Cachapoal	62	0.21	6.99	2.53	1.27	0.50	2.45	3.98
	Tinguiririca	34	0.94	7.58	2.81	1.70	0.61	2.35	5.00
	Mataquito	29	0.35	5.97	3.42	1.68	0.49	3.63	5.40
	Maule Medio	18	0.69	5.91	2.80	1.67	0.60	2.24	5.59
Mg	Choapa	32	5.30	53.00	16.74	10.78	0.64	12.20	29.51
	Elqui	29	4.40	65.80	23.51	12.14	0.52	19.50	36.30
	Limarí	71	3.50	252.00	37.18	45.78	1.23	23.60	79.50
	Maipo	176	0.52	90.30	28.66	19.11	0.67	22.95	59.85
	Aconcagua	19	4.60	56.80	27.01	14.45	0.54	28.00	43.26
	Casablanca	4	15.80	24.10	20.98	3.59	0.17	22.00	23.50
	Catapilco	2	26.60	28.50	27.55	1.34	0.05	27.55	28.31
	Estero cartagena	2	35.60	63.60	49.60	19.80	0.40	49.60	60.80
	Estero El Rosario	4	11.20	32.80	19.78	9.28	0.47	17.55	28.72
	Quintero	2	25.00	30.30	27.65	3.75	0.14	27.65	29.77
	Cachapoal	62	3.90	60.00	22.14	12.47	0.56	19.05	41.64
	Tinguiririca	34	10.00	39.90	18.04	8.44	0.47	15.65	30.19
	Mataquito	29	3.84	27.62	10.10	6.29	0.62	7.91	17.96
	Maule Medio	18	1.00	43.48	10.97	11.12	1.01	5.92	23.83
NO₃	Choapa	32	0.22	28.10	5.73	5.93	1.04	4.76	12.37
	Elqui	29	1.64	47.66	17.12	13.20	0.77	13.60	40.00
	Limarí	71	0.00	36.80	9.30	10.19	1.10	4.56	26.40
	Maipo	176	1.24	114.00	25.81	19.70	0.76	20.55	52.25
	Aconcagua	19	1.00	72.00	22.74	16.90	0.74	19.70	38.98
	Casablanca	4	13.70	59.40	31.60	19.85	0.63	26.65	50.91
	Catapilco	2	15.80	18.77	17.29	2.10	0.12	17.29	18.47
	Estero cartagena	2	19.80	43.00	31.40	16.40	0.52	31.40	40.68
	Estero El Rosario	4	1.00	23.30	11.18	10.04	0.90	10.20	20.87
	Quintero	2	12.70	18.10	15.40	3.82	0.25	15.40	17.56
	Cachapoal	62	0.10	64.20	22.90	13.53	0.59	21.20	42.38
	Tinguiririca	34	2.50	59.30	23.79	12.47	0.52	21.45	37.79
	Mataquito	29	0.08	54.34	16.00	11.84	0.74	15.32	26.26
	Maule Medio	18	3.43	72.72	19.03	17.38	0.91	13.66	39.50
SO₄	Choapa	32	14.40	200.89	77.61	35.17	0.45	72.15	119.94
	Elqui	29	11.00	598.90	237.99	100.53	0.42	223.10	280.04
	Limarí	71	1.60	1066.20	181.77	202.62	1.11	110.50	457.80

Acuífero	Nº	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Promedio (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Coficiente de variación	Mediana (mg/L)	P90 (mg/L)
Maipo	176	2.06	639.00	222.68	152.78	0.69	225.00	403.00
Aconcagua	19	20.40	573.70	165.46	118.70	0.72	150.40	238.48
Casablanca	4	8.10	16.70	12.95	3.64	0.28	13.50	16.01
Catapilco	2	22.60	68.00	45.30	32.10	0.71	45.30	63.46
Estero cartagena	2	45.90	301.50	173.70	180.74	1.04	173.70	275.94
Estero El Rosario	4	11.70	28.50	19.53	8.77	0.45	18.95	27.63
Quintero	2	78.50	135.10	106.80	40.02	0.37	106.80	129.44
Cachapoal	62	17.40	295.00	138.34	57.57	0.42	132.00	207.60
Tinguiririca	34	21.90	233.00	100.68	44.47	0.44	89.95	157.22
Mataquito	29	4.55	169.84	69.51	39.29	0.57	73.60	118.24
Maule Medio	18	1.58	189.18	29.16	41.51	1.42	18.90	40.91

Tabla 9.2 Estadística descriptiva, metodología de Müller caso 1 (Elaboración propia)

	Acuífero	Nº	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Promedio (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Coficiente de variación	Mediana (mg/L)	P90 (mg/L)
Cl	Choapa	28	4.99	253.00	37.84	45.86	1.21	24.50	56.45
	Elqui	9	5.00	186.00	43.50	56.91	1.31	27.47	93.20
	Limarí	43	3.00	529.10	70.82	125.26	1.77	16.00	230.00
	Maipo	39	0.29	171.00	53.85	49.37	0.92	40.80	138.00
	Aconcagua	4	14.40	82.10	40.03	30.93	0.77	31.80	70.73
	Estero El Rosario	2	12.70	105.70	59.20	65.76	1.11	59.20	96.40
	Cachapoal	8	7.00	53.50	30.39	14.48	0.48	30.50	47.06
	Tinguiririca	3	28.20	47.80	40.77	10.91	0.27	46.30	47.50
	Mataquito	9	9.25	103.19	31.79	28.40	0.89	25.48	50.95
	Maule Medio	6	2.75	29.58	12.36	9.42	0.76	10.53	21.94
Na	Choapa	28	11.40	205.00	47.89	46.63	0.97	30.00	118.00
	Elqui	9	5.30	167.40	64.10	58.05	0.91	47.20	159.40
	Limarí	43	7.40	328.70	62.17	79.11	1.27	29.60	170.16
	Maipo	39	7.50	101.00	38.26	27.73	0.72	26.40	77.76
	Aconcagua	4	9.50	65.90	27.55	26.16	0.95	17.40	52.85
	Estero El Rosario	2	22.30	63.40	42.85	29.06	0.68	42.85	59.29
	Cachapoal	8	6.30	68.60	32.83	23.24	0.71	22.10	68.25
	Tinguiririca	3	14.90	42.60	29.50	13.91	0.47	31.00	40.28
	Mataquito	9	10.44	18.95	13.58	2.97	0.22	12.15	17.03
	Maule Medio	6	11.38	49.74	21.43	14.47	0.68	17.14	35.75
K	Choapa	28	0.30	3.50	1.58	0.69	0.44	1.50	2.20
	Elqui	9	1.00	6.00	2.74	1.44	0.53	2.94	3.60
	Limarí	43	0.90	5.70	2.02	1.16	0.57	1.50	3.80

	Acuífero	Nº	Min (mg/L)	Max (mg/L)	Promedio (mg/L)	Desviación estándar (mg/L)	Coficiente de variación	Mediana (mg/L)	P90 (mg/L)
	Maipo	39	0.02	6.29	1.45	1.56	1.07	0.77	3.74
	Aconcagua	4	0.20	1.22	0.68	0.43	0.64	0.65	1.09
	Estero El Rosario	2	1.70	3.16	2.43	1.03	0.42	2.43	3.01
	Cachapoal	8	0.64	2.40	1.83	0.60	0.33	1.99	2.33
	Tinguiririca	3	1.10	5.00	3.18	1.96	0.62	3.43	4.69
	Mataquito	9	0.35	4.95	2.42	1.68	0.70	1.67	4.52
	Maule Medio	6	1.33	5.75	3.71	1.94	0.52	4.09	5.64
Mg	Choapa	28	5.30	53.00	15.27	10.67	0.70	11.90	28.70
	Elqui	9	4.40	65.80	22.98	19.36	0.84	18.30	47.16
	Limarí	43	3.50	79.50	23.40	21.88	0.93	14.20	55.52
	Maipo	39	0.52	29.50	15.08	7.66	0.51	17.10	22.90
	Aconcagua	4	4.60	56.80	20.72	24.29	1.17	10.74	43.63
	Estero El Rosario	2	11.20	19.20	15.20	5.66	0.37	15.20	18.40
	Cachapoal	8	3.90	30.40	18.81	7.71	0.41	19.80	25.36
	Tinguiririca	3	13.30	24.70	17.10	6.58	0.38	13.30	22.42
	Mataquito	9	3.84	17.31	7.74	4.32	0.56	6.04	13.02
	Maule Medio	6	1.00	20.32	6.73	6.88	1.02	5.21	12.91
NO₃	Choapa	28	0.22	8.52	3.91	2.82	0.72	3.55	7.80
	Elqui	9	1.64	8.48	4.57	1.94	0.42	4.23	6.46
	Limarí	43	0.00	9.80	2.82	2.75	0.98	1.78	7.18
	Maipo	39	1.24	9.54	6.05	2.24	0.37	6.62	8.97
	Aconcagua	4	1.00	9.40	4.03	3.79	0.94	2.85	7.75
	Estero El Rosario	2	1.00	5.20	3.10	2.97	0.96	3.10	4.78
	Cachapoal	8	0.10	9.90	4.00	3.89	0.97	2.55	9.13
	Tinguiririca	3	2.50	9.30	6.20	3.44	0.55	6.80	8.80
	Mataquito	9	0.08	9.06	4.88	3.40	0.70	6.50	8.07
	Maule Medio	6	3.43	7.76	5.38	1.55	0.29	5.22	7.10
SO₄	Choapa	28	14.40	200.89	76.13	35.82	0.47	72.15	108.78
	Elqui	9	11.00	598.90	236.55	179.89	0.76	221.50	444.18
	Limarí	43	1.60	528.40	152.99	143.91	0.94	103.00	378.87
	Maipo	39	2.06	358.00	124.52	109.00	0.88	83.20	300.60
	Aconcagua	4	20.40	573.70	191.48	259.78	1.36	85.90	442.06
	Estero El Rosario	2	12.30	28.50	20.40	11.46	0.56	20.40	26.88
	Cachapoal	8	19.00	164.00	99.49	44.56	0.45	95.65	149.37
	Tinguiririca	3	21.90	164.00	93.30	71.05	0.76	94.00	150.00
	Mataquito	9	4.55	109.04	54.82	34.35	0.63	54.33	88.09
	Maule Medio	6	1.58	21.32	11.18	7.80	0.70	11.73	19.49

