

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**CALIDAD Y PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN EL AGUA DE LA  
REGIÓN METROPOLITANA: ESTUDIO DEL ÁREA CONCESIÓN  
SMAPA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

OMAR ANDRÉS LORCA RIVERA

PROFESOR GUÍA:  
DOLORINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
CAROLINA GUZMAN HERNÁNDEZ  
ELENA FLORIA

SANTIAGO DE CHILE  
2018

## **CALIDAD Y PROCESOS HIDROGEOQUÍMICOS EN EL AGUA DE LA REGIÓN METROPOLITANA: ESTUDIO DEL ÁREA CONCESIÓN SMAPA**

En este trabajo se presenta un estudio hidrogeoquímico del sector poniente de la Cuenca de Santiago, Región Metropolitana, que corresponde al área de abastecimiento del Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Maipú (SMAPA).

En esta zona, se ha reconocido un acuífero libre formado por depósitos aluviales y fluviales de los Ríos Maipo y Mapocho. Este mismo acuífero pasa a ser localmente semiconfinado por la presencia de depósitos piroclásticos. Morales (2002) ha definido 3 unidades hidrogeológicas que llegan hasta el basamento (480 m). Iriarte (2003) y Araneda et al. (2010) interpretan que la recarga natural del acuífero, estaría asociada principalmente a la infiltración de los cauces superficiales del Río Maipo y Mapocho en la Cordillera Principal y a la percolación de aguas lluvias en los depósitos de piedemonte de la misma cordillera.

Se recopilaron los antecedentes de los pozos SMAPA y, se realizó un muestreo de agua en cuarenta pozos que captan agua a distinta profundidad (70 a 300 m). Se analizaron elementos mayores, menores y trazas, y se trataron los datos obtenidos mediante diagramas de clasificación, gráficos binarios, análisis estadísticos y geoestadísticos. Los datos fueron comparados con las Normas Chilenas de calidad de agua potable y riego.

Las muestras analizadas tienen un pH entre 7,1 a 8,5, una temperatura ( $T^{\circ}$ ) de 16,7°C a 23,1°C. La conductividad eléctrica (C.E.) varía entre 393,8 y 1501  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y, en el área de estudio, tiende a aumentar en la dirección preferencial de flujo, es decir hacia el SW. A partir de la clasificación de elementos mayores, se determinó que el agua subterránea es de tipo  $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{Ca}^{2+}$  y, de acuerdo a las correlaciones encontradas, estas composiciones químicas parecen influenciadas por la disolución de carbonatos y yeso, lo que se relaciona con una importante recarga proveniente de la cuenca del Maipo. No obstante, 4 muestras ubicadas en la parte norte, presentan menor C.E. y una proporción de  $\text{HCO}_3^-$  similar a  $\text{SO}_4^{2-}$ , indicando un menor tiempo de residencia o un agua de recarga más reciente.

Adicionalmente, se pudo detectar una variación hidrogeoquímica relacionada con la profundidad en algunos sondajes, lo que permitió identificar zonas en que se desarrolla un segundo nivel de acuífero a partir de 200 m de profundidad, caracterizado por tener menores valores de C.E. y  $\text{NO}_3^-$ . No obstante, esta diferenciación no es observable en toda el área de estudio, indicando que no hay de una separación física continua entre los niveles. Es probable que exista mezcla de aguas de diferente profundidad favorecida, en algunos casos, por el deficiente diseño de los pozos.

La información de los pozos (estratigrafía, habilitación y producción), ha permitido reconocer un acuífero, en explotación, cuya profundidad llega hasta 300 m de profundidad, que no refleja exactamente las unidades hidrogeológicas descritas por Morales (2002).

Respecto a la calidad de agua para consumo humano, con excepción del  $\text{NO}_3^-$ , no se han detectado problemas, pues todas las muestras cumplen con la normativa vigente (NCh N°409) en todos los demás parámetros. En el caso del  $\text{NO}_3^-$ , 57% de las muestras presentan concentraciones mayores 20 mg/l. Además, en seis muestras se han medido valores superiores a 50 mg/l, límite permitido por la NCh. N°409, lo que se ha asociado a actividad antrópica. En consideración de esto, se reconoce que las muestras que incumplen la normativa, se ubican en las zonas de mayor demografía y con las instalaciones sanitarias más antiguas, indicando que una posible fuente de contaminación podrían ser las filtraciones de la red de alcantarillado, aunque también, se reconocen fuentes puntuales como cementerios, sectores industriales y zonas con actividad agrícola.

## Agradecimientos

En el cierre de, quizás la etapa más importante y, por cierto, la más larga que me ha tocado vivir en este cuarto de siglo, quisiera tomarme el tiempo de agradecer a la vida por todas las piedras que ha puesto en mi camino, que de alguna manera, me han llevado hasta donde estoy, en que puedo mirar el espejo feliz con el resultado de la persona en que me he convertido.

Agradezco a mis Padres, Pamela y Larry, a mi Tío Félix y tía Jenny, que sin su formación y cariño todos estos años, no sería la persona de hoy. Gracias de verdad por toda la paciencia, y el tiempo que dedicaron en educarme y en hacerme feliz.

A Linda Daniele, mi profesora guía, por su fundamental ayuda en el proceso de este trabajo y la motivación entregada para seguir adelante. Me siento bendecido de haber tenido como guía, a una persona de ética intachable, preocupada por las problemáticas de la sociedad y de una simpatía tal, que hasta incluso cuando podía decir que todo estaba malo, siempre sentí que lo hacía con un cierto cariño. Gracias por el tiempo de atender a todas las dudas que surgieron y por la exhaustiva revisión final. También a los miembros de comisión, Elena Floria y Carolina Guzmán, especialmente a Carolina, que fue también mi primera jefa en un trabajo de geología, y que con el tiempo incluso nos hicimos amigos. Has sido fundamental en mi formación como profesional y, de verdad, eres un ejemplo a seguir por tu vocación, responsabilidad y tu esfuerzo en cada tarea que desarrollas.

Al Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Maipú (SMAPA), por facilitar toda la información disponible para realizar este trabajo, y la posibilidad de desarrollar nuevos datos permitiendo el muestreo de sus fuentes.

A mis amigos, por haber hecho de este proceso universitario una aventura inolvidable. No olvidaré todos los “terraceos”, los carretes en el patio de los naranjos y, como no, todas las historias y anécdotas ocurridas en los terrenos

A Stephanie Cornejo, te conocí hace un año, y ya te convertiste en un pilar fundamental en mi vida y en la compañera que me gustaría tener siempre a mi lado. Gracias por todo el apoyo y cariño incondicional que me has dado en todos los aspectos de mi vida.

Finalmente, a todas las personas que he conocido, y que de alguna manera han aportado su granito de arena en esta etapa que está por finalizar.

## TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción.....	1
1.1.1	Formulación del estudio propuesto.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.2.1	Objetivo general.....	2
1.2.2	Objetivos específicos.....	2
1.3	Hipótesis de trabajo.....	2
1.4	Metodología de trabajo.....	2
2	Antecedentes del área de estudio.....	4
2.1	Ubicación zona de estudio.....	4
2.2	Situación Geográfica y Geológica.....	5
2.1	Climatología.....	7
2.2	Situación Socioeconómica y Usos de Suelo.....	9
2.3	Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Maipú.....	12
2.4	Estudios previos.....	15
3	Marco Hidrológico.....	17
3.1	Hidrología e Hidroquímica.....	17
3.2	Hidrogeología.....	19
3.2.1	Unidades Acuíferas.....	19
3.2.2	Geometría del Acuífero en el área de estudio.....	20
3.2.3	Perfil vertical de C.E. y T°.....	22
3.2.4	Recarga del acuífero y relación con aguas superficiales.....	23
3.3	Nivel freático (NF).....	24
3.4	Piezometría del área de estudio (NP).....	25
4	Hidrogeoquímica.....	27
4.1	Resultados y Distribución de los puntos de muestreo.....	27
4.2	Clasificación de aguas y distribución espacial.....	30
4.2.1	Elementos Mayores.....	30
4.2.2	Parámetros físico-químicos.....	34
4.3	Identificación de procesos hidrogeoquímicos.....	37
4.3.1	Análisis exploratorio de datos.....	37
4.3.2	Diagramas binarios y correlaciones.....	41
4.3.3	Distribución de elementos trazas.....	54
4.3.4	Análisis multivariante.....	57
4.4	Índices de calidad.....	62

4.4.2	Relación diseño de sondajes y calidad de agua .....	66
4.5	Focos potenciales de contaminación .....	68
5	Conclusiones y recomendaciones.....	72
5.1	Conclusiones .....	72
5.2	Recomendaciones .....	74
	Bibliografía .....	76
	Anexos .....	81

## Índice de figuras

Figura 1: Ubicación área de estudio. UTM (WGS 84, 19S).....	4
Figura 2: Unidades relleno sedimentario de la Depresión Intermedia. Tomado de Muñoz et al., (2015). En rojo se destaca el área de estudio. UTM (WGS 84, 19S). ....	6
Figura 3: Mapa geológico simplificado de la zona de estudio. Modificado de Sellés y Gana (2001). UTM (WGS 84, 19S). ....	8
Figura 4: T° promedio mensual 2016, estación San Pablo. Dirección Meteorológica de Chile. ....	9
Figura 5: Precipitaciones promedio mensual 2016, estación San Pablo. Dirección Meteorológica de Chile.....	9
Figura 6: Gráfico de la evolución de población en la comuna de Maipú desde el año 1960 hasta el 2012. Extraído de Hernández (2016).....	10
Figura 7: Evolución urbana de Maipú entre 1970 y 2012. Cartografía realizada por la Municipalidad de Maipú (2015). UTM (WGS 84, 19S). ....	11
Figura 8: Mapa de los usos de suelo en el área de estudio. Desarrollado a partir del Catastro de Uso de Suelo desarrollado por CONAF (2013) y Plan Regulador Maipú (2016). UTM (WGS 84, 19S).....	12
Figura 9: Relación entre la profundidad de los sondajes y su caudal de explotación.....	14
Figura 10: Área de Producción del SMAPA, y sus 20 sectores de distribución. UTM (WGS 84, 19S).....	15
Figura 11: Ríos Maipo, Mapocho y principales alimentadores. Puntos de muestreo realizados por González (1991) en aguas superficiales. UTM (WGS 84, 19S). ....	18
Figura 12: Modelo digital de elevación, ubicación del perfil LSC2 de Morales (2002) y las columnas estratigráficas desarrolladas. UTM (WGS 84, 19S).....	20
Figura 13: Perfil hidrológico LSC2 que cruza E-W el área de estudio. Modificado de Morales (2002). ....	21
Figura 14: Columnas estratigráficas de la zona norte, centro y sur del área de estudio y su correlación espacial. ....	22
Figura 15: Perfiles verticales de T° y C.E. en 3 pozos profundos representativos de la zona norte, centro y sur del área de estudio. ....	23
Figura 16: Nivel freático del área de estudio, en que se identifican los pozos con su ID. Sistema de coordenadas UTM Huso 19S. ....	25
Figura 17: Cota hidráulica calculada para el área de estudio, indentificando los pozos por su ID. UTM Huso 19S. ....	26
Figura 18: Distribución de los pozos seleccionados en el estudio, que son separados según la profundidad de su tramo ranurado a los 200 m. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S).....	30
Figura 19: Diagrama Piper, diferenciando los puntos muestreados por la profundidad ranurada.....	31

Figura 20: Diagramas de Stiff para las muestras del área de estudio. En A) se ilustran los diagramas para los pozos de P.R < 200 m. Y en B) aquellos de P.R entre 200 y 250 m de profundidad. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S). .....	33
Figura 21: Distribución del pH, distinguiendo los pozos según la profundidad de la ranura. UTM (WGS 84, 19S). .....	34
Figura 22: Distribución de la T° (°C), distinguiendo los pozos según su profundidad ranurada. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S). .....	35
Figura 23: Distribución de C.E. (μS/cm) distinguiendo los pozos según su profundidad ranurada. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S). .....	36
Figura 24: Distribución del Eh (mV), distinguiendo los pozos según su profundidad ranurada. Sistema de coordenadas. UTM (WGS 84, 19S). .....	37
Figura 25: Concentraciones de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en el pozo N°19 entre los años 2014 y 2016. En línea naranja se grafica el límite que exige la NCh 409/1. ....	39
Figura 26: Diagramas de Caja y Bigotes ( <i>boxplots</i> ) de los elementos mayores, T° y pH. ....	40
Figura 27: Relación asimetría/error típico asimetría. ....	41
Figura 28: Diagramas binarios de cationes y aniones mayores (meq/l), y T° (°C) vs Cl <sup>-</sup> . Línea roja corresponde al límite de la NCh 409 para NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> .....	45
Figura 29: valores NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> y C.E., en relación a la P.R y el nivel estático. ....	46
Figura 30: Diagramas de Gibbs para cationes (a) y aniones (b), que indican el mecanismo controlador de la química de las aguas subterráneas. TDS en ppm, cationes y aniones en meq/l .....	47
Figura 31: razón iónica de rCa <sup>2+</sup> /rMg <sup>2+</sup> vs rCl <sup>-</sup> .....	48
Figura 32: Distribución espacial de rCa <sup>2+</sup> /rMg <sup>2+</sup> . UTM (WGS 84, 19S) .....	49
Figura 33: Diagrama de (Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> ) vs. (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> + SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ).....	50
Figura 34: Diagrama binario que representa la disolución de carbonatos.....	50
Figura 35: Gráfico de dispersión de (Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> )-(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> +HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) versus (Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> )-Cl <sup>-</sup> ....	51
Figura 36: Gráfico de índices cloro alcalinos, CAI I vs CAI II. ....	52
Figura 37 Relación iónica de rCl/Na versus rCl.....	53
Figura 38: Distribución espacial de rCl <sup>-</sup> /rNa <sup>+</sup> . UTM (WGS 84, 19S) .....	53
Figura 39: Distribución de As (ppb) distinguiendo entre pozos según la profundidad ranurada. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S). ....	55
Figura 40: Distribución de Cr (ppb) distinguiendo entre pozos según la profundidad ranurada. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S). ....	56
Figura 41: Distribución de Sr (ppb) distinguiendo entre pozos según la profundidad ranurada. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S). ....	57
Figura 42: Dendrograma de elementos mayoritarios, T° y pH. ....	59
Figura 43: Dendrograma de elementos mayoritarios y trazas. ....	59

Figura 44: Dendrograma de las muestras del área de estudio. En color verde se identifican las muestras de P.R > 200 m. ....	60
Figura 45: Componentes Principales obtenidos usando los elementos mayoritarios.....	62
Figura 46: Concentraciones de $\text{NO}_3^-$ cerca y por sobre el límite permitido por la Norma Chile 409/1 de calidad de agua potable y su relación con el nivel freático. UTM (WGS 84, 19S).....	64
Figura 47: Muestras con $\text{SO}_4^{2-}$ cerca y sobre el límite permitido por la Norma Chilena de Riego, y su relación con la cota hidráulica .....	65
Figura 48: Distribución espacial de las muestras que se encuentran cerca y sobre el límite establecido por la norma Chilena de riego. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S).....	66
Figura 49: Habilitación de pozos y su relación el flujo de agua entrante. La línea punteada marcaría el límite entre los dos niveles de acuífero. ....	68
Figura 50: Densidad de Población (Hab/ha) y contenido de $\text{NO}_3^-$ . Densidad basada en información del Censo 2012. UTM (WGS 84, 19S).....	69
Figura 51: Potenciales focos de contaminación, concentraciones de $\text{NO}_3^-$ y dirección de flujo del agua subterránea dentro y fuera del área de estudio. Cobertura de suelo realizada por Hernández (2106). UTM (WGS 84, 19S).....	71



## Índice de tablas

Tabla 1: Pozos seleccionados para el estudio, profundidad y parámetros medidos <i>in situ</i> .....	28
Tabla 2: Resultados de elementos mayoritarios en el agua subterránea del área de estudio y cálculo del balance iónico de cargas.....	29
Tabla 3: Estadística descriptiva. T° medida en °C, C.E. en $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Eh en mV y los elementos mayoritarios medidos en l/s. ....	41
Tabla 4: Matriz de correlaciones de Spearman de las variables estudiadas .....	43
Tabla 5: Composición lineal de los componentes principales a partir de las variables originales .....	61
Tabla 6: Clasificación de aguas para riego según salinidad y TDS(James el al., 1982)	63
Tabla 7: Norma 409/1 Of.2005 .....	64
Tabla 8: Parámetros evaluados en Norma 1333 Of. 78 y su concentración máxima .....	65

# 1 Introducción

## 1.1.1 Formulación del estudio propuesto

El agua es un recurso natural, indispensable y limitado para la mayoría de los organismos que habitan el planeta y para gran parte de las actividades económicas y productivas del hombre.

El agua subterránea a su vez, es una fuente importante de abastecimiento. Actualmente, más del 50% de la población mundial depende de este recurso, y para muchas comunidades pequeñas y rurales, es el único recurso de consumo (UNESCO 2009).

En consideración de la fundamental importancia que tienen las aguas subterráneas para el consumo humano, es fundamental velar por su calidad, dado que los recursos subterráneos se encuentran bajo una intensa presión antropogénica y una constante amenaza de contaminación, derivada de las actividades agrícolas, ganadería, urbanización y la industria (Kazakis y Voudouris, 2015). Uno de los problemas que afecta la calidad natural del agua es la presencia de  $\text{NO}_3^-$ . La contaminación puede ser de tipo puntual (efluentes de tanques sépticos, depósitos de excretas humanas o animales, cría intensiva de ganado) o difusa (uso de fertilizantes nitrogenados, ganadería). Según Edmunds y Shand (2008), el contenido de  $\text{NO}_3^-$  se ha convertido en un importante indicador ambiental del impacto humano en ecosistemas acuáticos subterráneos en todo el mundo.

En la Región Metropolitana de Chile, las aguas subterráneas juegan un rol fundamental, pues de acuerdo a la Dirección General de Aguas (2017), un 25% de los derechos de agua destinados a consumo humano, uso doméstico y/o saneamiento, se obtuvo mediante agua subterránea. Es el caso de la zona surponiente de la ciudad Santiago, en que SMAPA abastece de agua potable a los habitantes de las comunas de Maipú, Cerrillos y Estación Central (aproximadamente un millón de personas), exclusivamente por aprovechamiento de agua subterránea.

Esta zona de Santiago se ha caracterizado por su extensa actividad agrícola en el último siglo, y por su crecimiento exponencial en el número de habitantes desde la década de 1970 (Hernández, 2016), siendo Maipú la segunda comuna más poblada de Santiago con cerca de 600.000 habitantes. Esto, a su vez, significa una amenaza de contaminación del acuífero. De hecho, en los pozos del SMAPA se han detectado concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  superiores a los 20 mg/l en pozos menores a 200 m de profundidad, e inclusive, algunos se encuentran por sobre el límite puesto por la Norma Chilena de Agua Potable (50 mg/l) para este parámetro. Lo anterior, indicaría que el agua subterránea estaría influenciada por procesos de contaminación antrópica que han comprometido los recursos hídricos hasta elevadas profundidades. Esto, teniendo en cuenta que comúnmente los valores naturales de  $\text{NO}_3^-$  en el agua subterránea son menores a 5 mg/l (Giuliano y Blarasin, 2014; Cruz y Andrade, 2015; Vystavna et al., 2015).

En consideración de los antecedentes expuestos, este trabajo pretende evaluar la calidad y procesos fisicoquímicos existentes en el agua subterránea en el área de producción de SMAPA, junto con identificar los valores de fondo natural. Y, por otra parte, identificar si existe relación entre la construcción de los sondajes (profundidad, sello sanitario, ubicación superficie captante) y la hidrogeoquímica.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Conocer el estado actual de la calidad del agua en el área de la Región Metropolitana que se abastece de la producción subterránea y los procesos que controlan la hidrogeoquímica. También pretende servir como línea base para futuros estudios, permitiendo observar la evolución del acuífero en el tiempo.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Caracterización hidrogeológica de la zona de estudio, mediante la revisión de informes de perforación de pozos y su estratigrafía.
- Determinación y clasificación hidrogeoquímica del agua subterránea (análisis estadístico y geoestadístico, gráficos binarios, razones iónicas con especial atención al  $\text{NO}_3^-$ ).
- Determinar si existe relación entre la calidad del agua y el diseño de los sondajes.

## **1.3 Hipótesis de trabajo**

El área de estudio concentró una alta actividad agrícola y ganadera en el pasado, que fue disminuyendo desde la década de 1960, para dar paso a una acelerada urbanización y un fuerte incremento poblacional. Debido a esto, se hipotiza que las aguas subterráneas reflejan estas presiones externas en su quimismo.

A partir de los análisis fisicoquímicos y los datos hidrogeológicos de la zona de estudio, se espera mejorar el conocimiento del acuífero en lo que se refiere a su geometría y funcionamiento.

## **1.4 Metodología de trabajo**

Se reúnen los antecedentes de la zona de estudio, referentes a la geología, geomorfología, hidrología, hidrogeología y estadística de la zona. Para dicha tarea se utiliza la información disponible en los servicios públicos tales como la comuna, el Minería (SERNAGEOMIN), el Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (SMAPA), la Dirección General de Aguas (DGA), y estudios realizados anteriormente.

Para el desarrollo del trabajo, se ha realizado un muestreo de agua con sus correspondientes análisis de laboratorio en 40 puntos acuíferos ubicados en el área de

producción SMAPA. Para su selección se ha considerado la distribución espacial y la profundidad de la obra de captación.

El muestreo de agua subterránea puede desglosarse en tres etapas:

- 1) Lavado del material de muestreo, que comprende las botellas en que se tomarán las muestras, junto sus respectivas tapas y contratapas. Este trabajo fue realizado en el laboratorio de geoquímica de fluidos del Centro de Excelencia de los Andes (CEGA) en el Departamento de Geología siguiendo la metodología del propio laboratorio.
- 2) El muestreo de agua (cationes, aniones y trazas) de 40 pozos de producción para ser analizados en laboratorio, junto a la medición *In situ* de los parámetros físico-químicos: Temperatura (T°), pH, conductividad eléctrica (C.E.) y potencial de óxido-reducción (Eh) mediante un multiparámetro portable marca Hach MP-6 Series. Todos los pozos se encontraban en funcionamiento al momento de realizar el muestreo, salvo uno (n°19), el cuál fue puesto en marcha para realizar la toma de muestra. Adicionalmente, se realizó la medición del nivel freático en 38 pozos por medio de un pozómetro marca geotech ETL. La cota hidráulica (C.H), se calculó en función de la resta entre el valor de la cota topográfica y el nivel estático de cada pozo.

Los análisis se realizan en el laboratorio del Centro de Excelencia en Geotermia de los Andes (CEGA) bajo las siguientes técnicas analíticas:

- Cromatografía Iónica (Thermo Scientific Dionex ICS-2100) para análisis de aniones.
- Espectrofotometría de absorción atómica (Perkin Elmer PinAAcle 900F, con nebulizador estándar) para análisis de cationes.
- Espectrometría de masa (Thermo Scientific ICP-MS Q iCAP Q) para el análisis de trazas.

Posteriormente, los resultados fueron tratados mediante diagramas de clasificación de Piper y Stiff para visualizar la evolución química de las muestras y detectar posibles procesos hidrogeoquímicos en el área de estudio. En orden de identificar los procesos hidrogeoquímicos presentes, se realiza el diagrama de Gibbs y diversos gráficos binarios, junto a técnicas estadísticas y geoestadísticas (GIS). Finalmente para evaluar la calidad del agua, se comparan las muestras respecto a las Normas Chilenas de Agua Potable (NCh 409. Of. 2005) y Riego (NCh N°1333. Of. 1978), junto a los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), en orden de evaluar la calidad del agua.

## 2 Antecedentes del área de estudio

### 2.1 Ubicación zona de estudio

La zona de estudio corresponde al área de concesión del SMAPA, ubicada en la parte surponiente de la ciudad de Santiago, Región Metropolitana, Chile. Está delimitada entre los 33°27' y 33°34' latitud sur y los 70°41' y 70°48' longitud oeste. Abarca completamente las comunas de Maipú y Cerrillos y la parte sur de Estación Central, cubriendo una superficie de aproximadamente 76 Km<sup>2</sup>.

Se puede acceder por distintas rutas, principalmente carreteras asfaltadas y en buenas condiciones. Desde el norte y sur por la carretera Panamericana (ruta 5). Desde la costa se conecta por la ruta 68 (Santiago-Valparaíso), y la ruta 78 (Santiago – San Antonio).

Figura 1, muestra la ubicación del área de estudio (polígono rojo) a escala regional y en la ciudad de Santiago. En orden de apreciar de mejor manera el trabajo realizado en este estudio, las siguientes figuras estarán en su gran mayoría centradas en el área de estudio.

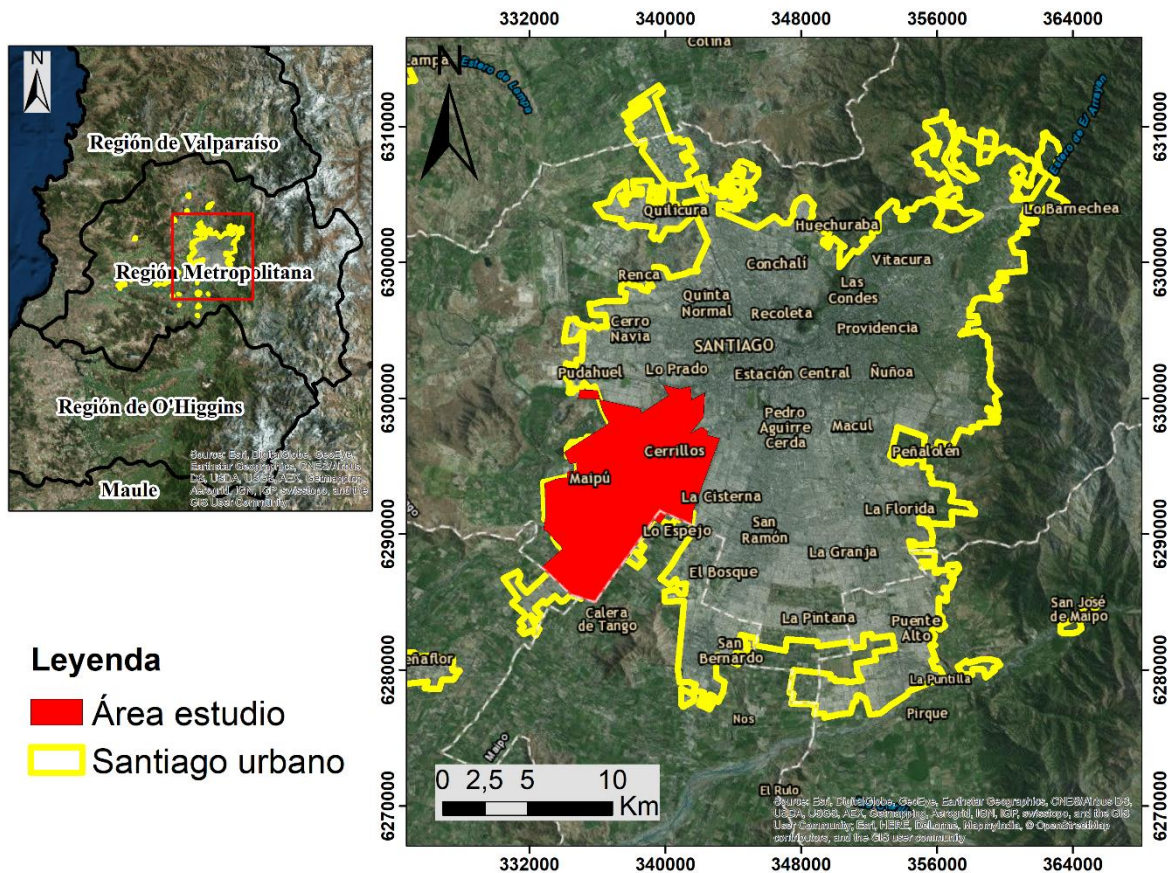


Figura 1: Ubicación área de estudio. UTM (WGS 84, 19S).

## 2.2 Situación Geográfica y Geológica

La región Metropolitana, perteneciente al marco geotectónico de Chile Central (32°-35°S), se subdivide geográficamente en tres grandes unidades morfoestructurales principales, dispuestas en franjas orientadas norte-sur. De oeste a este son: Cordillera de la Costa, Depresión Central y la Cordillera Principal (Fock, 2005).

**La Cordillera de la Costa** es un cordón rocoso más bajo que el andino, compuesto por cerros que rara vez sobrepasan los 2000 m.s.n.m. Está formada por granitoides del paleozoico superior en su flanco occidental, y por secuencias Volcánicas y sedimentarias mesozoicas en la parte más oriental, según indica la cartografía geológica disponible (Thomas, 1958; Wall et al., 1999; Sellés y Gana, 2001).

**La Cordillera Principal** limita hacia el oeste con la Depresión Intermedia por la zona de Fallas Pucuro. Hacia el este limita con la frontera con Argentina por la divisoria de aguas, y hacia el norte y sur limita con las cuencas de los ríos Aconcagua y Cachapoal respectivamente.

Corresponde a un cordón montañoso rocoso, con alturas sobre los 6.000 m.s.n.m. que aumentan de oeste a este. Sus aguas son drenadas por los ríos Maipo (5.138 km<sup>2</sup>), Mapocho (1.095 km<sup>2</sup>), Colina (370 km<sup>2</sup>) y esteros Clarillo. Se separa en la Cordillera principal Occidental, conformada por rocas cenozoicas de las Formaciones Abanico y Farellones, principalmente; y la Cordillera Principal Oriental, compuesta por rocas Mesozoicas fuertemente deformadas, que conforman las fajas plegadas y corridas de La Ramada, Aconcagua y Malargüe. De esta mega estructura proceden la mayor parte de los sedimentos que rellenan la depresión central.

**La Depresión Intermedia** corresponde a una cuenca rellena por depósitos aluviales, fluviales, coluviales y lacustres Pleistocenos a Holocenos principalmente. También se distinguen depósitos piroclásticos pertenecientes a la Ignimbrita Pudahuel (Ver Figura 2). Adicionalmente sobresalen sobre ella, los llamados “cerros isla”, con alturas entre 650 y 480 m.s.n.m. decrecientes de este a oeste.

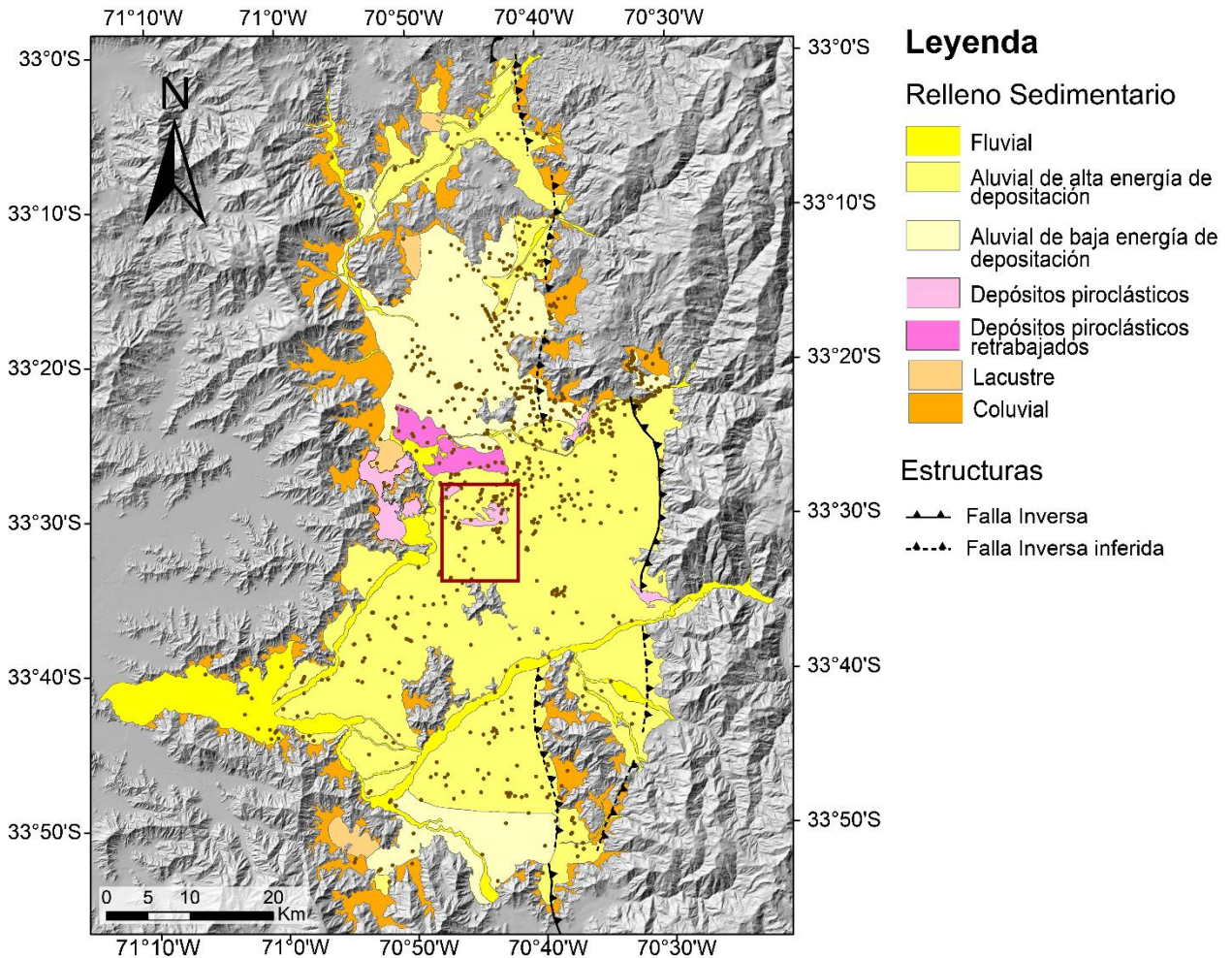
El área de estudio se encuentra dentro de la Depresión intermedia y tal como se muestra en la Figura 2 (rectángulo rojo), a nivel general se encuentra rellena por unidades geológicas no consolidadas, principalmente depósitos aluviales de alta energía de deposición provenientes del Río Maipo y Mapocho, y localmente por depósitos piroclásticos correspondientes a la Ignimbrita Pudahuel.

A continuación, se describen las unidades que se encuentran distribuidas en el área de estudio.

### **Depósitos Fluviales (Holoceno)**

Sedimentos no consolidados, genéticamente relacionados con cursos fluviales activos (ríos Mapocho y Maipo). Se componen principalmente por gravas y gravas arenosas clastosoportadas, compuestas por fragmentos volcánicos e intrusivos, redondeados, de baja esfericidad y matriz (Sellés y Gana, 2001). Incluyen, lentes arenosos con

estratificación plana horizontal y cruzada, junto a escasos niveles de limos finamente laminados, correspondientes a depósitos de planicie de inundación (Wall et al., 1999).



**Figura 2: Unidades relleno sedimentario de la Depresión Intermedia. Tomado de Muñoz et al., (2015). En rojo se destaca el área de estudio. UTM (WGS 84, 19S).**

### **Ignimbrita Pudahuel (Plioceno Superior?-Pleistoceno Medio?)**

Depósito de Flujo piroclástico de ceniza y lapilli pomáceo, macizo, no soldado, con espesores de hasta 120-150 m, conformando en Maipú, Cerrillos y Pudahuel una típica morfología de cerrillos o lomajes, los cuales sobresalen en el relieve. Los depósitos son de colores blanco amarillentos a pardo claro y rosado, medianamente a bien consolidados. En los sectores distales de abanicos aluviales y niveles aterrizados, se presenta retrabajada y sus componentes incorporados en niveles de gravas y mezclados con arenas, gravas y limos que constituyen los depósitos aluviales de los ríos Mapocho. Representa a las facies distales de los productos generados en la erupción explosiva de la Caldera Diamante (Wall et al., 1996)

## **Depósitos Aluviales ríos Maipo y Mapocho (Plioceno-Pleistoceno Superior)**

Sedimentos estratificados, moderadamente consolidados, que constituyen abanicos aluviales 2 a 10 km de radio, que rellenan la mayor parte de la Depresión Intermedia, y cuyas hoyas hidrográficas se encuentra en la cordillera de los Andes. En la zona de estudio, se componen principalmente por ripios o bolones, gravas arenosas y arenas con escaso contenido de arcillas, que se intercalan con depósitos de la Ignimbrita Pudahuel, los cuales sobresalen de la llanura como pequeños lomajes o se encuentran retrabajados e incorporados a los depósitos aluviales (Sellés y Gana, 2001).

**Qamp:** Depósitos aluviales del río Maipo. Constituyen los depósitos más extensos de la zona de estudio y también de la cuenca de Santiago, cubiertos parcialmente por el desarrollo urbano de la ciudad de Santiago del Pleistoceno Superior.

**Qamo:** Depósitos aluviales del río Mapocho, de menor tamaño de grano que los del río Maipo y de reducida exposición en la parte norte de área de estudio, que engranan hacia el sur con los depósitos aluviales del río Maipo.

En la Figura 3, se puede observar la distribución espacial de las unidades geológicas descritas en la zona de estudio.

## **2.1 Climatología**

El clima regional presenta características climáticas del tipo mediterráneas, con una T° media anual de 14,9°C, siendo el mes más cálido marzo y el más frío julio. Una de las características de este tipo climático son las lluvias, las que varían latitudinalmente, registrando una disminución desde la costa hacia el interior y aumentando hacia la cordillera de los Andes. Según la clasificación de Koppen, el área de estudio presenta un clima templado cálido con lluvias invernales.

El territorio regional presenta una estación seca prolongada, con máximas superiores a los 30° C durante la tarde; y un invierno bien definido, el cual registra temperaturas extremas que llegan hasta los 0°C, siendo frecuentes los contrastes térmicos.

Las precipitaciones se registran durante las temporadas invernales, especialmente durante los meses de junio, julio y agosto, con un promedio de caída anual de 300 mm. Dentro de la cuenca de Santiago existen diferencias climáticas locales producidas por el efecto del relieve. Al pie oriental de la cordillera de la costa y, debido al rol de barrera climática de esta, se presentan áreas de mayor sequedad, incluso con características de semiaridez (Dirección Meteorológica de Chile, 2001).

En las Figura 4 y Figura 5, se ilustran las mediciones de T° y precipitaciones en la estación meteorológica de San Pablo, ubicada en la comuna de Pudahuel, la más cercana al área de estudio.



En síntesis, el área de estudio pertenece a una zona climática con marcadas características de clima mediterráneo, con valores máximos de T° en verano, y una alta concentración de precipitaciones en los meses de invierno.

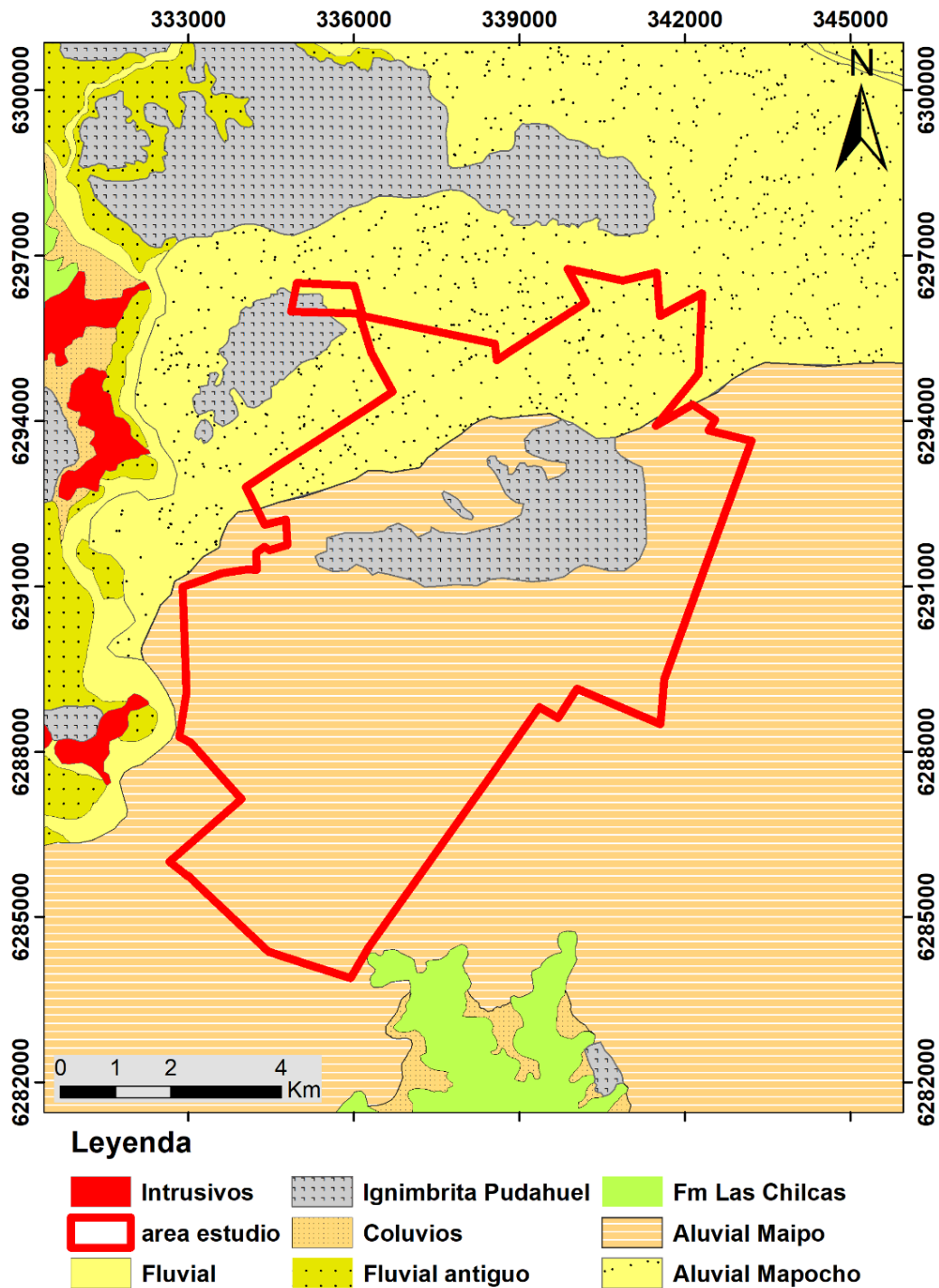


Figura 3: Mapa geológico simplificado de la zona de estudio. Modificado de Sellés y Gana (2001). UTM (WGS 84, 19S).

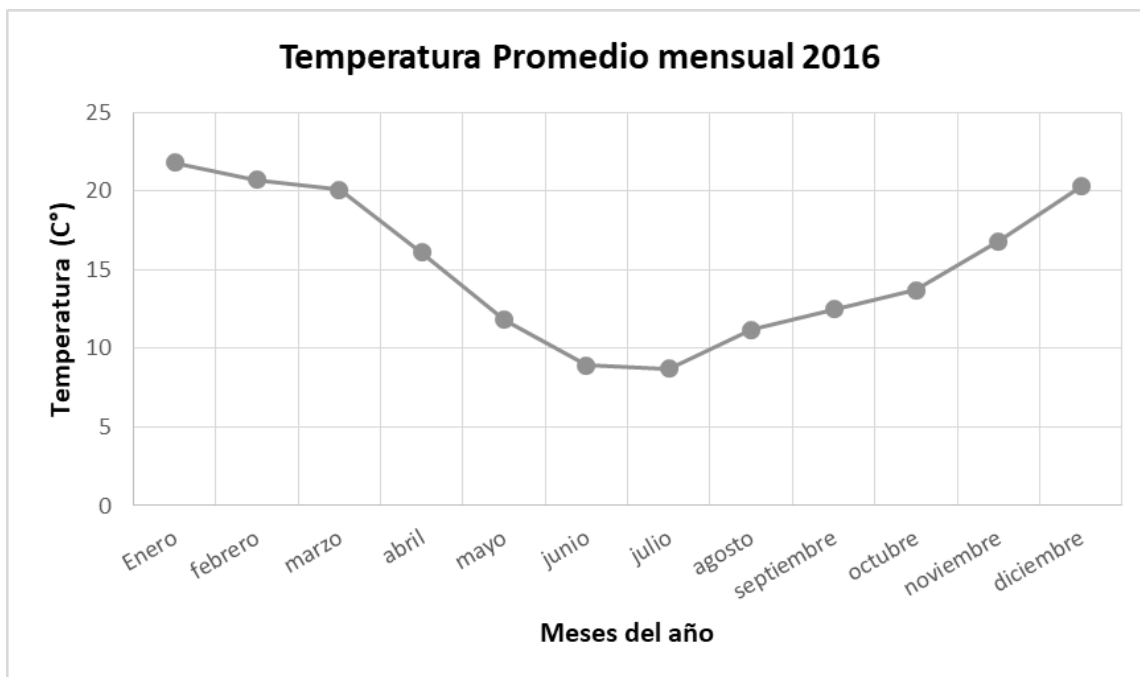


Figura 4: T° promedio mensual 2016, estación San Pablo. Dirección Meteorológica de Chile.

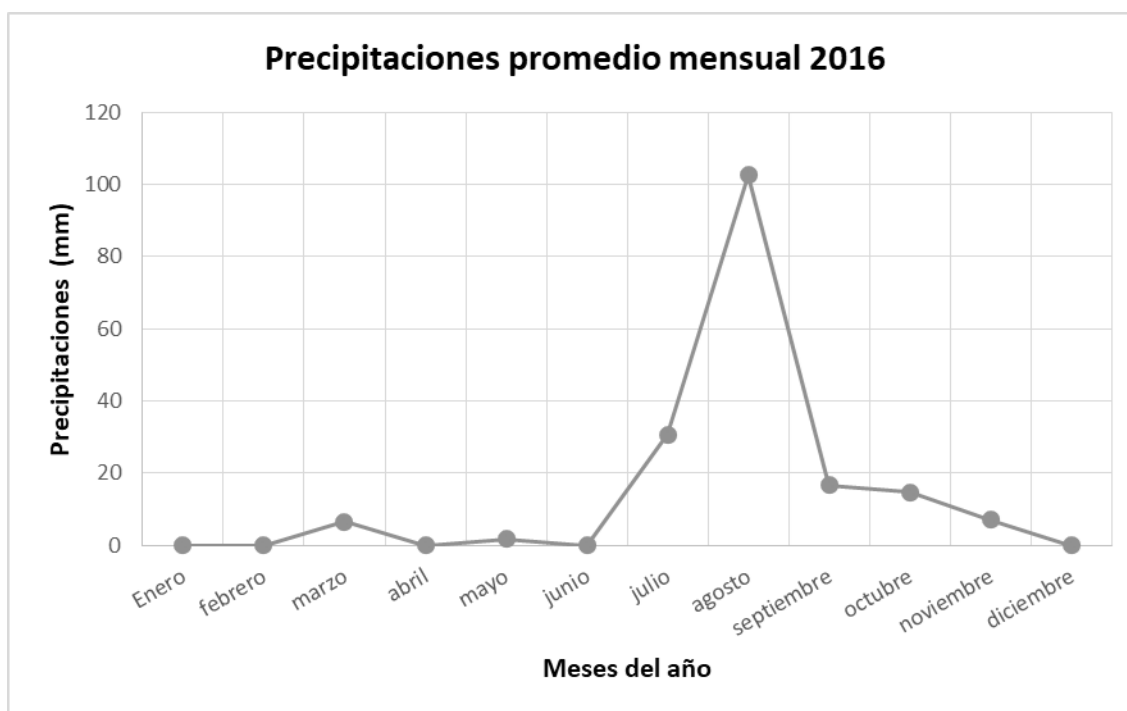
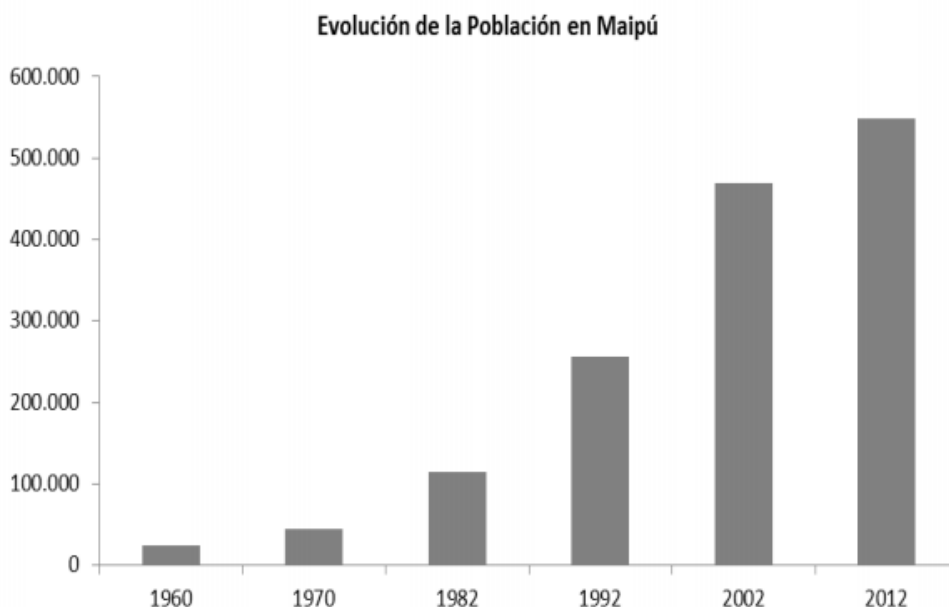


Figura 5: Precipitaciones promedio mensual 2016, estación San Pablo. Dirección Meteorológica de Chile.

## 2.2 Situación Socioeconómica y Usos de Suelo

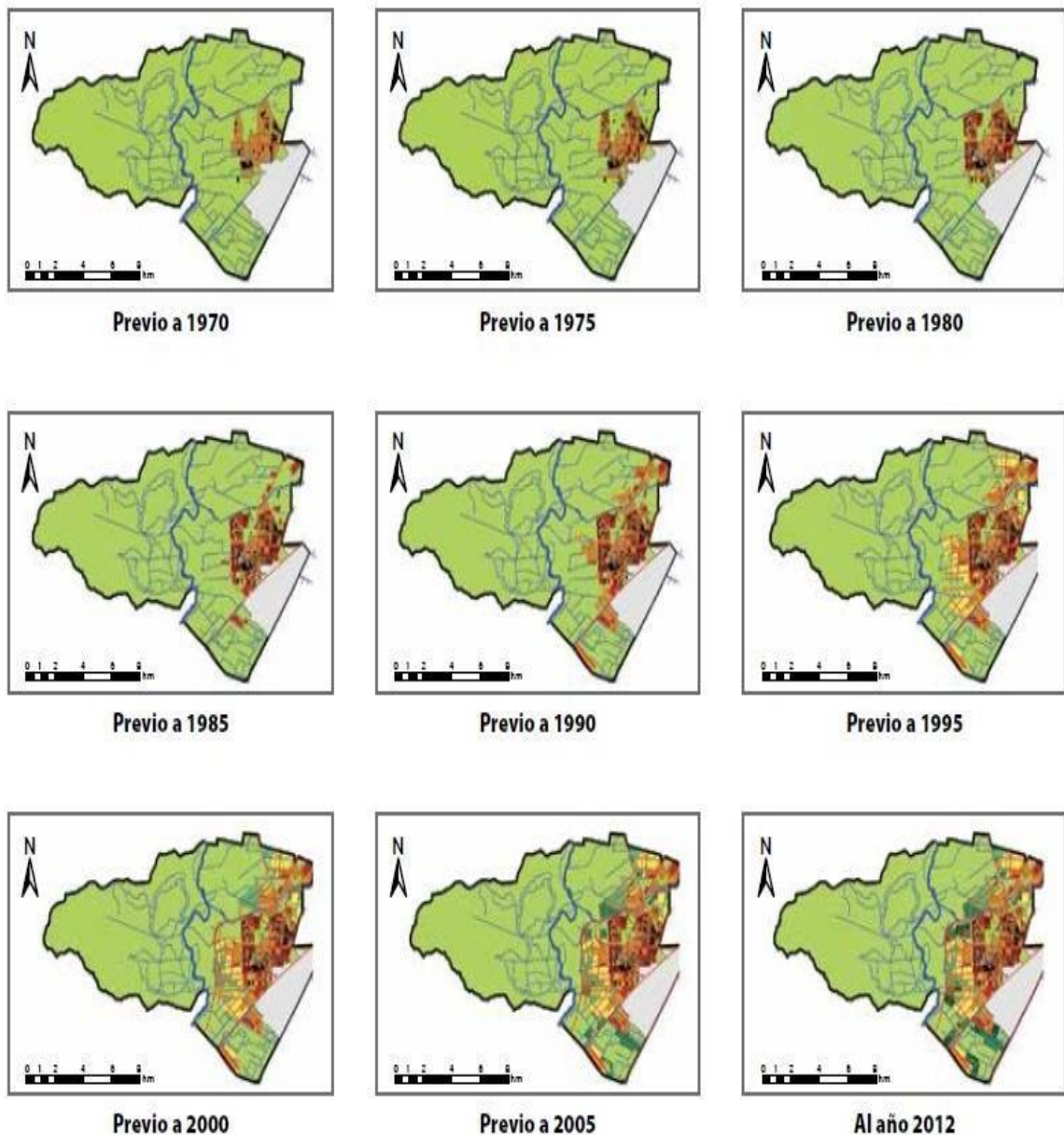
Desde la década de los '40, el área de estudio ha experimentado un proceso de cambio urbano importante, pues comenzó a intercambiarse las actividades agropecuarias, por una incipiente labor industrial y una acelerada migración de población desde el centro y fuera de Santiago hacia la comuna. Esto, trajo como consecuencia un exponencial

crecimiento demográfico a partir de la década de '70, con un aumento de 50,000 habitantes, hasta las 600,000 personas actuales (Hernández, 2016). Esta evolución poblacional se ilustra en la Figura 6.



**Figura 6: Gráfico de la evolución de población en la comuna de Maipú desde el año 1960 hasta el 2012. Extraído de Hernández (2016).**

La situación urbana de la comuna de Maipú, se conforma en una primera etapa de asentamiento de las industrias y las villas para los trabajadores de esta, y una segunda etapa de oferta habitacional, acompañada del aumento poblacional, en la cual se opta por aumentar el número de viviendas, que rodean las primeras villas construidas. En esta segunda etapa (década de los '80) que se conoce como el crecimiento explosivo de la comuna, se prioriza la cantidad de viviendas por sobre la calidad de estas. (Hernández, 2016). En la Figura 7, se ilustra la evolución urbana de la comuna de Maipú entre los años previos a 1970 hasta el 2012, que muestra la temporalidad del crecimiento y de la antigüedad de los distintos sectores así como de las instalaciones sanitarias (agua potable y alcantarillado). En relación a lo anterior, se identifica que los sectores de la zona centro corresponden a aquellos con mayor antigüedad de sus instalaciones sanitarias, luego seguiría la zona poniente y norte de la comuna, y finalmente la zona sur, donde todavía se desarrolla actividad agrícola.



**Figura 7: Evolución urbana de Maipú entre 1970 y 2012. Cartografía realizada por la Municipalidad de Maipú (2015). UTM (WGS 84, 19S).**

En la actualidad, el área de estudio tiene como principal actividad económica el sector terciario, es decir, el comercio, servicios y administración, abarcando estas áreas el 85,9% de los empleos de la comuna (INE, CENSO 2002). El resto, se deriva en actividades industriales y en menor medida agrícolas.

La Figura 8, describe la distribución actual de los usos del suelo en el área de estudio, que corresponden principalmente a urbano o habitacional, y una localizada zona industrial en el sector oriente del área de estudio. La actividad agrícola que ha sobrevivido al fuerte cambio del uso de suelo de las últimas décadas, se desarrolla en las afueras del área de estudio, hacia el poniente y la zona sur.

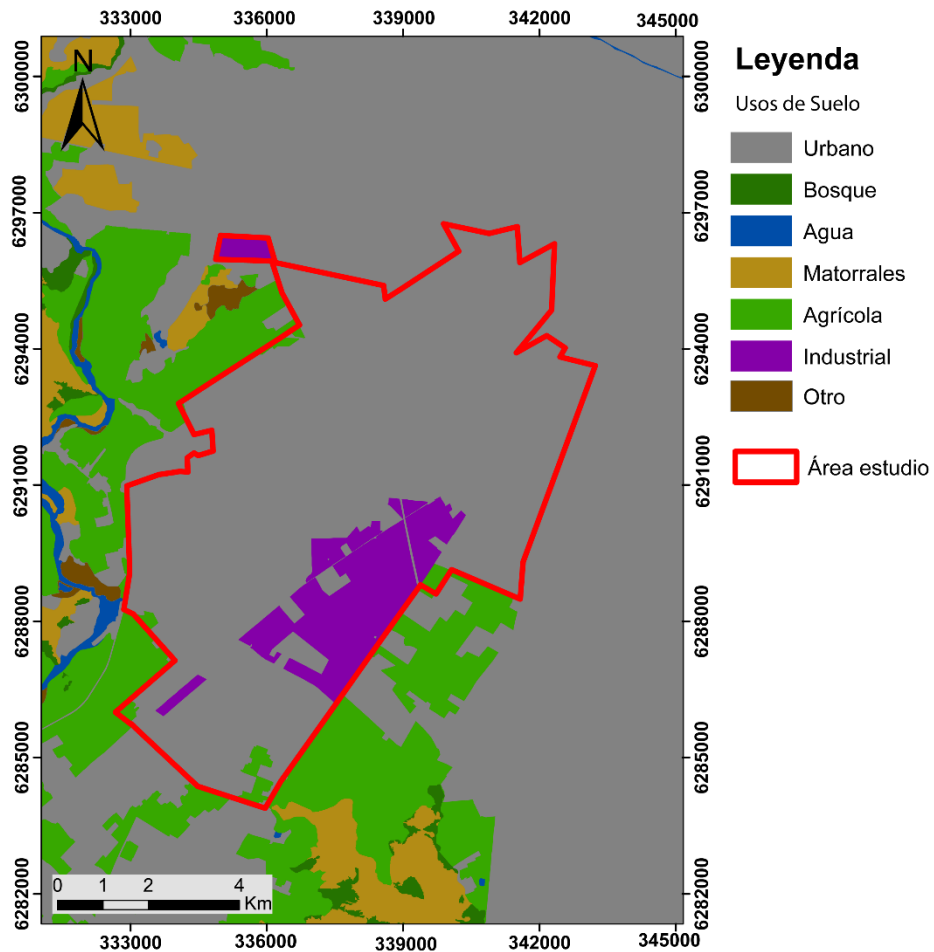


Figura 8: Mapa de los usos de suelo en el área de estudio. Desarrollado a partir del Catastro de Uso de Suelo desarrollado por CONAF (2013) y Plan Regulador Maipú (2016). UTM (WGS 84, 19S)

## 2.3 Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Maipú

El SMAPA Inició sus operaciones en el año 1950, y actualmente es el único operador sanitario del país perteneciente a una municipalidad, Abasteciendo a más de 197,000 clientes, que se traducen en casi un millón de habitantes de las comunas de Maipú, Cerrillos y la parte sur de Estación Central. Para ello, SMAPA produce más de 90 millones de m<sup>3</sup>/año (Mm<sup>3</sup>/año) de agua potable mediante la extracción de 82 pozos profundos (de un total existente de 143) con un caudal de producción promedio anual de 4.500 l/s. A la fecha, el territorio cuenta con una cobertura en agua potable del 100% y 99,8% en alcantarillado (SMAPA, *online* 2017).

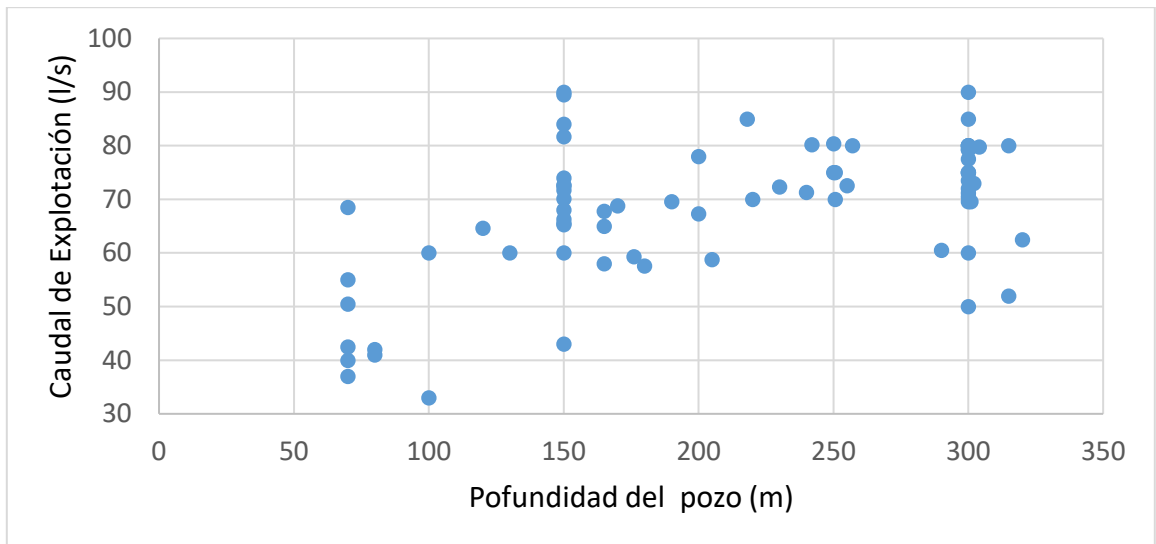
Este servicio sanitario, no sólo provee el servicio de agua potable y alcantarillado, sino que contribuye al desarrollo integral de los habitantes de la comuna, ya que los excedentes económicos son invertidos en beneficios sociales para los propios habitantes, particularmente en educación, mantenimiento de áreas verdes, y

construcción de plazas y parques. Además, el agua se utiliza también para el riego de todas las áreas verdes comunales.

SMAPA presenta una diferencia entre el volumen producido de agua y el volumen facturado del 39.5%, que se divide entre el agua destinada a riego de las áreas públicas y pérdidas. No es posible cuantificar el agua de riego, debido a la ausencia de medidores de caudal en llaves de agua que abastecen las áreas verdes municipales. La Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) considera el 15% una pérdida de agua eficiente para una empresa sanitaria y, por lo general, estas empresas mantienen un nivel de pérdida superior al 20% del total de agua producida (Wakida y Lerner, 2005; SISS, *online* 2016). Si se considera un 20% de pérdida de agua potable por filtraciones en la red de distribución, entonces el volumen de agua perdido sería de 18 Mm<sup>3</sup>/año, que en el área de distribución de SMAPA (76 km<sup>2</sup>), constituiría una recarga anual de 236,8 mm si toda el agua alcanza la zona saturada.

La profundidad de perforación de los sondajes SMAPA es variable, y ha ido aumentando con el tiempo. Los primeros pozos eran de 50 m de profundidad, pero debido al descenso gradual del nivel freático, esos pozos disminuyeron paulatinamente su caudal haciendo así necesaria la perforación de sondajes más profundos (100 a 150 m). Actualmente, la mayoría de los pozos menores a 100 m se encuentra fuera de uso o abandonado. Posteriormente, debido al aumento en las concentraciones de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SMAPA tuvo nuevamente la necesidad de profundizar sus pozos, llegando a los 300 m y obteniendo una mejora sustancial en la concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

En la Figura 9, se muestra el caudal promedio anual de cada punto de captación actualmente en uso, y la relación con su profundidad. Los datos de producción varían entre 30 y 90 l/s, y dependen en gran medida de la profundidad. De hecho, se observa que a mayor profundidad del sondaje, se registra un mayor caudal de explotación. Lo anterior puede deberse a que los pozos más profundos tienen un mayor tramo de superficie de ingreso del agua al pozo (superficie captante o de tubería ranurada), y a que el nivel freático se encuentra ampliamente sobre este nivel. En cambio, en los pozos de menor profundidad, el descenso sostenido del nivel freático ha provocado que la tubería ranurada se encuentre parcial o totalmente en la zona de aireación, disminuyendo el tramo de ingreso de agua al pozo y, de esta manera, la eficiencia y caudal de producción del pozo.



**Figura 9: Relación entre la profundidad de los sondajes y su caudal de explotación.**

El territorio de concesión está dividido en 20 sectores, en los que se ha desarrollado una extensa red de distribución. El trabajo realizado por SMAPA se separa en cuatro etapas:

- Captación: se extrae agua cruda mediante sondajes desde el acuífero.
- Desinfección: el agua captada, se potabiliza mediante la desinfección con gas cloro, según lo especificado por la Normativa Chilena.
- Regulación/acumulación: una serie de estanques almacenan el agua, permitiendo controlar el flujo y la presión, y así poder satisfacer la demanda.
- Distribución: red de 3.500 km de extensión, tuberías y matrices desde las plantas de producción hasta los arranques domiciliarios.
- Recolección: una red similar a la de distribución permite la evacuación inocua de las aguas servidas, para ser llevadas a plantas de tratamiento que las procesan y devuelven en condiciones adecuadas a la naturaleza.

En la Figura 10, se muestra la ubicación y nombre de los 20 sectores de producción del Servicio, los tipos de estanques que están actualmente en funcionamiento y los pozos, distinguiendo si se encuentran actualmente en uso, reserva, o son de uso futuro.

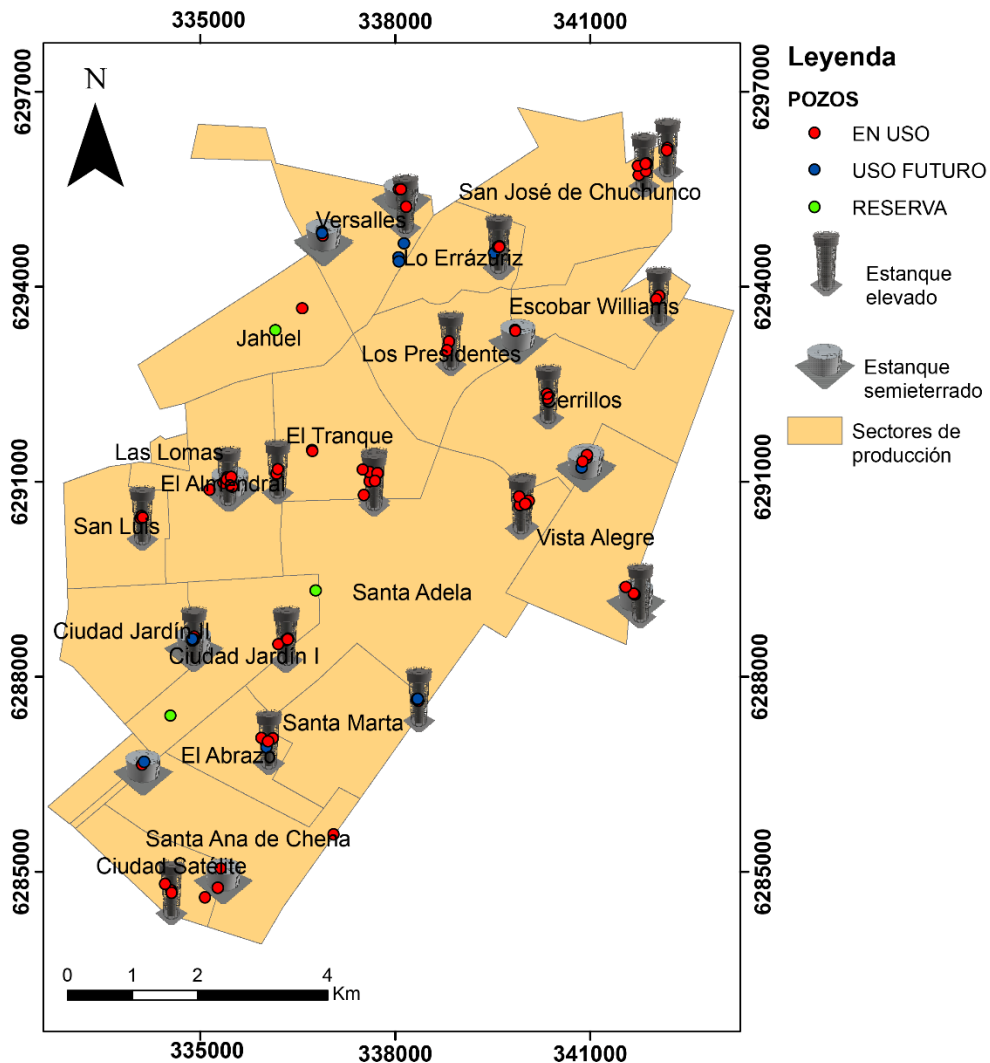


Figura 10: Área de Producción del SMAPA, y sus 20 sectores de distribución. UTM (WGS 84, 19S).

## 2.4 Estudios previos

**Falcón et al. (1970).** Constituye el primer estudio hidrogeológico integral de la cuenca de Santiago, el que integra la información recopilada por estudios anteriores que financiaron el Instituto de Investigaciones Geológicas (IIG) y la DRH-CORFO, junto con estudios geofísicos, para describir el régimen hidrogeológico de la cuenca de Santiago, estudiar las recargas y descargas del acuífero, junto con una descripción detallada del alcance de las aguas superficiales y subterráneas. Por otro lado, se realizó una evaluación de calidad de agua, a través del muestreo de pozos de producción pertenecientes a la CORFO y otros privados. Con la información entregada por perforaciones y estudios geofísicos, se confecciona un mapa de espesor del relleno y varios perfiles esquemáticos que ilustran su configuración, y se describe el relleno de la cuenca separándolo en dos grandes unidades. Unidad A, correspondiente a depósitos sedimentarios basales, en que predominan materiales clásticos de tamaño limo- arcilla, pero que además contienen clastos gruesos; y Unidad B) de depósitos fluvio-glaciares y fluviales que sobreyacen los anteriores y que están constituidos por ripio, arena y poco



material fino. Localmente, describe otros depósitos como corrientes de barro, cenizas volcánicas, depósitos lagunares y cono de deyección. A partir de la misma información, se realiza un mapa de espesor del relleno de la cuenca.

**González (1991)** determinó los contenidos de sales y sus variaciones longitudinales en los principales ríos de los sistemas hídricos Maipo y Mapocho, así también los contenidos de elementos trazas. Para ello, recolectó muestras desde distintos puntos de ríos y esteros entre el año 1986 y 1987. El análisis de la información obtenida, le permitió concluir que estos sistemas presentan diferencias significativas en su carga salina y metálica. El río Maipo y sus alimentadores, presentan una alta C.E., asociada a una alta carga salina natural, especialmente de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , y escasos elementos trazas. Por otro lado, el río Mapocho tiene una baja carga salina natural, la que va incrementando en su trayecto por el valle, debido al aporte de aguas servidas no tratadas.

**Falcón y Matutano (2000)** realizaron un estudio estratigráfico y de calidad de agua de pozos de SMAPA durante los años 1995 y 1997. Este proyecto, contempló la construcción de cuatro pozos de investigación y producción, con el objetivo de normar las futuras obras, para así garantizar una vida útil de al menos 30 años. El método de perforación fue la percusión, lo que permitió realizar una descripción estratigráfica precisa, análisis granulométricos en laboratorio y análisis de  $\text{NO}_3^-$ , para cada metro perforado.

En el estudio estratigráfico se reconocieron las siguientes unidades principales: depósitos de abanicos aluviales, depósitos de ceniza volcánica y, en menor medida, depósitos fluviales antiguos.

Respecto a la calidad del agua, las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  detectadas en las muestras de aguas de los pozos, permite concluir que existe contaminación a profundidades inferiores a 100 m.

**Morales (2002)** elaboró un estudio que formó parte del proyecto: Modelo de simulación hidrológico Operaciones-Cuencas Río Maipo-Mapocho para la DGA. Se estimó la geometría y las características hidráulicas de los principales acuíferos presentes en el relleno sedimentario de la cuenca del río Maipo, llegando a definir 3 unidades hidrogeológicas caracterizadas por diferentes potencias y permeabilidades. Además, realizó un análisis en las unidades geomorfológicas de la superficie, con el objetivo de identificar cuál de ellas presentaba un buen potencial para construir acuíferos, concluyendo que la segunda unidad (desde la superficie hacia abajo) es la que presenta las características hidráulicas apropiadas.

**Iriarte (2003)** desarrolló un estudio en el sector norte de la ciudad de Santiago, con el objetivo de determinar el impacto de la recarga urbana, producto de aguas derivadas de infraestructura civil y actividad humana a las aguas subterráneas. Se concluye, que la recarga urbana influye en el nivel de aguas, en la dirección de flujo y en la calidad de las aguas subterráneas de la zona de estudio. También, elabora un mapa de vulnerabilidad del acuífero según el método GOD de la cuenca de Santiago.

**Araneda et al. (2010)** confecciona un modelo estructural de la cuenca de Santiago a partir de 2100 estaciones gravimétricas medidas entre 1974 y 1990, indicando una morfología de basamento irregular, compuesta por depresiones (algunas de más 500m) y altos topográficos. Por otro lado, mediante geofísica se obtiene que el espesor estimado del relleno sedimentario de la cuenca llega hasta los 200 m. En relación con la hidrología, se procesó la información de 1915 pozos de exploración y producción de aguas subterráneas, junto con análisis de la morfología de basamento, pudiendo determinar un volumen confinado de agua de 31000 millones de m<sup>3</sup>, considerando un coeficiente de almacenamiento del 10%.

**San Juan (2015)**, presenta en su memoria los resultados hidrogeoquímicos para la cuenca de Santiago, utilizando la base de datos disponible en línea de la DGA. Para ello, utiliza datos de los años 2001, 2006 y 2010 de estaciones de agua subterránea con mediciones de parámetros fisicoquímicos, elementos mayores y algunos trazas (As, Al, Fe, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> y Mn). Se distinguen dos grupos de agua: uno ubicado en el límite sur y oriente de la cuenca, y el segundo en la zona centro y poniente, identificando una estrecha relación entre el agua superficial y subterránea, además se reconoce un incremento en la concentración en el sentido del flujo de las aguas subterráneas, influenciado por interacción con el relleno sedimentario.

Por otro lado, evidencia que concentraciones de elementos en algunas estaciones ubicadas al surponiente de la cuenca de Santiago, están influenciadas por actividades antrópicas, identificando los posibles focos de contaminación (vertederos, cementerios, sectores agrícolas).

## **3 Marco Hidrológico**

### **3.1 Hidrología e Hidroquímica**

La zona de estudio se encuentra dentro de la Cuenca de Santiago, que cubre una superficie aproximada de 3.605 km<sup>2</sup>, siendo parte de la Hoya Hidrográfica del río Maipo, que se extiende desde el límite con la República Argentina por el oriente, hasta el Océano Pacífico por el occidente (Falcón y Matutano, 2000).

Los cursos de agua de los ríos Maipo y Mapocho transportan la mayoría de los sedimentos que rellenan el área de estudio y también de la depresión intermedia, siendo el más importante el río Maipo, al drenar desde la Cordillera de los Andes una superficie aproximadamente cinco veces mayor (Morales, 2002). De acuerdo a Iriarte (2003), el río Maipo posee un caudal anual superior a los 110 m<sup>3</sup>/s, con máximos en los meses de primavera, debido a los deshielos cordilleranos. En cambio, el río Mapocho tiene un caudal promedio anual de 6 m<sup>3</sup>/s, que a pesar de ser mucho menor, recibe la mayor parte de las aguas servidas no tratadas de Santiago por las áreas urbanas de la ciudad.

El río Maipo y sus principales alimentadores (ríos el Volcán y Yeso), en su transcurso por la cordillera principal, atraviesan formaciones sedimentarias en que destaca la presencia de yacimientos yesíferos. Como resultado de la disolución de estos

yacimientos (sales de azufre), estos ríos inician su recorrido con altos valores de C.E. y abundancia de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ . Por otro lado, el sistema Maipo presenta un marcado carácter oligometálico, debido a sus bajas concentraciones de elementos trazas (González, 1991).

Por su parte, el río Mapocho y sus alimentadores escurren en la cordillera Principal por rocas volcánicas pertenecientes a la Formación Abanico sin presencia de evaporitas (Morales 2002). A raíz de esto, presentan bajos contenidos de sales disueltas, con excepción del río San Francisco. En cuanto a su concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ , se estima que la abundancia del anión se debe principalmente a descargas desde un centro minero cuprífero aguas arriba, donde el ácido sulfúrico es empleado abundantemente. Esto se sustenta en el contenido de elementos trazas del río San Francisco, pues presenta mayor contenido de Zn, Mn y Pb que el resto de los ríos, y especialmente, altos valores disueltos de Cu (7,5 mg/l) en comparación con el río Molina (otro alimentador del río Mapocho), que presenta concentraciones de 0,03 mg/l de Cu disuelto (González, 1991).

En la Figura 11, se observan los principales cursos fluviales del área de estudio y los puntos de muestreo de agua realizados por González (1991) en los ríos Maipo, Mapocho, y sus principales alimentadores.

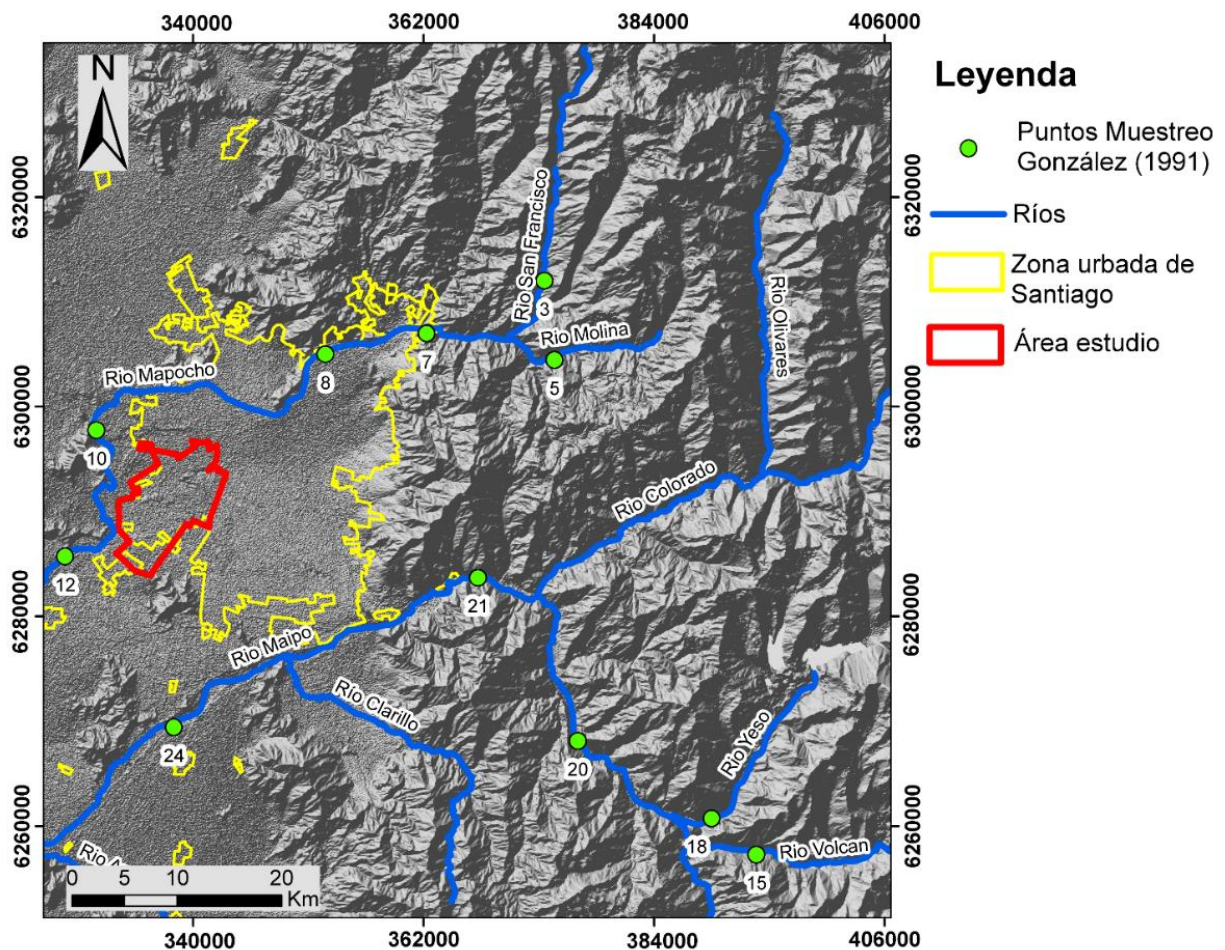


Figura 11: Ríos Maipo, Mapocho y principales alimentadores. Puntos de muestreo realizados por González (1991) en aguas superficiales. UTM (WGS 84, 19S).

## **3.2 Hidrogeología**

### **3.2.1 Unidades Acuíferas**

Morales (2002), mediante el estudio de los antecedentes de sondajes distribuidos en la cuenca de Santiago, identifica tres unidades hidrogeológicas, definidas en base de las características granulométricas de los rellenos. De base a techo: Unidad A, Unidad B y Unidad C.

#### **3.2.1.1 Unidad A**

Se ubica en la base de la secuencia sedimentaria y se caracteriza por presentar granulometría fina, exhibiendo proporciones altas de arcillas y limos. Su fracción clástica mayor suele estar conformada por arenas medias a finas, y la matriz por arcillas y limos. Se presentaría sobreyaciendo a la roca basal, e infrayace a los sedimentos que constituyen la Unidad B. No se reconoció la potencia real de esta Unidad en el área de estudio, debido a que en ese tiempo no se habían realizado pozos superiores a 200 m. No obstante, Morales (2002) estima un espesor mínimo mayor a 200 m para esta unidad. Este conjunto de sedimentos corresponden posiblemente a antiguos depósitos tipo corrientes de barro y aportes laterales provenientes de los altos topográficos. Dado su alto contenido de finos, se caracteriza por ser una unidad de carácter impermeable que no constituye medio para albergar acuíferos. Se estima una permeabilidad media variable entre  $10^{-5}$  y  $10^{-6}$  cm/s.

#### **3.2.1.2 Unidad B**

Sobreyace a la Unidad A y está constituida por sedimentos de granulometría gruesa y media, conformada por una fracción clástica mayor de bolones, gravas y arenas gruesas y matriz de arena media a fina con escasos finos. Se le puede clasificar como gravas arenosas y arenas gravosas, con bajo porcentaje de limos y arcillas. Morales (2002), reconoce una potencia de 100 a 130 m de esta unidad. Estos sedimentos presentan buena permeabilidad en toda la cuenca a pesar de tener variaciones de sus fracciones gruesas. Se estima una permeabilidad media variable entre  $10^{-2}$  y  $10^{-3}$  cm/s. Constituye el acuífero relevante en el área de estudio.

#### **3.2.1.3 Unidad C**

Sobreyace a la Unidad B, quedando en el tramo superior de la secuencia sedimentaria, aunque en algunas zonas existe interdigitación entre ambas unidades. En el área de estudio, corresponde a los depósitos de ceniza de la Ignimbrita Pudahuel, que se presenta exclusivamente en la parte central del área de estudio con una potencia de 20 a 40 m de espesor. Debido a su alto contenido de finos, se considera una unidad impermeable que confina a la unidad B (Morales, 2002).

### 3.2.2 Geometría del Acuífero en el área de estudio

En esta sección y en la siguiente, se mostrará el perfil estratigráfico de Morales (2002), que cruza el área de estudio y, 3 columnas estratigráficas y 3 perfiles verticales de C.E. y T°, que fueron realizados a partir de la información de construcción de sondajes del SMAPA (Figura 12).

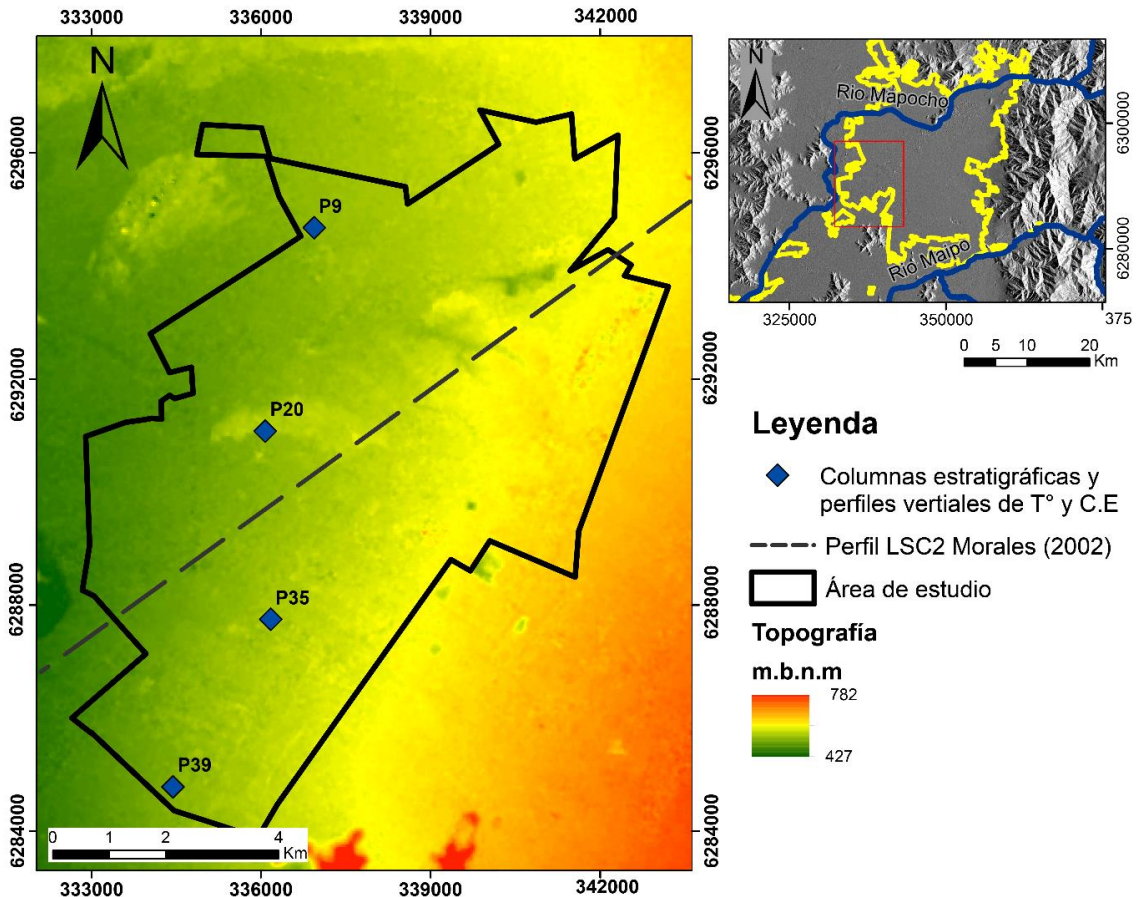
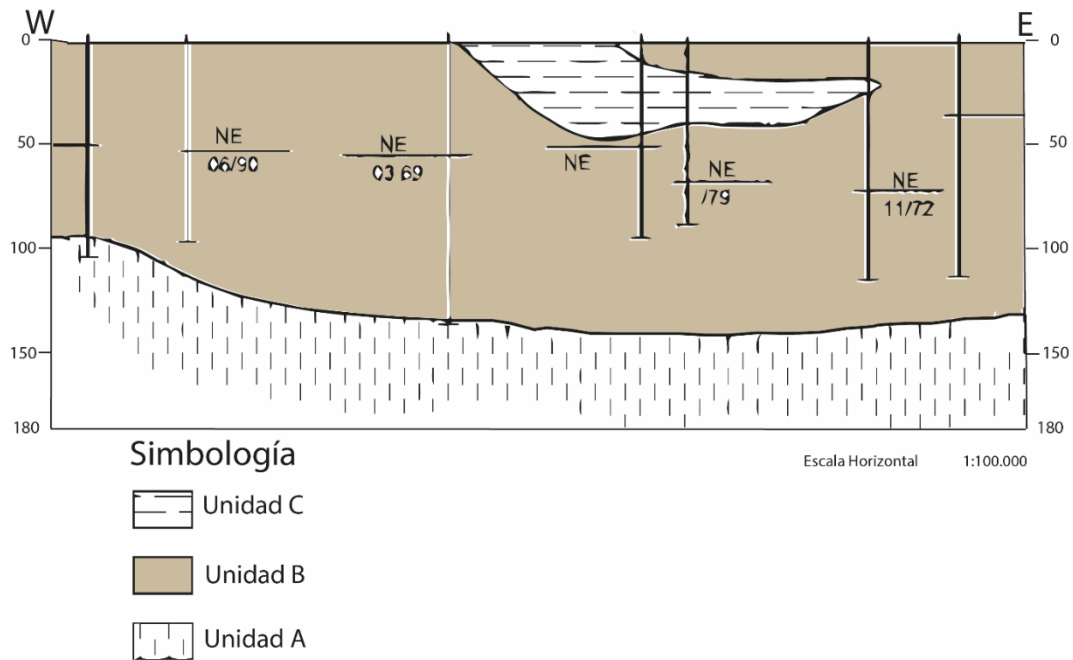


Figura 12: Modelo digital de elevación, ubicación del perfil LSC2 de Morales (2002) y las columnas estratigráficas desarrolladas. UTM (WGS 84, 19S).

En la Figura 13, se ilustra parte del perfil estratigráfico LSC2 desarrollado por Morales (2002), que cruza E-W el área de estudio y muestra la disposición en profundidad de las 3 unidades hidrogeológicas. En esta figura, se observa que la Unidad A presenta una gran continuidad a lo largo de toda el área de estudio, pero no se logra conocer su espesor, debido a que no existe un sondaje que logre atravesarla. Sin embargo, en vista que el relleno sedimentario alcanzar sus máximos espesores en esta subcuenca (400-480 m), se estima un espesor mínimo para la Unidad A de 200 m. La Unidad B, también muestra gran continuidad a lo largo del perfil, que disminuye su potencia hacia el poniente. A diferencia de las Unidades A y B, la Unidad C presenta una alta discontinuidad en esta zona (Morales (2002)).



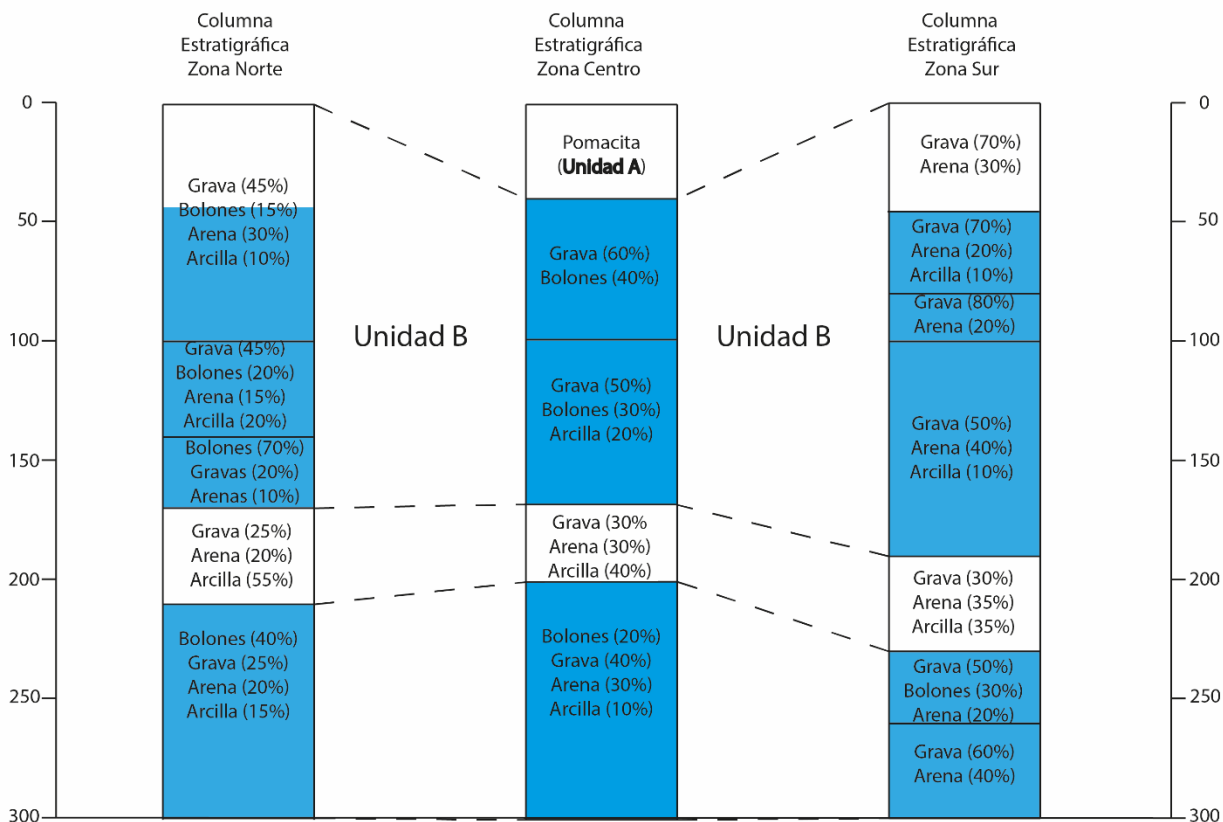
**Figura 13: Perfil hidrológico LSC2 que cruza E-W el área de estudio. Modificado de Morales (2002).**

Posterior al estudio de Morales (2002), en SMAPA se comenzaron a perforar los primeros pozos de 300 m, permitiendo obtener información adicional que ha permitido mejorar el conocimiento de la geometría del acuífero revisando así las unidades hidrogeológicas propuestas. Especialmente la unidad A, pues contaba con pocos m de información y se le atribuía una potencia mínima de 200 m en el área de estudio.

A partir de la información estratigráfica de 14 pozos de SMAPA, se realizan 3 columnas estratigráficas tipo que son representativas de la zona norte, centro y sur del área de estudio, las cuáles se ilustran en la Figura 14. En estas, se observa de color azul el acuífero explotable que posee una potencia conocida de al menos 300 m, y que según la información obtenida a partir de las pruebas de bombeo realizadas en cada pozo, cuenta con una muy alta transmisividad ( $>1000 \text{ m}^2/\text{día}$ ). Además, se calcula un caudal recomendable de explotación de hasta 150 l/s.

Solamente en la parte central del área de estudio, se reconoce la Unidad C descrita por Morales (2002), que corresponde a depósitos de Pomacita de la Ignimbrita Pudahuel, con una potencia observada de 40 m. Bajo esta, se desarrollan depósitos de fracción clástica mayor de bolones y gravas en matriz de arena, con bajo contenido de arcillas hasta los 200 m de profundidad, que podría correlacionarse con la Unidad B descrita por Morales (2002) por su similitud granulométrica.

Por otro lado, en las tres columnas estratigráficas se puede identificar un tramo con alto porcentaje de finos (hasta el 60% de arcillas), a los 180 – 200 m de profundidad dependiendo de la ubicación geográfica del pozo y de 20 a 40 m espesor. Bajo esta sección con alto contenido de finos, se encuentra un segundo nivel de granulometría gruesa (gravas arenosas a arenas gravosas y contenido de arcillas menor al 20%, hasta los 300 m).



**Figura 14: Columnas estratigráficas de la zona norte, centro y sur del área de estudio y su correlación espacial.**

En vista de los antecedentes expuestos, se observa que en el área de estudio pueden reconocerse las unidades hidrogeológicas A y B desarrolladas por Morales (2002), aunque con diferencias en la potencia de sus secciones. En el área de estudio, se reconoce un acuífero (en explotación) que llega al menos a 300 m de profundidad, a diferencia de lo expuesto por Morales (2002) que establece un acuífero de máximo 100 a 130 m de profundidad (unidad B). Por otra parte, la unidad C (que subyacería a la unidad B), caracterizada como impermeable y potencia estimada de al menos 200 m, no tiene relación con los antecedentes existentes, por lo que no se reconoce en el área de estudio.

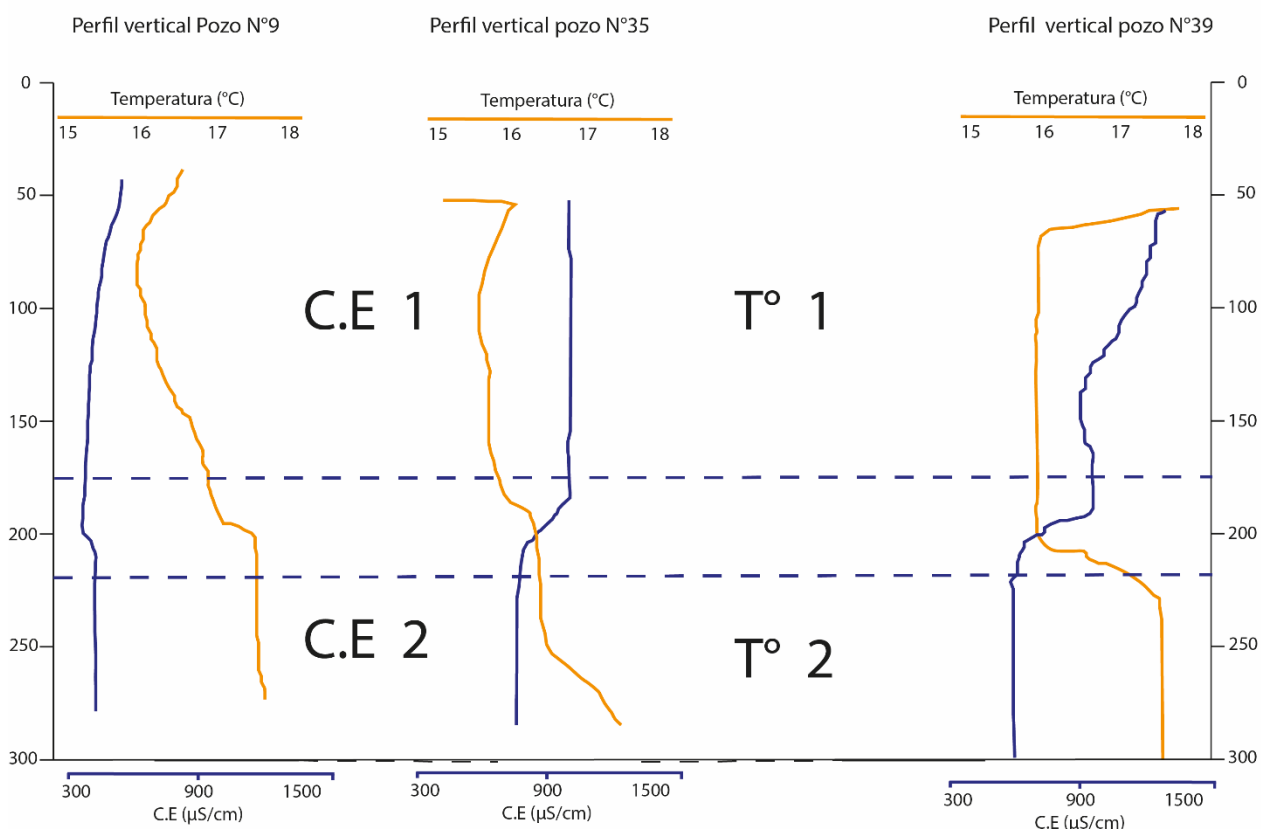
### 3.2.3 Perfil vertical de C.E. y T°

El perfil vertical fisicoquímico en un pozo, se refiere a la medición en la vertical de los parámetros físico-químicos generales, es decir, T°, pH y C.E. en el agua. Se realiza una vez finalizada la etapa de habilitación y desarrollo de un sondaje, antes de realizar la prueba de bombeo.

En la Figura 15, se observan los resultados de la variación en profundidad de T° y C.E. en pozos ubicados al norte, centro y sur del área de estudio. En ellos, puede verse de manera clara que ambos parámetros registran un quiebre en sus valores entre los 180 y

220 m. En el caso de la  $T^\circ$ , esta aumenta después del quiebre, pasando en general de  $16^\circ\text{C}$  a los casi  $18^\circ\text{C}$ . La C.E. disminuye sus valores en la zona centro, y especialmente, en la zona sur en que pasa de  $1000\ \mu\text{S}/\text{cm}$  a  $500\ \mu\text{S}/\text{cm}$ . Mientras que en la zona norte no se aprecia un cambio de valores significativo.

Este quiebre en los valores de  $T^\circ$  y C.E. se observa en 8 de los 12 pozos superiores a 200 m, que cuentan con este tipo de información, por tanto, se considera que es una característica del acuífero en la zona de estudio. Además, este quiebre en los valores de  $T^\circ$  y C.E. ocurre a la misma profundidad, y coincide con aquellas secciones con mayor contenido de arcillas, presentadas en las columnas estratigráficas. En virtud de lo anterior, se interpreta que en el área de estudio se desarrollan dos niveles acuíferos distintos, donde el segundo nivel comenzaría entre los 200 y 220 m, y por el momento, se le asociaría una continuidad hasta los 300 m de profundidad, que es el límite dictado por la información disponible. Químicamente, este segundo nivel presentaría un menor valor de salinidad y una mayor  $T^\circ$  del agua.



**Figura 15: Perfiles verticales de  $T^\circ$  y C.E. en 3 pozos profundos representativos de la zona norte, centro y sur del área de estudio.**

### 3.2.4 Recarga del acuífero y relación con aguas superficiales

De acuerdo a Iriarte (2003) y Araneda et al. (2010) la recarga natural del acuífero no se genera en las zonas urbanas de la Ciudad de Santiago, puesto que las áreas urbanizadas se encuentran cubiertas principalmente por hormigón y asfalto (Calles y



edificaciones), que actúan como capa impermeable que no permite la percolación de aguas lluvias o de escorrentía.

Ellos afirman que la recarga natural del acuífero ocurre principalmente por la infiltración de los cauces superficiales (ríos Maipo y Mapocho) en la cordillera principal, y por las zonas de depósitos coluviales en los márgenes oriente y poniente de la Cuenca de Santiago, que permiten la percolación de las aguas lluvias. Lo anterior, provocaría una estrecha relación entre la química del agua superficial y la subterránea. En esta línea, Iriarte (2003) y San Juan (2015), reconocen que el agua subterránea en la parte norte de la cuenca de Santiago presenta baja C.E. y proporciones similares de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , que se relaciona con la hidrogeoquímica de los cauces de la cuenca del Río Mapocho (González, 1991). Hacia el Sur, San Juan (2015), reconoce que el agua subterránea presenta mayor C.E., y especialmente altas concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , que tiene estrecha relación con la hidrogeoquímica con el sistema fluvial de la cuenca del río Maipo (González 1991).

Por otro lado, Iriarte (2003) reconoce una recarga antrópica asociada a las filtraciones de las redes de agua potable y a filtraciones de alcantarillado (en mucho menor grado), que provocaría un aumento en las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  y ser la principal fuente de contaminación por  $\text{NO}_3^-$ , debido a la alta carga de contaminación que genera la filtración de redes de alcantarillado.

### **3.3 Nivel freático (NF)**

El nivel freático, corresponde al nivel superior de un acuífero medido en m bajo el nivel del suelo (m.b.n.s). Fue determinado mediante la interpolación realizada con el método del Kriging Ordinario. Para ello se han usado las mediciones de nivel estático, realizadas en 38 pozos de la campaña de muestreo entre Diciembre de 2015 y Enero de 2016.

La interpolación de las mediciones permite crear, a partir de datos puntuales (información discreta) medidos en los pozos, un mapa de información tipo *Raster*, de información continua.

En la Figura 16, se presenta el resultado de esta interpolación, que representa el valor del nivel freático en cada punto del espacio. Se observa que las mayores profundidades se dan en la zona oriente del área de estudio (89 m.b.n.s.), y que el nivel freático va acercándose gradualmente hacia la superficie en la zona poniente hasta llegar a los 23 m.b.n.s.

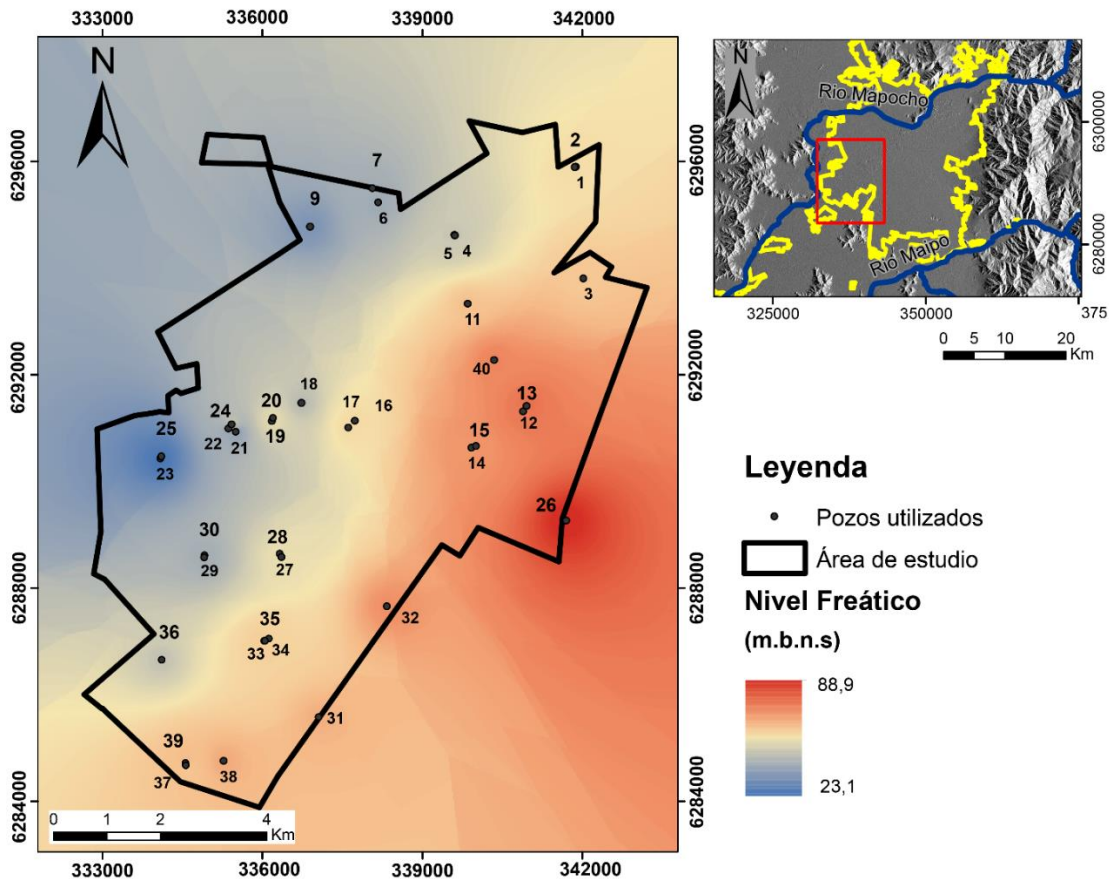


Figura 16: Nivel freático del área de estudio, en que se identifican los pozos con su ID. Sistema de coordenadas UTM Huso 19S.

### 3.4 Piezometría del área de estudio (NP)

El cálculo de la cota hidráulica del acuífero, es de gran utilidad para determinar la dirección preferencial que siguen las aguas subterráneas. Con este dato, puede estudiarse la evolución química del agua subterránea en la dirección de flujo, determinando si existe un aumento o disminución de su salinidad. Además, si se definen posibles fuentes de contaminación, la dirección del agua permite discriminar qué pozos podrían verse afectados.

Para determinar la cota hidráulica, se usa la diferencia entre la cota topográfica de un punto de medición (m.s.n.m) y el nivel estático de dicho punto, obteniéndose así la altura de la columna de agua con respecto al nivel del mar. Se utilizaron los mismos 38 pozos de la campaña de medidas del nivel estático utilizando Arcgis 10.2, se realizó una interpolación usando el método de Kriging Ordinario para obtener una capa raster con información continua de las cotas hidráulicas.

La Figura 17, representa la cota hidráulica del área de estudio, en la cual se observa que ésta es mayor hacia el nororiente, y disminuye gradualmente en dirección suroeste, desde los 458 hasta los 405 m.s.n.m. Lo anterior, indica que el sentido preferencial de

flujo del agua subterránea en el área de estudio es hacia el suroeste. Sin contradecir lo anterior, en el mapa también se observa un cono de depresión (en los pozos 16,17), que podrían originarse por dos motivos. Esto, se debe a que los puntos medidos aún no se habían recuperado o se encontraban sujetos a la influencia de los bombeos de pozos cercanos en el momento de la medición. La presencia de este cono de bombeo, provocará que el agua subterránea de los alrededores que se encuentre dentro del radio de influencia, fluya hacia el centro del cono.

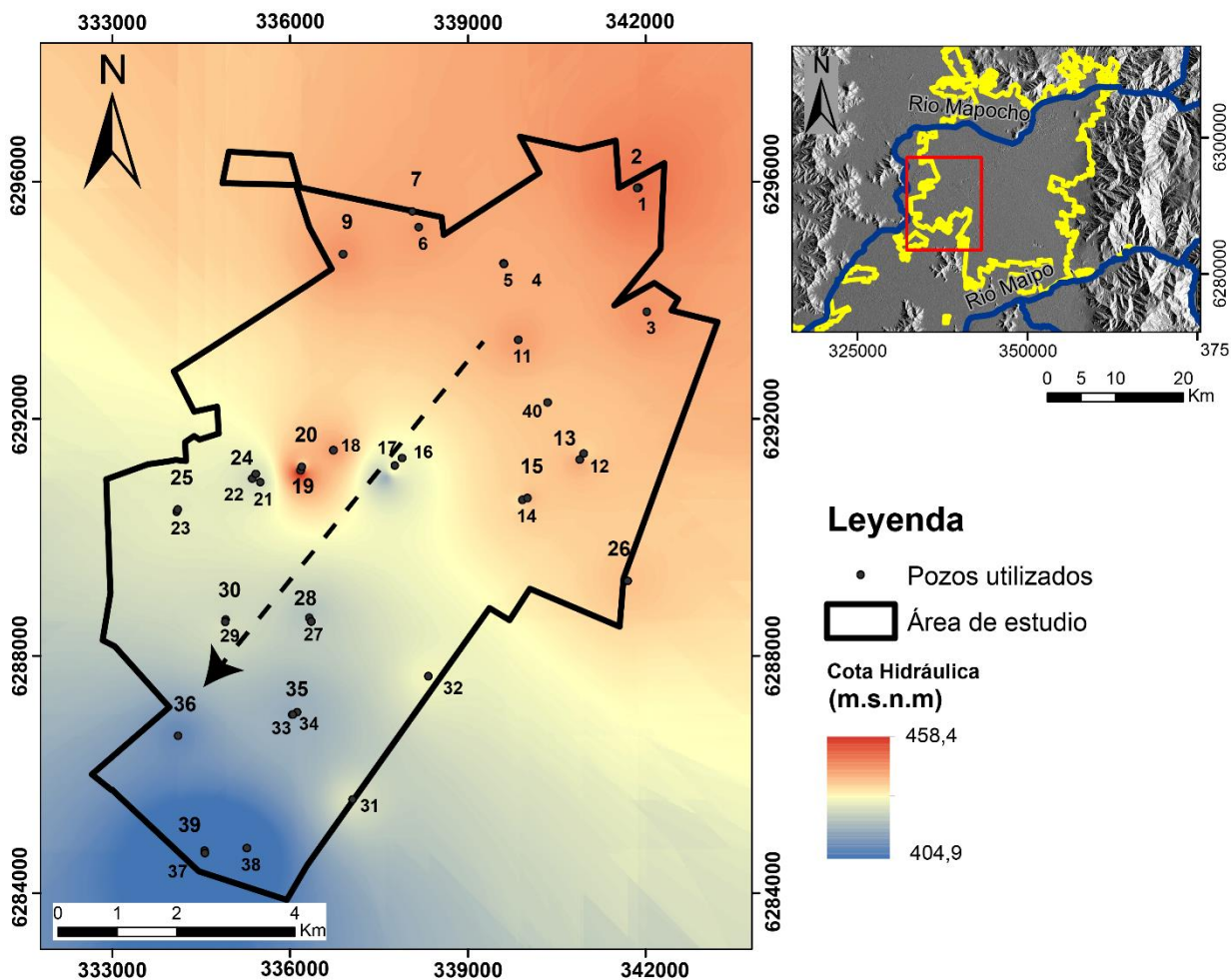


Figura 17: Cota hidráulica calculada para el área de estudio, indentificando los pozos por su ID. UTM Huso 19S.

## 4 Hidrogeoquímica

### 4.1 Resultados y Distribución de los puntos de muestreo

La identificación de los pozos y los datos medidos *in situ*, se encuentran en la Tabla 1.

En la Tabla 2, se muestran los resultados de elementos mayores analizados en laboratorio y el cálculo del balance de cargas iónicas, que se basa en la electroneutralidad del agua. Este error en una medición se define como:

$$\text{Error medición} = \frac{\text{Cationes totales} - \text{Aniones totales}}{\text{Cationes totales} + \text{Aniones totales}}$$

Valores superiores a 5%, sugieren un error analítico suficiente para no considerar dichas muestras en los análisis hidrogeoquímicos a utilizar. En este caso todas las muestras presentan un error analítico inferior al 5%. El mayor error calculado corresponde al pozo 1 con +4,3%.

Los resultados de los elementos trazas se encuentran en el anexo A.

La distribución espacial de los pozos seleccionados se ilustra en la Figura 18. En vista de los antecedentes hidrogeológicos expuestos (columnas estratigráficas y perfil vertical de T° y C.E.), que parecen indicar la existencia de dos niveles acuíferos diferentes, los puntos de muestreo se separarán en dos grupos para los análisis hidrogeoquímicos, según la “profundidad ranurada” (P.R). Esta se define en este trabajo como la profundidad (m.b.n.s.) a la que se encuentra la mitad del tramo ranurado o criba. Por sobre el tramo ranurado de cada pozo, se ubica una tubería ciega que no permite el ingreso del agua. En el anexo B, se muestra un ejemplo de habilitación del pozo n°9

El primer grupo corresponde a los pozos cuya ranura es menor a 200 m de profundidad. El segundo, incluye los pozos con ranura entre 200 y 250 m. Esta separación de las variables, no representan grupos hidrogeoquímicos distintos, sino que se realiza para distinguir los puntos de muestreo por su profundidad

**Tabla 1: Pozos seleccionados para el estudio, profundidad y parámetros medidos *in situ***

ID	pozo	N UTM	E UTM	N.E. (m)	C.H (m)	Prof. Pozo (m)	Prof. ranurada (m)	T (°C)	CE (µS/cm)	pH	Eh (mV)
1	PZN1A SAN JOSE	6295895	341881	57,22	429,8	150	114	19,7	430	7,8	141
2	PZN5 SAN JOSE	6295891	341861	57,93	429,6	320	256	18,6	429	7,9	91
3	PZN3 ESCOBAR WILLIAMS	6293804	342027	60,83	442,5	150	103	17,1	924	7,5	108
4	PZN2A ERRAZURIZ	6294617	339608	47,6	445,1	200	160	17,2	995	8,0	100
5	PZN6 ERRAZURIZ	6294607	339612	47,7	445,3	204	162	17,6	732	8,0	113
6	PZN3 VERSALLES	6295227	338177	40,1	440,2	190	140	23,1	1010	7,6	79
7	PZN1 VERSALLES II	6295495	338064	41,3	429,9	303	250	19,0	402	7,7	110
8	PZN1 LOS ALAMOS	6294449	338057			60	39	18,0	1123	7,5	60
9	PZN2 JAHUEL	6294777	336896	33,71	405,1	300	252	18,7	474	8,3	169
10	PZALTO JAHUEL	6293327	336162			150	92	17,4	1238	7,4	105
11	PZN1 ORESTE PLATH	6293329	339853	62,33	411,4	220	145	18,0	733	7,6	129
12	PZN3A CERRILLOS I	6291407	340957	76,5	420,1	200	142	16,8	1152	7,7	127
13	PZN6 CERRILLOS I	6291304	340892	74,2	431,6	304	250	17,2	988	7,8	322
14	PZN1A STA ADELA	6290632	339924	69,0	409,4	150	107	16,9	1164	7,9	121
15	PZN9 SANTA ADELA	6290658	340009	70,0	423,6	303	251	16,7	1015	7,8	116
16	PZN2A EL TRANQUE	6291132	337735	57,9	441,1	150	101	18,0	1143	8,0	80
17	PZN4A EL TRANQUE	6291003	337614	57,9	440,6	200	137	17,8	825	8,5	119
18	PZN1A PAJARITOS	6291468	336732	45,1	424,6	180	140	17,1	1052	7,4	102
19	PZN1 MAIPU CENTRO	6291123	336177	52,5	459,5	231	196	17,6	975	8,3	97
20	PZN2 MAIPU CENTRO	6291187	336201	53,4	479,4	301	250	20,6	681	8,5	102
21	PZN1A EL ALMENDRAL	6290924	335500	36,0	440,5	117	88	18,1	1275	7,4	183
22	PZN2A EL ALMENDRAL	6290984	335366	38,02	432,0	205	178	17,8	688	7,4	188
23	PZN1 SAN LUIS	6290431	334088	22,57	441,7	70	40	18,0	1325	7,4	61
24	PZN6A ALMENDRAL	6291067	335425	50,03	418,2	290	234	19,4	770	8,3	155
25	PZN 2A SAN LUIS	6290465	334106	26,91	424,4	300	249	19,7	394	7,6	67
26	PZN3 VISTA ALEGRE	6289263	341696	89,00	446,6	240	196	17,0	1374	7,2	130
27	PZN1 CIUDAD JARDIN I	6288637	336329	53,0	441,2	70	58	17,7	1403	7,6	163
28	PZN2A CIUDAD JARDIN I	6288581	336360	55,00	423,8	242	192	17,7	1272	7,9	81
29	PZN1 CIUDAD JARDIN II	6288612	334916	41,20	429,2	70	52	17,4	1198	7,7	195
30	PZN3 CIUDAD JARDIN II	6288571	334911	41,2	440,9	300	250	17,1	1000	7,8	127
31	PZN2 STA ANA	6285572	337057	65,22	440,0	150	108	16,3	1365	7,5	107
32	PZN2 SANTA MARTA	6287655	338339	71,3	440,6	220	144	16,7	1306	7,9	148
33	PZN1 EL ABRAZO	6287006	336039	60,46	433,4	70	55	18,5	1505	7,7	123
34	PZN4 EL ABRAZO	6287048	336125	58,12	466,2	165	111	18,0	1320	7,8	123
35	PZN5 EL ABRAZO	6287003	336050	61,39	438,3	305	248	18,0	1082	7,8	109
36	PZN1 LOS BOSQUINOS	6286648	334113	46,82	438,1	257	205	16,8	1247	8,1	122
37	PZN1 CIUDAD SATELITE	6284711	334562	64,63	436,2	80	62	16,7	1453	8,1	135
38	PZN4 CIUDAD SATELITE	6284753	335273	66,01	442,7	100	70	17,6	1429	7,9	152
39	PZN6 CIUDAD SATELITE	6284672	334565	58,56	434,8	305	250	16,9	905	8,3	154
40	PZN1 CERRILLOS II	6292273	340350	72,9	428,0	150	107	18,4	1102	7,1	842

**Tabla 2: Resultados de elementos mayoritarios en el agua subterránea del área de estudio y cálculo del balance iónico de cargas.**

ID	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)	Mg (mg/L)	Cl (mg/L)	SO <sub>4</sub> (mg/L)	NO <sub>3</sub> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> (mg/L)	Balance Iónico
1	23,0	1,5	54,5	5,6	40,8	66,4	9,7	94,7	4,3%
2	24,0	1,3	55,9	5,5	41,0	66,4	10,0	94,8	1,2%
3	22,0	2,3	142,0	21,8	89,9	204,0	23,7	179,7	1,1%
4	20,0	1,7	152,0	23,8	121,0	222,0	37,2	139,6	0,8%
5	22,0	1,4	106,0	15,2	77,4	148,0	20,4	121,1	0,4%
6	18,0	1,7	157,0	21,4	123,0	220,0	40,8	139,3	0,4%
7	18,0	1,3	56,4	5,5	37,4	54,5	8,3	101,7	0,2%
8	35,0	2,8	165,0	25,7	126,0	227,0	43,8	218,4	-0,1%
9	24,0	2,4	61,7	5,8	49,3	76,6	12,9	92,0	-0,2%
10	55,0	3,0	170,0	27,3	143,0	259,0	54,6	218,0	-0,2%
11	29,0	2,0	102,0	13,1	75,6	166,0	12,0	112,9	-0,2%
12	45,0	3,8	156,0	28,7	126,0	232,0	49,1	216,8	-0,2%
13	28,0	1,1	148,0	20,8	109,0	228,0	29,0	165,1	-0,3%
14	52,0	3,2	156,0	26,9	128,0	236,0	51,4	218,0	-0,3%
15	26,0	2,0	156,0	20,8	115,0	239,0	14,7	164,9	-0,4%
16	34,0	3,1	171,0	28,4	124,0	241,0	31,8	211,2	-0,4%
17	24,0	1,8	120,0	17,3	81,4	173,0	18,5	145,7	-0,6%
18	33,0	2,5	154,0	23,2	121,0	228,0	41,0	173,2	-0,7%
19	38,0	4,7	180,0	34,4	111,0	204,0	157,0	157,4	-0,8%
20	32,0	1,9	95,5	9,1	74,3	161,0	10,7	80,5	-0,9%
21	71,0	3,2	164,0	26,6	134,0	244,0	54,8	234,4	-1,0%
22	28,0	3,2	97,5	9,5	71,4	139,0	17,6	110,6	-1,2%
23	87,0	3,9	161,0	35,2	153,0	246,0	68,4	254,0	-1,3%
24	36,0	2,5	105,0	11,5	84,1	166,0	20,2	108,7	-1,6%
25	28,0	1,6	46,5	3,3	41,3	61,9	8,7	71,8	-1,7%
26	63,0	3,6	195,0	30,1	154,0	334,0	24,3	237,1	-1,7%
27	80,0	4,7	180,0	34,4	152,0	272,0	60,8	281,5	-1,8%
28	51,0	3,2	187,0	28,2	148,0	296,0	34,7	218,3	-2,1%
29	52,0	3,3	168,0	26,3	127,0	236,0	42,8	236,1	-2,1%
30	28,0	2,4	154,0	18,6	114,0	240,0	9,3	126,3	-2,1%
31	75,0	5,3	172,0	35,2	151,0	316,0	30,9	257,5	-2,1%
32	55,0	4,8	182,0	31,1	148,0	309,0	16,3	221,9	-2,1%
33	90,0	7,1	188,0	35,9	179,0	328,0	25,7	269,4	-2,2%
34	60,0	5,3	181,0	30,4	150,0	311,0	18,3	238,0	-2,2%
35	29,0	3,2	170,0	24,0	137,0	273,0	11,1	157,8	-2,4%
36	31,0	3,0	196,0	27,3	150,0	308,0	14,8	179,8	-2,5%
37	80,0	7,5	181,0	37,0	158,0	327,0	22,5	283,2	-2,5%
38	85,0	6,5	183,0	36,4	159,0	327,0	22,0	270,8	-2,6%
39	35,0	3,0	127,0	18,8	97,3	213,0	9,6	151,3	-3,0%
40	31,0	3,8	155,0	26,6	172,0	228,0	31,6	121,0	-3,0%

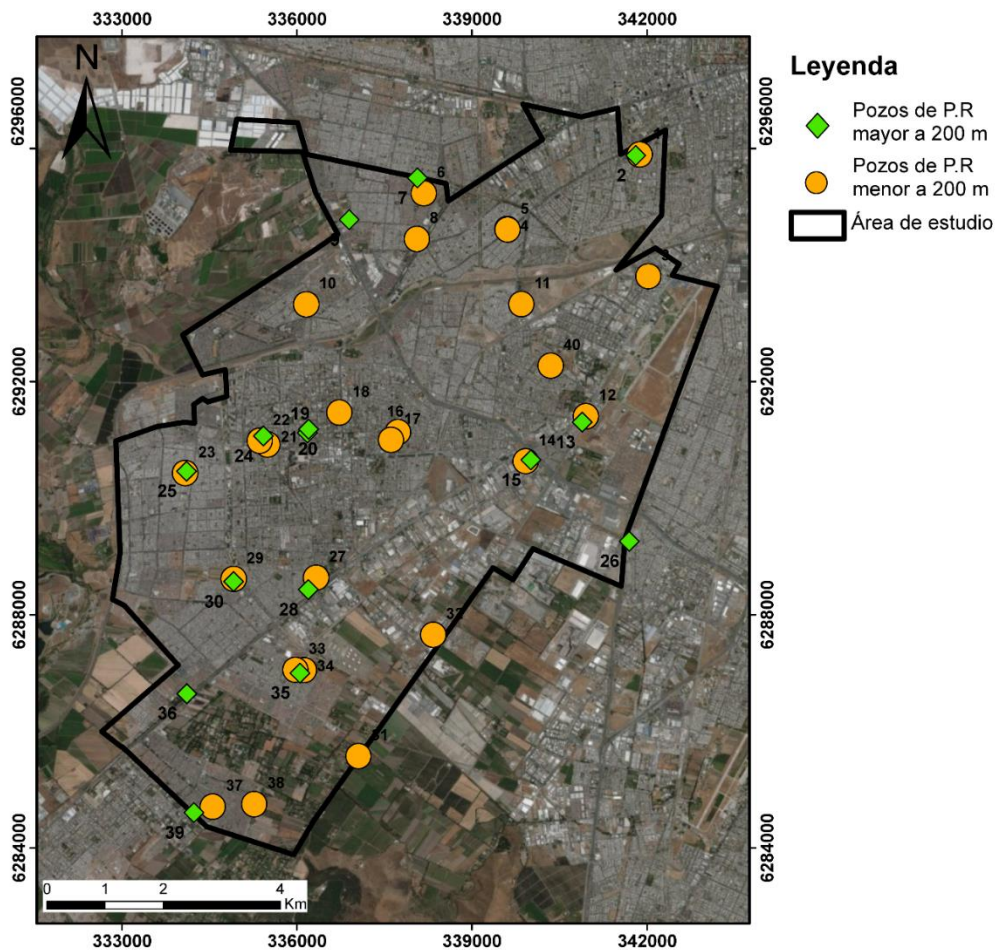


Figura 18: Distribución de los pozos seleccionados en el estudio, que son separados según la profundidad de su tramo ranurado a los 200 m. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S).

## 4.2 Clasificación de aguas y distribución espacial

### 4.2.1 Elementos Mayores

La clasificación química de aguas subterráneas se efectuó mediante diagrama de Piper, construido a partir de dos diagramas triangulares que representan la proporción de cationes y aniones mayores de cada muestra. La suma de los cationes y aniones principales se reporta al 100% de la composición total. Se utiliza un triángulo para los cationes principales:  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}/(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$ , y otro para aniones:  $\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^{-}$ . El diagrama se forma, finalmente, en un cuadrilátero que recoge la información de ambos triángulos.

En la Figura 19, puede observarse el diagrama de Piper construido, y en el cual se distinguen los puntos según la profundidad de la ranura.

De manera general, en los cationes predomina el  $\text{Ca}^{2+}$  con una proporción mayor al 50% en todos los pozos, y que aumenta su proporción en el sentido de flujo principal del agua subterránea (hacia el surponiente). En el caso de los aniones, se observa una

mayor proporción de  $\text{SO}_4^{2-}$ , que también aumenta del 30% al 50% en la dirección de flujo. En virtud de lo anterior, el agua subterránea en el área de estudio se clasifica como sulfatada-cálcica.

Como se mencionó, en el caso de los aniones hay una variación importante de  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  en los datos. Los pozos 2, 7, 9 y 25, pertenecientes al grupo de P.R. mayor a 200 m, tienen mayor proporción de  $\text{HCO}_3^-$  (casi la misma que  $\text{SO}_4^{2-}$ ) que el resto de las variables, en especial la muestra 7 que tiene un 42% de  $\text{HCO}_3^-$ . Lo mismo ocurre con estos pozos en el caso de los cationes, mostrando la menor proporción de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . El resto de los pozos de ambos grupos se encuentran mezclados en el diagrama, por lo que no se puede establecer un patrón que los distinga, aunque aquellos de P.R. mayor a 200 m exhiben una menor proporción de  $\text{Mg}^{2+}$ .

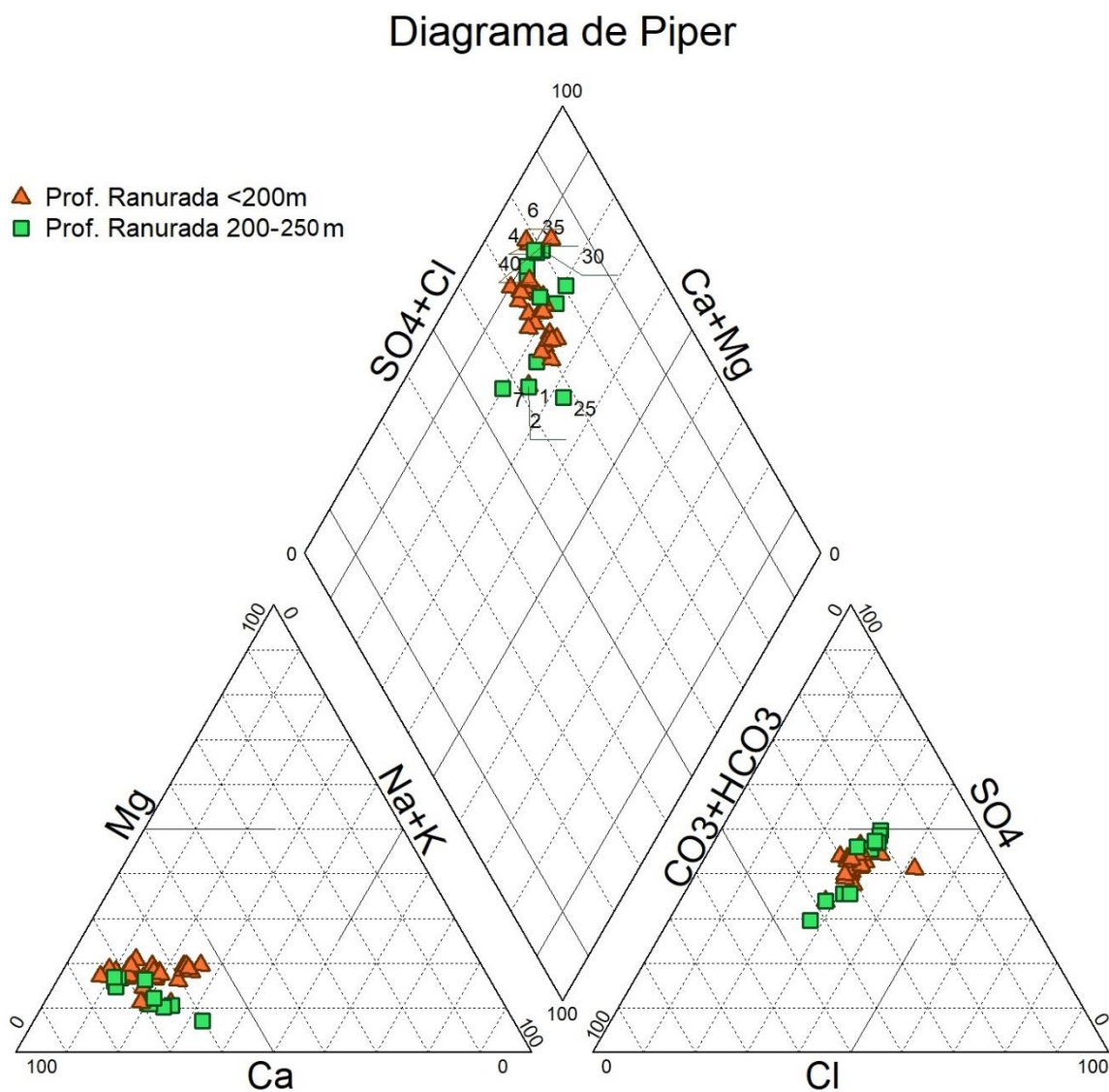


Figura 19: Diagrama Piper, diferenciando los puntos muestreados por la profundidad ranurada.



Para estudiar la distribución espacial de los elementos mayores, se han utilizado los diagramas de Stiff. Se forman con 3 ejes paralelos, midiendo al lado izquierdo cationes ( $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}/\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ), y en la derecha aniones ( $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}/\text{HCO}_3^-$ ). La distancia vertical entre los ejes horizontales es arbitraria, y puede variar según el software que se ocupe para la construcción, mientras que la escala elegida en la horizontal depende de la salinidad de las aguas de la región estudiada. Se sitúan las concentraciones de los iones en cada uno de los seis ejes (en meq/L) y luego se unen para formar un polígono.

La distribución de estos diagramas en el área de estudio se ilustra en la Figura 20. En el mapa se muestran los diagramas de los pozos del nivel acuífero superficial (a) y aquellos más profundos (b). Si bien el tipo de agua es el mismo,  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ , se aprecia una diferencia en las concentraciones de elementos mayoritarios entre los dos grupos. De hecho, en los pozos profundos se dan menores las concentraciones en la zona norte (pozos n°2, 7 y 9) y centro (pozos n° 20, 24 y 25). Hacia el sur, visualmente no se observan mayores diferencias entre los datos. Por otra parte, el pozo n° 1 que pertenece al grupo menor a 200 m, y los pozos N°2,7, 9 y 25 de P.R mayor a 200 m, se aprecia la misma concentración para todos los aniones, o una concentración levemente mayor de  $\text{HCO}_3^-$ .

En relación a la distribución espacial de los datos, en los datos (b) se aprecia que, en general, las concentraciones de elementos mayores, especialmente  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , aumentan con la dirección preferencial de flujo. Mientras que en los datos de los puntos más superficiales (a) no se aprecia claramente esta relación. De hecho, se observa que, en general, los diagramas de Stiff tienen el mismo tamaño (mismas concentraciones) en toda el área de estudio, a excepción del pozo n°1 ubicado al norte del área de estudio. Esto último puede ser interpretado, de acuerdo a Iriarte (2003), como que en el pozo n°1 se refleja una similitud con las aguas superficiales de la cuenca del río Mapocho caracterizadas por una baja salinidad, que también caracteriza a los pozos asociados a esta fuente de recarga. En cambio, hacia el sur del área de estudio, la alimentación aparece vinculada más bien a la infiltración de aguas superficiales de la cuenca del río Maipo caracterizadas por sus altas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , al igual que las muestras ubicadas al suroeste.

A) P.R < 200 metros

B) P.R 200 - 250 metros

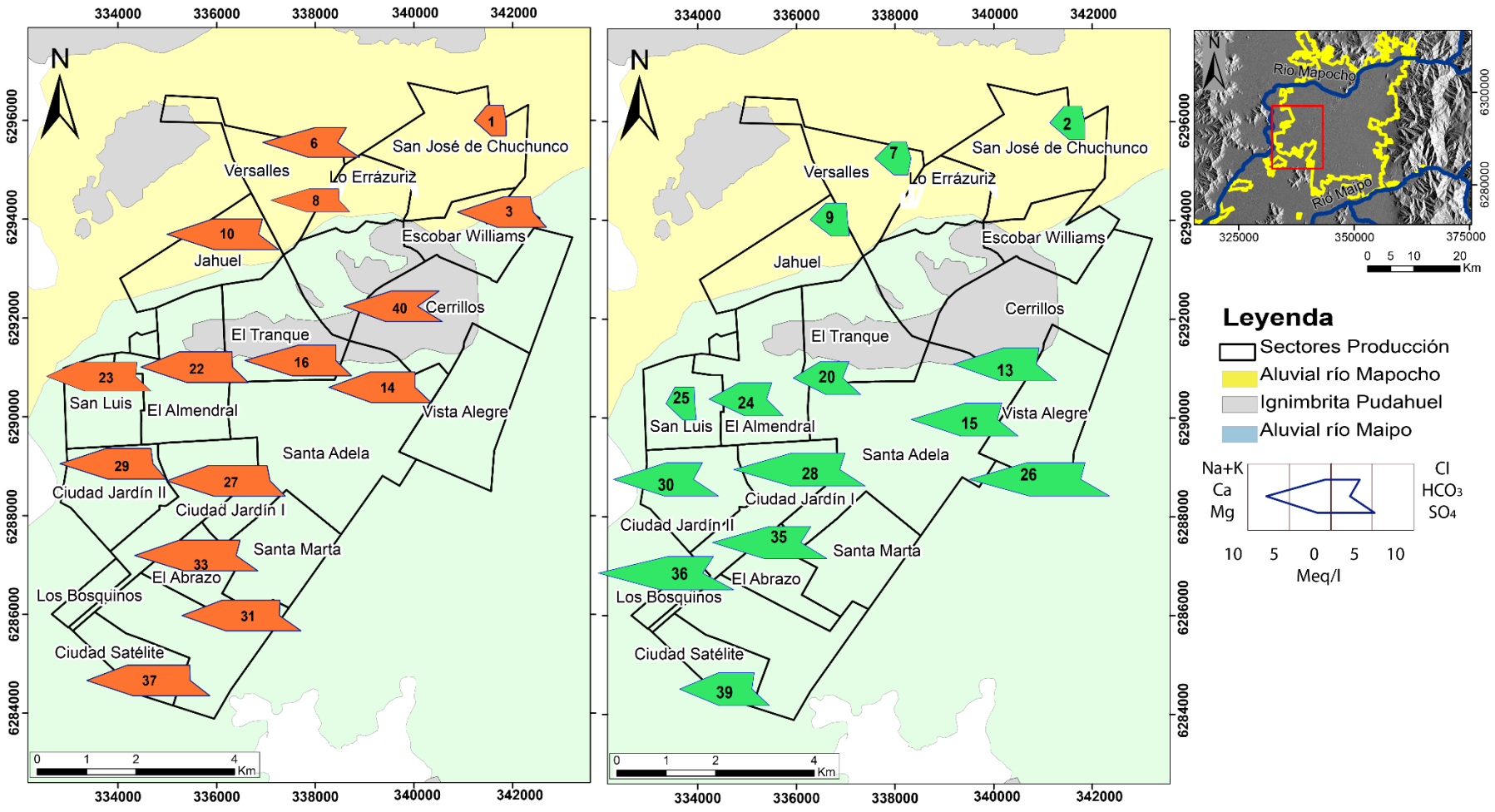


Figura 20: Diagramas de Stiff para las muestras del área de estudio. En A) se ilustran los diagramas para los pozos de P.R < 200 m. Y en B) aquellos de P.R entre 200 y 250 m de profundidad. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S).

## 4.2.2 Parámetros físico-químicos

### 4.2.2.1 pH y Temperatura

El pH medido en los distintos puntos de muestreo presenta valores de 7,1 (nº40) a 8,46 (nº20), con promedio de 7,8, indicando que las aguas subterráneas varían desde neutras a levemente alcalinas. En la Figura 21, se muestra la distribución espacial de datos. Se aprecia que no existe un patrón o tendencia en la distribución de los datos, pero en aquellos sectores en que se muestrearon pozos de distinta profundidad, se observa en general, que los sondeos de mayor profundidad tienen mayores valores de pH.

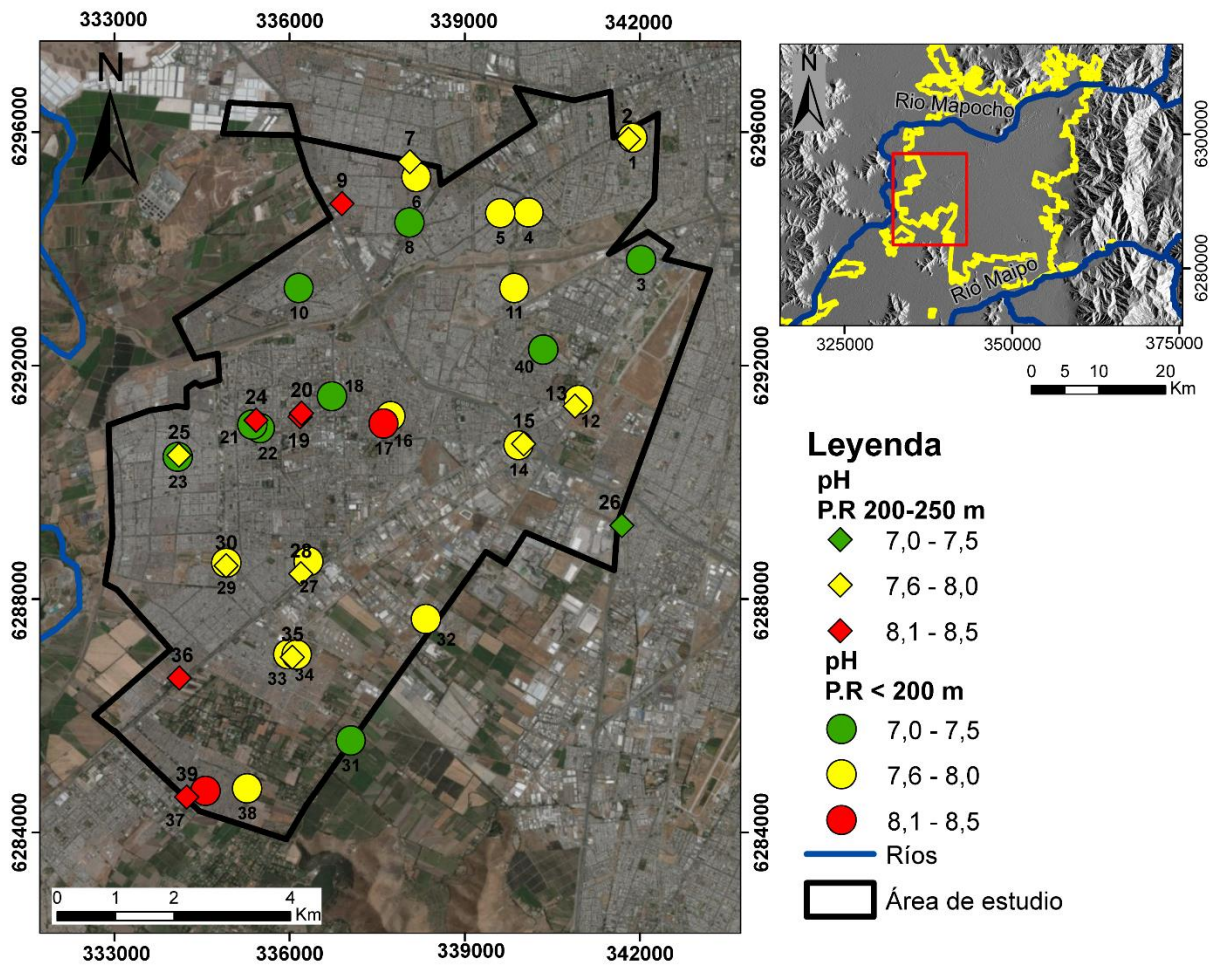


Figura 21: Distribución del pH, distinguiendo los pozos según la profundidad de la ranura. UTM (WGS 84, 19S).

Respecto a la  $T^{\circ}$ , los valores varían de  $16,7^{\circ}\text{C}$  (nº31) a  $23,1^{\circ}\text{C}$  (nº6) con un promedio de  $17,9^{\circ}\text{C}$ . En el mapa de distribución (Figura 22), se aprecia que los pozos con mayor  $T^{\circ}$ , se encuentran al norte y centro-oeste del área de estudio, y tienden a concentrarse en los sondeos de mayor profundidad (P.R. > 200 m), con excepción del pozo N°6 y N°40 con profundidad de los tramos ranurados (P.R.) de 160 m y 107 m, respectivamente. Lo

anterior, concuerda en gran medida con la información de los perfiles verticales mostrados en la sección de hidrogeología.

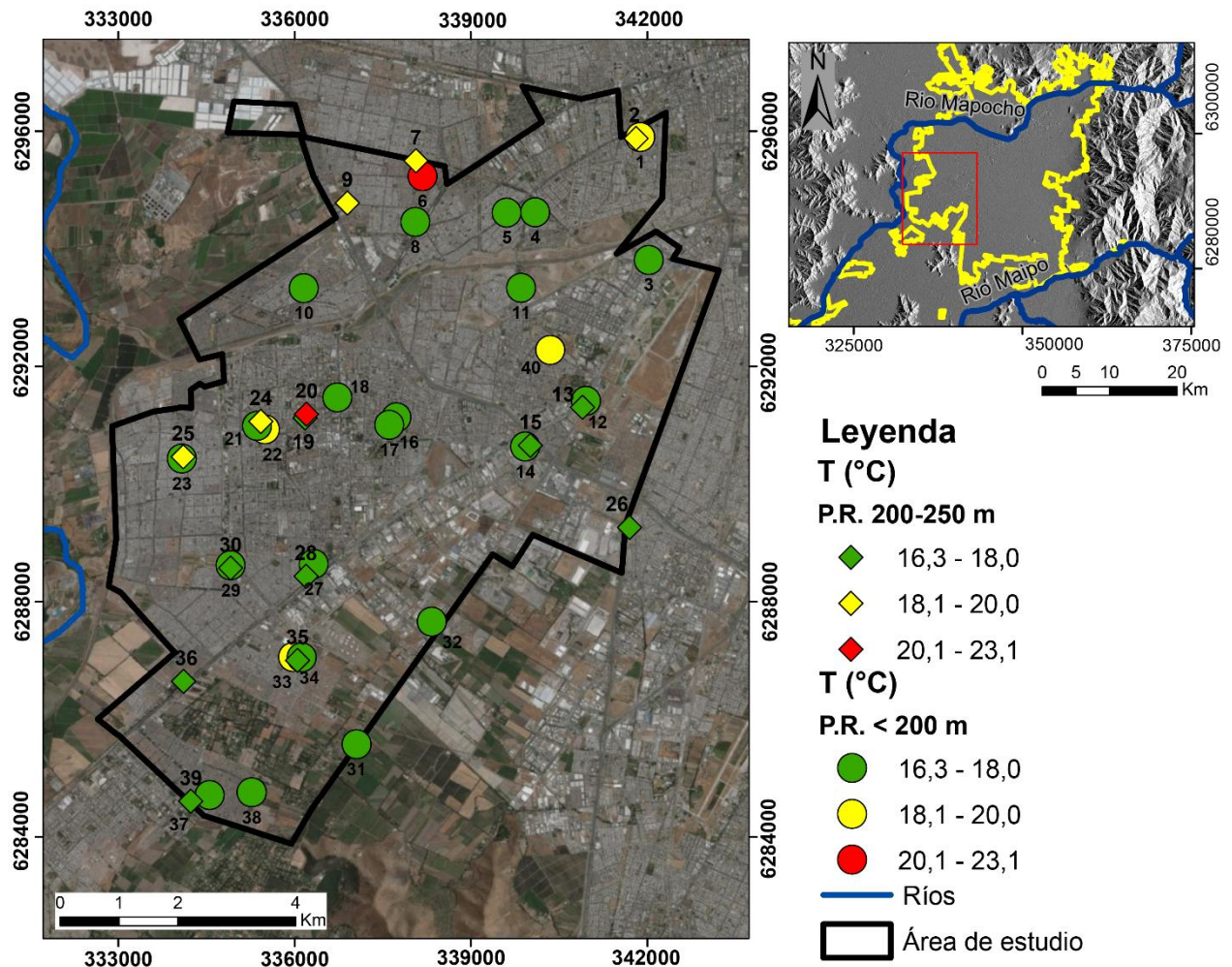


Figura 22: Distribución de la T° (°C), distinguiendo los pozos según su profundidad ranurada. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S).

#### 4.2.2.2 Conductividad Eléctrica

La C.E., en contraste con el pH y T°, presenta una mayor variación espacial que registra entre 393,8  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (n°25) y 1505  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (n°33) con un promedio de 1013,4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En la Figura 23, se ilustra la distribución espacial de la C.E., en la cual se distingue una pauta con tendencia al aumento de los valores en dirección surponiente, donde se ha medido el valor máximo. Esta dirección de incremento concuerda con la dirección general del flujo, indicando que éste ocurre a lo largo de las líneas de flujos como es de esperar.

Por otro lado, la C.E. varía con la profundidad de los sondajes: se observa que los pozos más profundos registran valores menores a los más superficiales. Hacia el sur del área de estudio se hace menos evidente esta diferencia, como por ejemplo en los pozos n°28 y n°36 que presentan valores superiores a 1100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Estos, tienen

tramos ranurados de 143m-240m y 160m-250m respectivamente, por lo que el agua de estas captaciones es una mezcla de los dos niveles de acuíferos.

Esta diferencia en los valores de C.E. con la profundidad, concuerda con lo expuesto en los perfiles verticales y los diagramas de Stiff, indicando que los pozos de 250 - 300 m, recibirían aportes de agua de un nivel de acuífero más profundo con menor valor de salinidad.

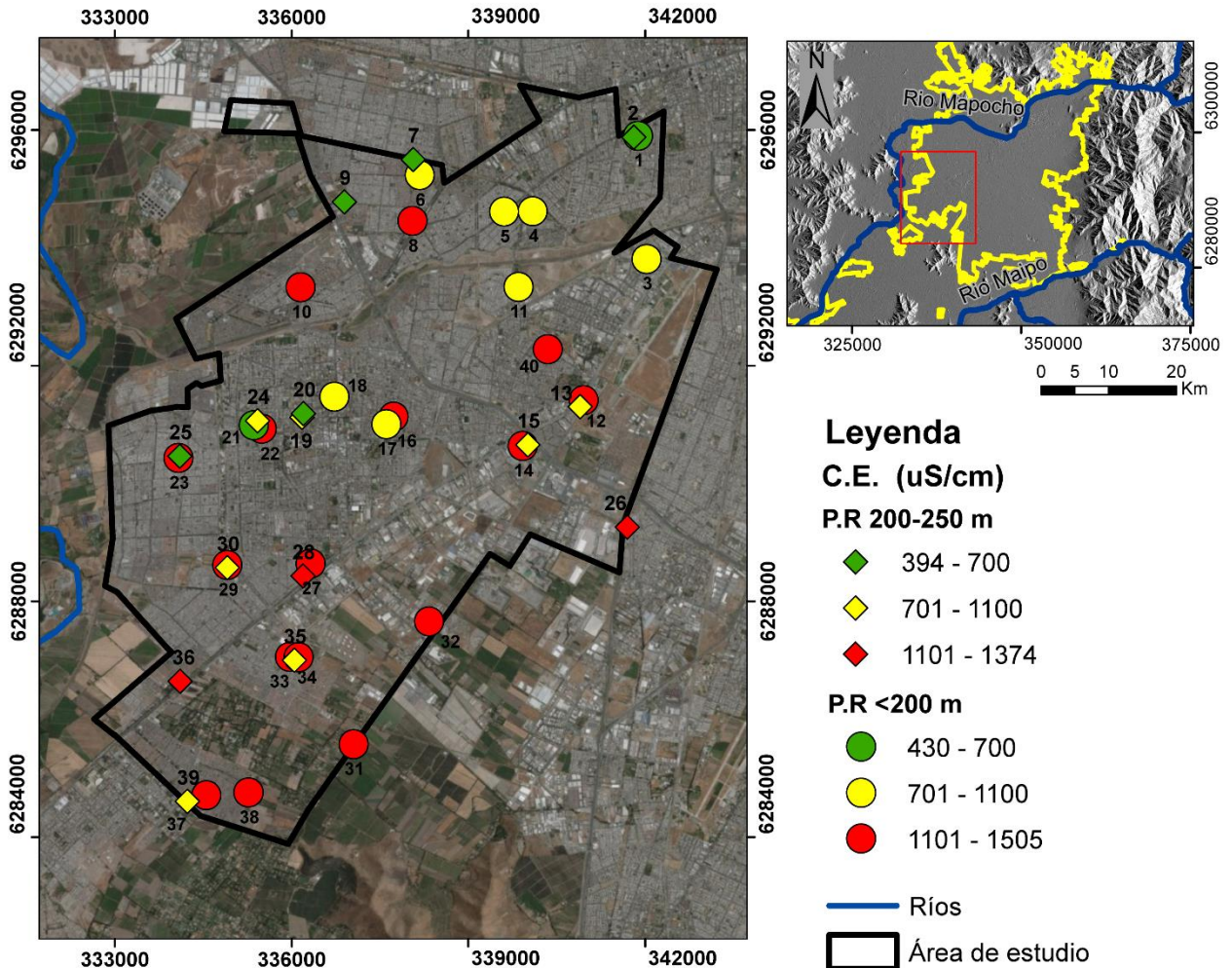


Figura 23: Distribución de C.E. ( $\mu\text{S/cm}$ ) distinguiendo los pozos según su profundidad ranurada. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S).

#### 4.2.2.3 Potencial Óxido Reducción (Eh)

El Potencial de Óxido-Reducción medido en los distintos puntos de muestreo presenta valores de 60 mV(n°8) a 842 mV(n°40), con promedio de 144,3 mV. Dado que los valores de Eh son positivos, indicaría que en el agua subterránea ocurren reacciones de Oxidación.

En la Figura 24, se muestra la distribución espacial de los valores medidos de Eh, en ella se puede observar que no existen tendencias en la distribución de los datos que

captan ambos niveles acuíferos. Los pozos n°13 (322 mV) y n°40 (842 mV) que sobrepasan ampliamente el promedio de los datos. En el caso del pozo n°40, durante la campaña de muestreo, se probó el agua de la llave de muestreo, la que tenía un fuerte sabor y olor a cloro. Al consultar al operador de la bomba del pozo, se constató que la llave de muestreo se encuentra aguas abajo de la inyección de cloro para la desinfección del agua, por lo que el valor de Eh aumenta estaría influenciado por la adición de gas cloro al agua. Como no puede descartarse que el quimismo de la muestra se encuentre influenciado por el tratamiento de cloración, se opta por no incluirla en las siguientes metodologías utilizadas para tratar los datos.

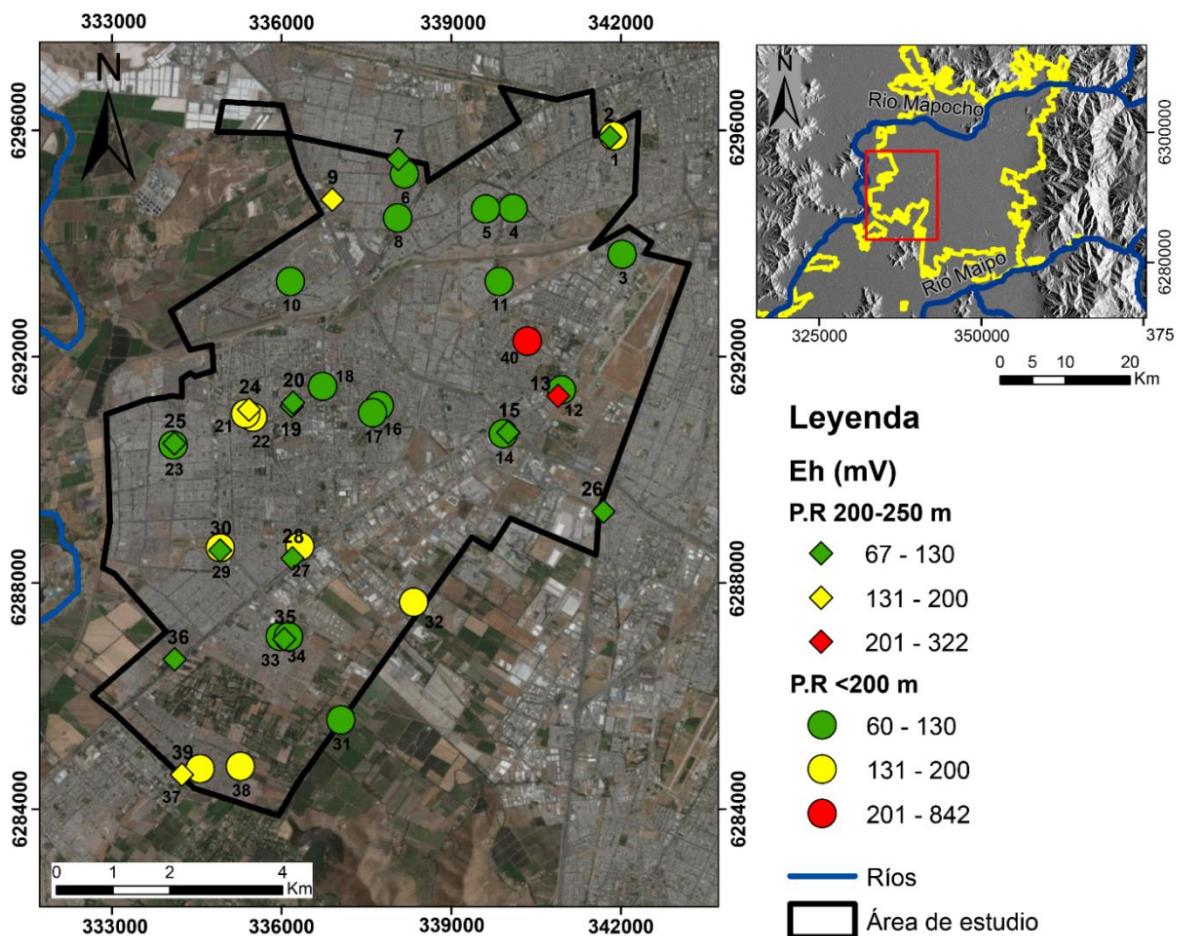


Figura 24: Distribución del Eh (mV), distinguiendo los pozos según su profundidad ranurada. Sistema de coordenadas. UTM (WGS 84, 19S).

## 4.3 Identificación de procesos hidrogeoquímicos

### 4.3.1 Análisis exploratorio de datos

El análisis exploratorio de datos permite organizar y preparar los datos para aplicar las adecuadas herramientas estadísticas. De esta forma, se consigue un análisis de los datos y de las relaciones existentes entre las variables analizadas.

Dicho análisis, se basa en gráficos y estadísticos que permiten explorar la distribución identificando características como: forma de la distribución, valores atípicos y/o extremos, concentraciones de valores, etc.

Las técnicas gráficas empleadas son sencillas, y consisten en distintas formas de presentar los datos, lo que puede realizarse mediante histogramas, distribución de la probabilidad, presentación de los estadísticos y diagramas *box plots*. No obstante, permite observar la variabilidad de los datos según los factores de interés, como las condiciones fisicoquímicas del entorno y la litología. Estos factores, se reflejan en la distribución de los datos, en el comportamiento polimodal y en la presencia de *outliers* (Salvador y Gargallo, 2003).

El primer método a utilizar, corresponde a los diagramas de caja y bigotes o *boxplots*, que distribuyen los datos según cuartiles. Se elabora una “caja” que incluye los datos distribuidos entre el primer cuartil ( $Q1 = 25\%$ ), y tercer cuartil ( $Q3 = 75\%$ ), por lo que incorpora el 50% de los datos. La diferencia en valor entre esos dos parámetros se llama rango intercuartílico (RIC). La elaboración de los bigotes que se proyectan desde los extremos (inferior y superior) de la caja, se realizó siguiendo la versión de diagrama de Tukey (1977), donde las líneas tienen un largo igual a 1,5 veces el RIC. Los valores atípicos, son aquellos que están más allá de los límites inferior y superior, definidos por la extensión de los bigotes hasta menos 3 veces el RIC. Cuando los valores atípicos están más allá de 3 veces el RIC, se denominan valores extremos. Por lo tanto, los valores atípicos u *outliers* aparecen como puntos fuera de los bigotes, distinguiendo si corresponden a valores extremos.

Adicionalmente, se ilustra la mediana como una línea vertical dentro de la caja y su posición refleja el grado de simetría de los datos. También se muestra la media dibujada con una cruz.

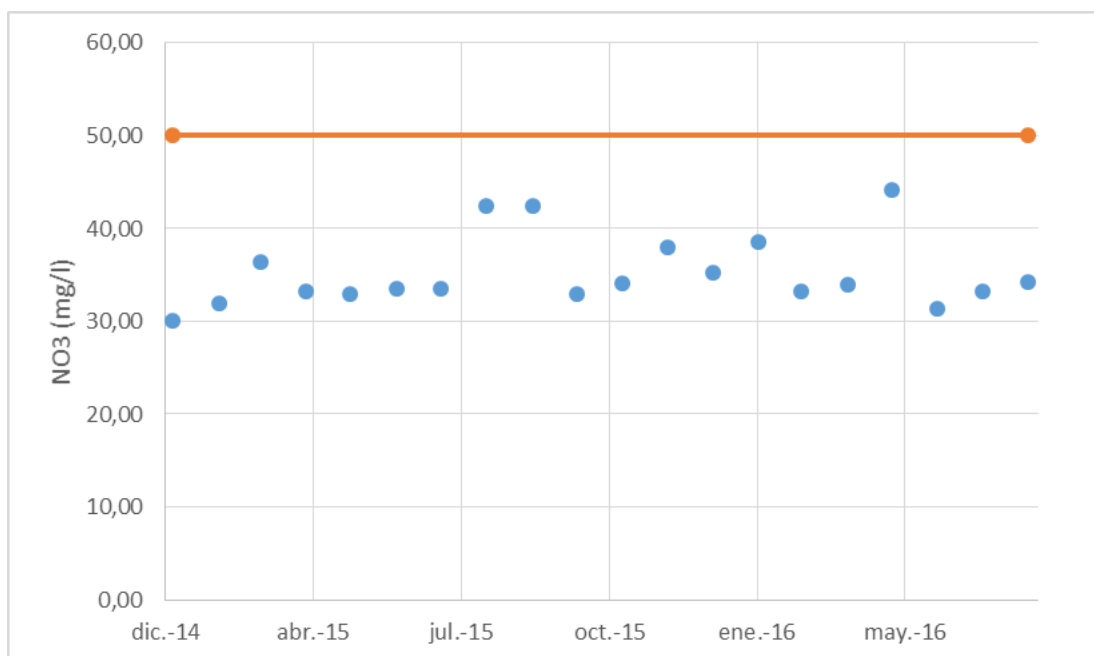
Para la elaboración de los diagramas se utilizó la plataforma Excel, realizando un diagrama para cada elemento mayoritario,  $T^\circ$  y pH.

Respecto a la  $T^\circ$ , se observa que la gran mayoría de sus valores varían entre  $16^\circ\text{C}$  y  $20^\circ\text{C}$ , sin embargo, presenta un valor atípico de  $21^\circ\text{C}$  en el pozo n°20, y uno extremo de  $23,1^\circ\text{C}$  en el pozo n°6. En ambos casos, corresponden a sondajes que captan aguas profundas presentando la anomalía positiva. Lo mismo puede observarse en el mapa de distribución.

Los gráficos de los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , presentan asimetría negativa o sesgada a la izquierda, pues los datos tienden a concentrarse hacia la parte superior de la distribución. Lo anterior, podría estar indicando que estos iones tendrían un comportamiento y distribución similar en el área de estudio. Este comportamiento en la distribución era esperable, en vista de que todas las fuentes del área de estudio corresponden al tipo sulfatada-cálcica, y a que se registra un fuerte aumento de las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en la dirección de flujo (diagramas de Stiff)

En cambio, los gráficos de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , presentan asimetría positiva o sesgada a la derecha, donde los datos tienden a concentrarse hacia la parte inferior de la distribución

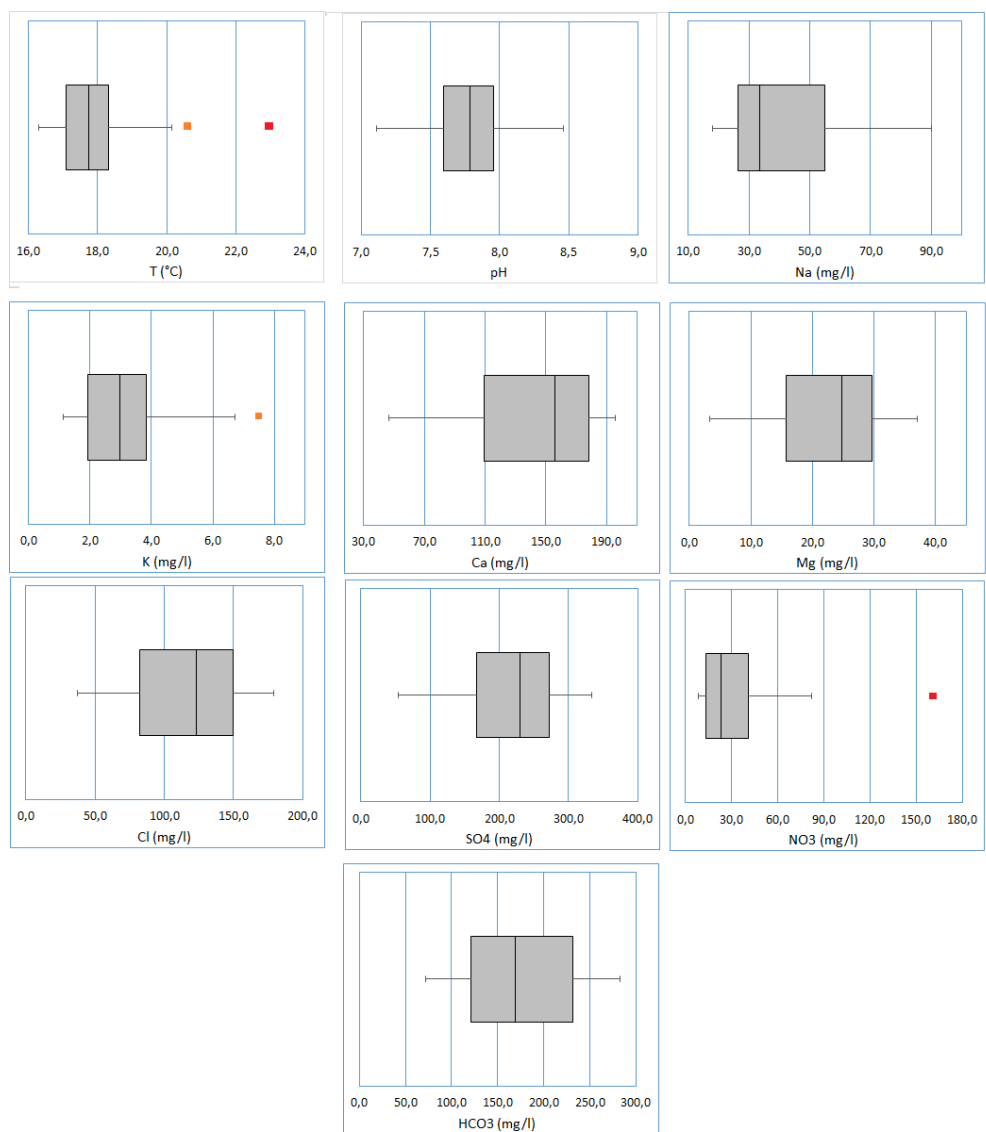
y se extienden más hacia la derecha, donde las concentraciones mayores se encuentran más dispersas. En el caso del  $\text{NO}_3^-$  se tiene que considerar que el aumento de profundidad de captación mitiga los posibles efectos de la presión antropogénica. De hecho, los mayores valores se distribuyen entre 8 y 157 mg/l, con un promedio de 30,5 mg/l, siendo las mayores concentraciones asociadas a los sondajes más someros. El pozo n° 19, ubicado en la zona centro del área de estudio, representa un valor extremo de 157 mg/l, a pesar de tener una profundidad ranurada de 200 m. Teniendo en cuenta que las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en este pozo entre diciembre de 2014 a junio de 2016 oscilaron entre 30 y 40 mg/l (Figura 25), se decide no utilizar esta muestra en las siguientes metodologías, al no tener relación hidrogeoquímica con el resto de las muestras del área de estudio. En la Figura 26, se ilustran los diagramas de caja y bigotes realizados.



**Figura 25: Concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en el pozo N°19 entre los años 2014 y 2016. En línea naranja se grafica el límite que exige la NCh 409/1.**

Los estadísticos descriptivos, se representan en la Tabla 3 para la totalidad de los datos muestreados. Esta incluye los valores de la media, varianza y desviación típica y, medidas de distribución como la asimetría y la curtosis que cuantifican la diferencia o semejanza a la distribución normal de los datos (Daniele, 2007).





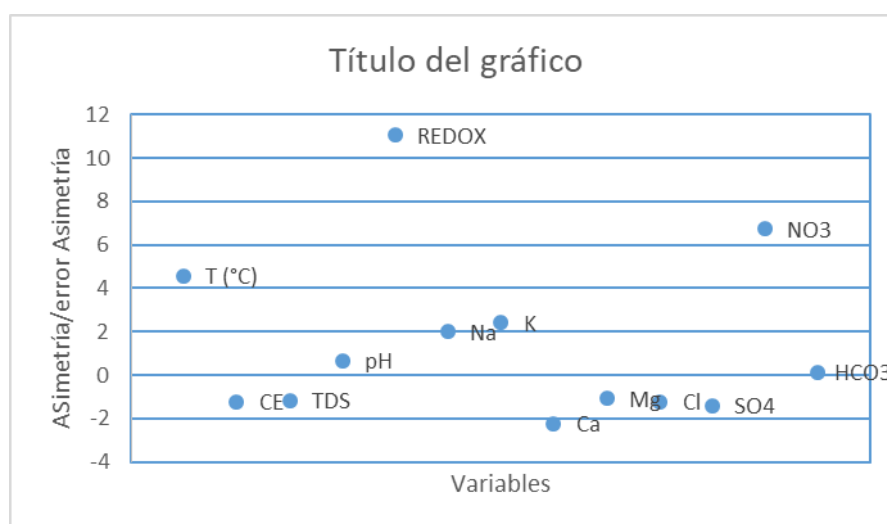
**Figura 26: Diagramas de Caja y Bigotes (*boxplots*) de los elementos mayores, T° y pH.**

Para evaluar la normalidad de los datos, se utilizó el valor de la razón de la simetría sobre su error típico para todas las variables estudiadas y graficadas en los diagramas de caja y bigotes. La normalidad de los datos puede descartarse si el valor de esta razón está fuera del rango -2 a +2. Los resultados se ilustran en la Figura 27, donde se ve claramente que buena parte de las variables no presenta una distribución normal, lo que también se observó en los diagramas *boxplots*.

Los estadísticos muestran bajo coeficiente de variación del pH y de la T°, y alto en el caso de la C.E. y Eh. Respecto a coeficiente de variación de los iones, se observa que el NO<sub>3</sub><sup>-</sup> tiene el mayor valor en comparación con los otros iones (86%).

**Tabla 3: Estadística descriptiva. T° medida en °C, C.E. en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , Eh en mV y los elementos mayoritarios medidos en l/s.**

	T	CE	TDS	pH	Eh	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	NO3	HCO3
Tamaño Muestra	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Media	17,9	1013,4	728,4	7,8	144,3	42,4	3,2	143,8	22,7	114,9	220,7	30,5	176,9
Mediana	17,8	1033,5	741,8	7,8	121,5	33,5	3	156	24,9	123,5	230	23,1	169,2
Moda	18	----	516,6	7,7	123	28	4,7	156	35,2	126	228	----	218
Desv. Típica	1,3	309,8	230,8	0,3	122	21,6	1,6	43,2	9,9	39,3	78,6	26,1	62,4
Varianza	1,6	95968	53292	0	14887	466	2	1867	97	1542	6175	684	3897
Curtosis	6,5	-0,5	-0,5	-0,2	28,9	-0,4	1	-0,1	-0,8	-0,7	-0,2	13,5	-1,2
Asimetría	2,1	-0,6	-0,5	0,3	5,1	0,9	1,1	-1	-0,5	-0,6	-0,6	3,1	0,1
Error típico	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46
Asimetría													
Rango	6,8	1111,2	824,8	1,4	782	72	6,4	149,5	33,7	141,6	279,5	148,7	211,4
Mínimo	16,3	393,8	271,2	7,1	60	18	1,1	46,5	3,3	37,4	54,5	8,3	71,8
Máximo	23,1	1505	1096	8,5	842	90	7,5	196	37	179	334	157	283,2
Coef. Variación	7%	31%	32%	4%	85%	51%	50%	30%	44%	34%	36%	86%	35%



**Figura 27: Relación asimetría/error típico asimetría.**

### 4.3.2 Diagramas binarios y correlaciones

La matriz de correlación es un método de análisis estadístico bivalente que busca determinar el grado de variación de una variable respecto a otra con la que se compara. Esto se determina mediante un coeficiente de correlación que puede tomar valores entre -1 y 1. El valor cero indica una ausencia de asociación o variabilidad entre las dos variables, mientras que entre más cerca sea de 1, mayor es la fuerza de asociación de los parámetros estudiados, por su parte el valor -1 indica una correlación negativa (Dagnino, 2014). En vista de que hay diversas variables de estudio que no cuentan con una distribución normal, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman, que es un método adecuado para datos no paramétricos.

En la Tabla 4, se presenta la matriz de correlación de los elementos mayores y algunos elementos trazas de interés para las 38 muestras seleccionadas del área de estudio, pues como se dijo anteriormente, no se utilizaran los datos de los puntos n°19 y n°40.

Existe una alta correlación (superior a 0,7) entre prácticamente todos los elementos mayores donde destacan  $\text{Cl}^-$  con  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , con valores superiores a 0,9. Destaca la correlación del  $\text{Na}^+$  con  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , Li, B, Rb y Sr, donde el Li presenta una correlación de 0,96 con el Sr. Entre los elementos traza el U presenta buena correlación con muchos de los elementos analizados.

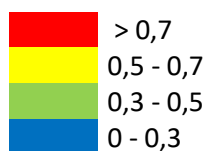
La buena correlación que existe entre todos los elementos mayoritarios sugiere que el aporte de estos elementos a las aguas ocurre por procesos de interacción con el medio de acuerdo con el hecho que el aumento de salinidad ocurre en la dirección del flujo preferencial.

Por otro lado, el  $\text{NO}_3^-$  presenta, en general, una débil a nula relación con todos los elementos de estudios, exceptuando el Mg, con el cual presenta una correlación moderada. La escasa correlación entre este parámetro con el resto de las variables de estudio, estaría indicando que las fuentes de su concentración en el agua subterránea, no coinciden con las de los elementos mayores. De acuerdo a lo expuesto por Falcón y Matutano (2000), Edmunds y Shand (2008). Giuliano y Blarasin (2014), Kazakis y Voudouris (2015), tienen un origen antrópico, que puede estar relacionado a actividades agrícolas, industriales y/o filtración de redes de alcantarillado.

Por su alto coeficiente de correlación, se reconoce un grupo compuesto de As, Cr y Mo, que presentan una fuerte correlación negativa con los elementos mayores en la zona de estudio, indicando que la distribución de sus concentraciones no se relaciona con las de elementos mayores. Por esta razón, es posible que sus valores se relacionen a procesos fisicoquímicos diferentes en el acuífero.

Tabla 4: Matriz de correlaciones de Spearman de las variables estudiadas

	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	NO3	HCO3	Li	B	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Mo	Cs	Ba	U	
Na	1																						
K	0,84	1																					
Ca	0,58	0,63	1																				
Mg	0,75	0,78	0,94	1																			
Cl	0,70	0,72	0,94	0,93	1																		
SO4	0,68	0,71	0,96	0,91	0,95	1																	
NO3	0,28	0,26	0,41	0,50	0,31	0,20	1																
HCO3	0,86	0,77	0,82	0,90	0,82	0,84	0,33	1															
Li	0,80	0,87	0,62	0,71	0,702	0,77	-0,04	0,75	1														
B	0,85	0,80	0,50	0,64	0,64	0,58	0,15	0,72	0,73	1													
Cr	-0,12	-0,25	-0,61	-0,56	-0,51	-0,58	-0,10	-0,43	-0,39	0,01	1												
Co	0,69	0,64	0,75	0,81	0,78	0,79	0,25	0,78	0,66	0,49	-0,50	1											
Ni	0,36	0,41	0,74	0,61	0,68	0,71	0,21	0,52	0,38	0,31	-0,42	0,60	1										
Cu	0,18	0,26	0,17	0,16	0,18	0,22	-0,08	0,20	0,30	0,32	-0,05	0,03	0,06	1									
Zn	-0,10	-0,13	0,02	-0,06	-0,10	-0,03	0,01	-0,03	-0,17	-0,12	-0,09	0,02	0,23	-0,14	1								
As	-0,14	-0,13	-0,63	-0,54	-0,53	-0,52	-0,33	-0,45	-0,11	-0,06	0,69	-0,41	-0,53	0,00	-0,19	1							
Rb	0,62	0,79	0,31	0,40	0,41	0,49	-0,14	0,46	0,77	0,57	-0,05	0,47	0,29	0,21	-0,16	0,15	1						
Sr	0,78	0,87	0,74	0,79	0,81	0,87	0,02	0,79	0,96	0,71	-0,44	0,71	0,50	0,29	-0,16	-0,23	0,73	1					
Mo	-0,21	-0,21	-0,72	-0,57	-0,59	-0,64	-0,30	-0,45	-0,19	-0,17	0,52	-0,42	-0,71	-0,10	-0,28	0,75	-0,06	-0,32	1				
Cs	0,44	0,45	0,05	0,22	0,16	0,18	-0,14	0,31	0,51	0,29	-0,13	0,52	-0,13	0,09	-0,21	0,18	0,50	0,45	0,39	1			
Ba	0,32	0,28	0,73	0,59	0,62	0,65	0,42	0,51	0,26	0,20	-0,36	0,45	0,68	-0,04	0,26	-0,57	0,10	0,36	-0,75	-0,34	1		
U	0,75	0,74	0,86	0,87	0,87	0,91	0,21	0,89	0,76	0,65	-0,45	0,76	0,56	0,32	-0,11	-0,44	0,51	0,86	-0,46	0,34	0,54	1	



## Elementos mayores

En la

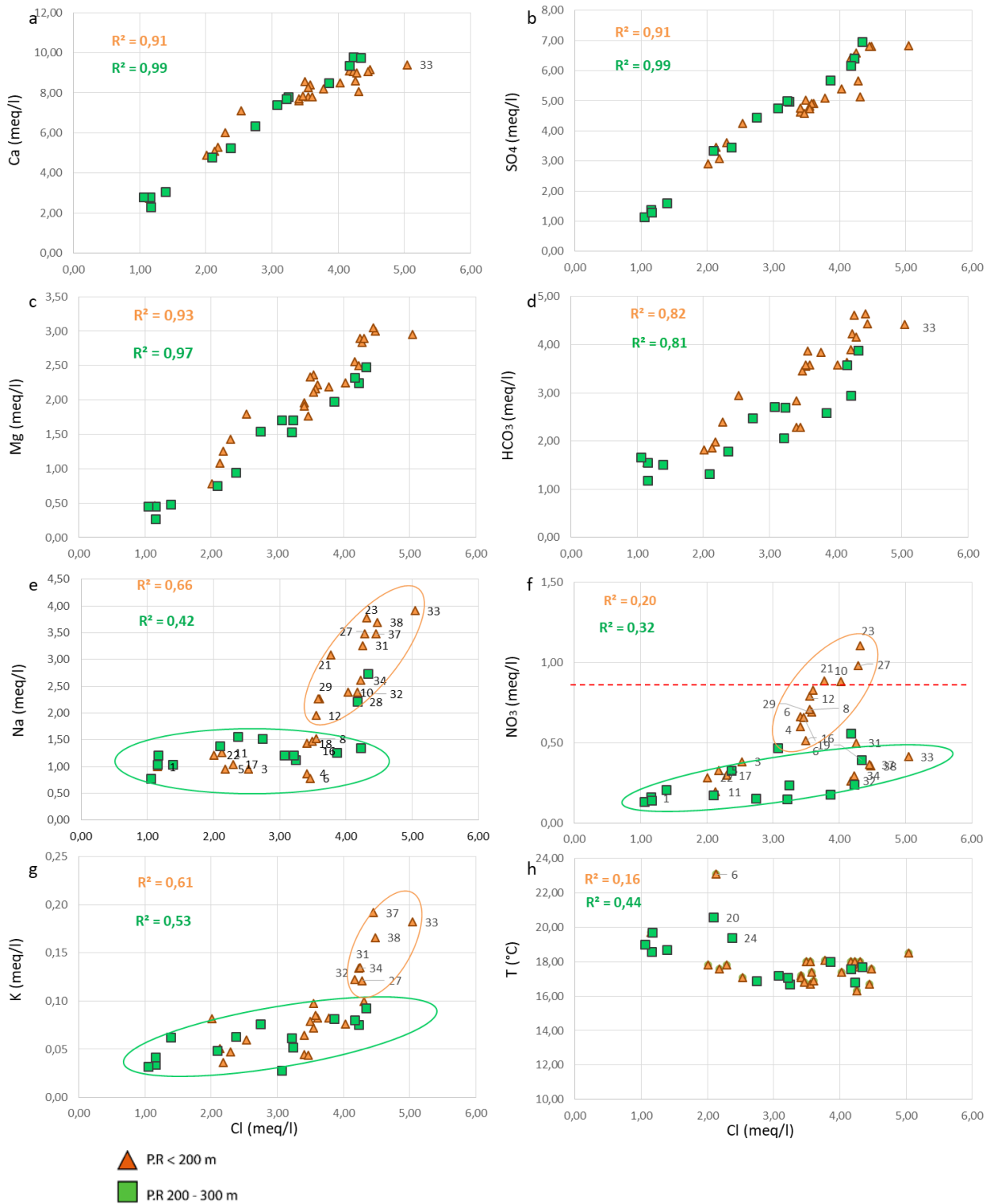
Figura 28, se presentan diagramas de la concentración de elementos mayores vs  $\text{Cl}^-$ , distinguiendo los pozos según la profundidad de su tramo ranurado. Las concentraciones se comparan con el ión  $\text{Cl}^-$ , debido a que este se considera un elemento conservativo en el agua subterránea, permitiendo observar la evolución de los datos en el área de estudio.

En los gráficos a,b,c y d, se observa que el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$  presentan un excelente coeficiente de correlación lineal con  $\text{Cl}^-$  ( $> 0,8$ ) para los dos grupos de pozos indicando que probablemente los procesos que determinan las concentraciones de estos iones son comunes para las muestras analizadas.

Por otro lado, en el gráfico  $\text{Na}^+$  vs  $\text{Cl}^-$  (e) se pueden reconocer dos tendencias distintas de los datos. La primera tendencia (encerrada en color verde), se compone por la mayoría de los pozos de P.R  $> 200$  m, y aquellos menores a 200 m ubicados en la parte norte y centro del área de estudio, con menos de 2 meq/l de  $\text{Na}^+$ . Esta tendencia, muestra que las concentraciones de  $\text{Na}^+$  se mantienen relativamente constantes con el aumento de  $\text{Cl}^-$ . En cambio, en los pozos de P.R  $< 200$  m, ubicados al sur del área de estudio, y en aquellos que tienen mayores valores  $\text{NO}_3^-$  (en círculo naranja), se observa que las concentraciones de  $\text{Na}^+$  aumentan linealmente de 2 a 4 meq/l. El  $\text{K}^+$  (g) presenta una distribución similar, donde también se observan dos tendencias en la disposición de los datos. Una de poca pendiente, compuesta por la mayoría de los pozos de P.R  $> 200$  m, y otra, de un incremento rápido de  $\text{K}^+$ , asociado a los pozos de la parte sur del área de estudio.

El  $\text{NO}_3^-$  (f), muestra una nula correlación con las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  y, las concentraciones son significativamente menores en los pozos que captan agua a mayor profundidad. Por otra parte, en los pozos con P.R  $< 200$  m, se observa que el  $\text{NO}_3^-$  aumenta hasta superar el límite permitido por la NCh N°409 (línea roja). También se observa, que estos últimos tienen la misma tendencia de distribución que el de  $\text{Na}^+$  vs  $\text{Cl}^-$ , lo que podría indicar que, al menos parte de las concentraciones de  $\text{Na}^+$  en dichos pozos podrían tener un origen común.

Finalmente, respecto al gráfico de  $T^\circ$  vs  $\text{Cl}^-$  (h), se observa una leve disminución de la  $T^\circ$  al aumentar las concentraciones de  $\text{Cl}^-$



**Figura 28: Diagramas binarios de cationes y aniones mayores (meq/l), y T° (°C) vs Cl<sup>-</sup>. Línea roja corresponde al límite de la NCh 409 para NO<sub>3</sub><sup>-</sup>**

Para estudiar las diferencias en la hidrogeoquímica, en relación a la profundidad del acuífero, se elaboraron diagramas de C.E. vs P.R, C.E. vs NF, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> vs P.R y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> vs NF (

Figura 29).

Se aprecia una relación entre el  $\text{NO}_3^-$  y la P.R. (a) de los pozos, donde a medida que aumenta la profundidad de la captación disminuye gradualmente el contenido de  $\text{NO}_3^-$ . En (b), se observa que a medida que aumenta la P.R., disminuye la C.E., lo que concuerda con la información mostrada en los perfiles verticales. De todas formas, se aprecia una elevada dispersión en los valores de C.E. en los pozos de mayor profundidad, lo que podría relacionarse a que el agua captada en algunos de los pozos sería una mezcla entre los dos niveles de acuífero. Esto, podría darse debido a que estos niveles no tienen una separación física continua en el espacio, o a distintas condiciones en la construcción de los sondajes, que a su vez, estarían favoreciendo la mezcla de las aguas.

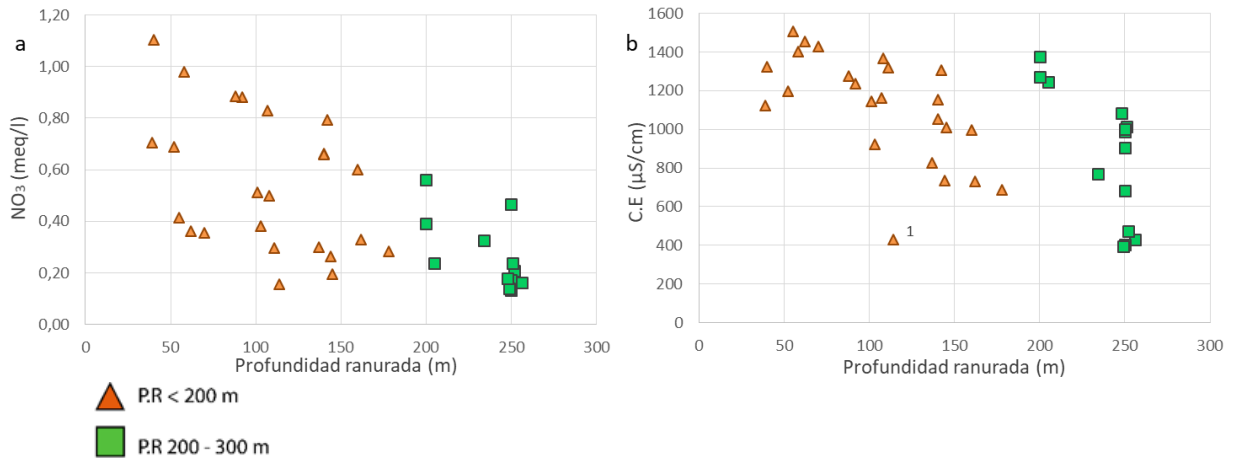


Figura 29: valores  $\text{NO}_3^-$  y C.E., en relación a la P.R. y el nivel estático.

### Diagrama de Gibbs

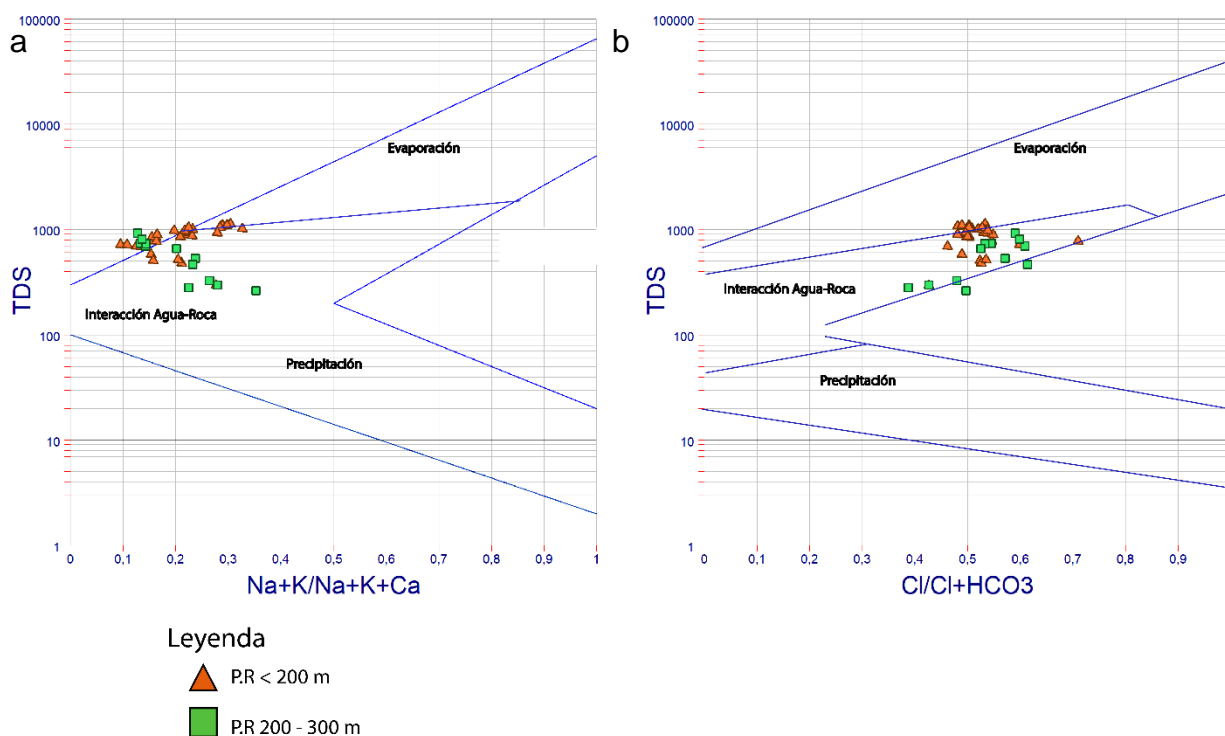
La composición química del agua subterránea puede estar controlada por diferentes procesos o mecanismos fisicoquímicos. Entre éstos pueden darse la evaporación, la interacción agua-roca, y por último, la precipitación/ disolución de sales.

Para determinar los principales procesos fisicoquímicos involucrados en el control de la química del acuífero se han usado los diagramas propuestos por Gibbs (1970).

El primero usa cationes mayoritarios representativos de los miembros extremos, que son  $\text{Ca}^{2+}$  para el agua dulce y  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  para los cuerpos de alta salinidad. En la abscisa se agregan los valores de  $\frac{\text{Na} + \text{K}}{(\text{Na} + \text{K} + \text{Ca})}$ , que simboliza la variación de salinidad en función de los cationes. En la ordenada, se coloca la variación total de la salinidad, es decir, los sólidos totales disueltos (STD). El segundo diagrama muestra la variación de la salinidad mediante aniones mayores, representativos de los miembros extremos, que son  $\text{Cl}^-$  para aguas salinas, y  $\text{HCO}_3^-$  que representa el agua dulce. En la abscisa se coloca la variación de la salinidad de aniones  $\frac{\text{Cl}}{(\text{Cl} + \text{HCO}_3)}$  versus la salinidad total (TDS).

En la Figura 30, se ilustra la proyección de los datos en los dos diagramas de Gibbs. Se observa que en ambos gráficos, los datos caen mayoritariamente dentro del campo de

interacción agua-roca, indicando que es el proceso fisicoquímico principal que controla la química del agua subterránea en el área de estudio. Se aprecia una clara diferencia en la distribución de los pozos según la profundidad del tramo ranurado. Aquellos más someros presentan una mayor concentración de TDS, por lo que se encuentran más cerca del campo de la evaporación, e incluso, algunas muestras se ubican dentro de ese campo. Esas muestras, corresponden a captaciones menos profundas con el nivel freático más superficial (P.R < 100 m) y, que se ubican hacia el sur y poniente. La proximidad al campo de la evaporación de las muestras de origen más superficial indicaría la posibilidad de una infiltración por retorno de riego y/o procesos de infiltración desde la superficie. Esto coincide con la información del perfil vertical de C.E. y con los diagramas de Stiff, en relación a que el nivel de acuífero somero presenta una mayor salinidad.



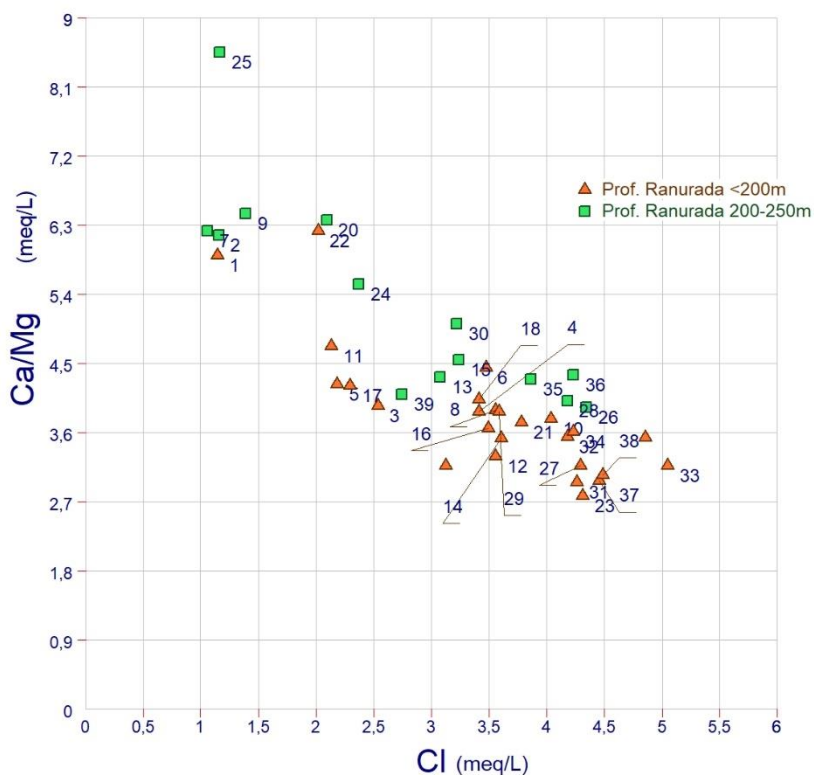
**Figura 30: Diagramas de Gibbs para cationes (a) y aniones (b), que indican el mecanismo controlador de la química de las aguas subterráneas. TDS en ppm, cationes y aniones en meq/l**

Dado que uno de los procesos dominantes es la interacción agua – roca, es oportuno determinar que minerales están involucrados en la interacción con el agua y, si a parte de la disolución/precipitación de minerales es posible diferenciar procesos de intercambio iónico o de absorción/adsorción de iones. Para ello, se realizaron una serie de gráficos binarios y razones iónicas que son de gran utilidad para determinar el origen de la composición de las aguas subterráneas (Manjusree et al., 2009; Yidana et al., 2010; Dehnavi et al., 2011; Nur et al., 2012)

Según Custodio y Llamas (1976), en aguas continentales la relación iónica  $rCa^{2+}/rMg^{2+}$  varía frecuentemente entre 0,6 y 3,5. Y si es mayor a 2, podría estar indicando una alta tasa de meteorización de silicatos y procesos de intercambio iónico. Por otra parte, una razón iónica cercana o igual a 1, podría deberse a disolución de dolomita, mientras que



una razón más alta indicaría una mayor contribución de calcita o yeso (Mayo and Loucks, 1995). En la Figura 31, se observa la razón molar calculada para los datos. Esta presenta valores entre 3 y 8,6 indicando que los silicatos y carbonatos participan en la química del agua pero no la halita. Según Iriarte (2003) y San Juan (2015), el alto contenido de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  presente en el agua superficial (Río Maipo) y subterránea de la cuenca de Santiago, correspondería a la disolución de sales de azufre, asociada a la presencia de yacimientos yesíferos en la Cordillera Principal.



**Figura 31: razón iónica de  $r\text{Ca}^{2+}/r\text{Mg}^{2+}$  vs  $r\text{Cl}^-$ .**

Respecto a la distribución de los datos en el gráfico, se observa que a medida que aumenta el contenido de  $\text{Cl}^-$  disminuye el valor de esta razón. Para estudiar esto, se realiza el mapa de distribución en el área de estudio (Figura 32). En este, se aprecia que los mayores valores de la relación iónica, se encuentran al norte y poniente del mapa, mientras que los menores valores se concentran en la zona sur y al oriente, menos el pozo n°23 que tiene una profundidad del tramo ranurado de 40 m ubicado en la zona poniente. Por lo tanto, en la mayoría de los datos se produce una disminución de esta razón en la dirección preferencial de flujo, indicando la presencia de procesos hidrogeoquímicos que aumentan la concentración de  $\text{Mg}^{2+}$  en comparación al  $\text{Ca}^{2+}$ . En relación a la profundidad de los sondajes, se reconoce que las muestras de mayor profundidad presentan un mayor valor de la relación iónica.

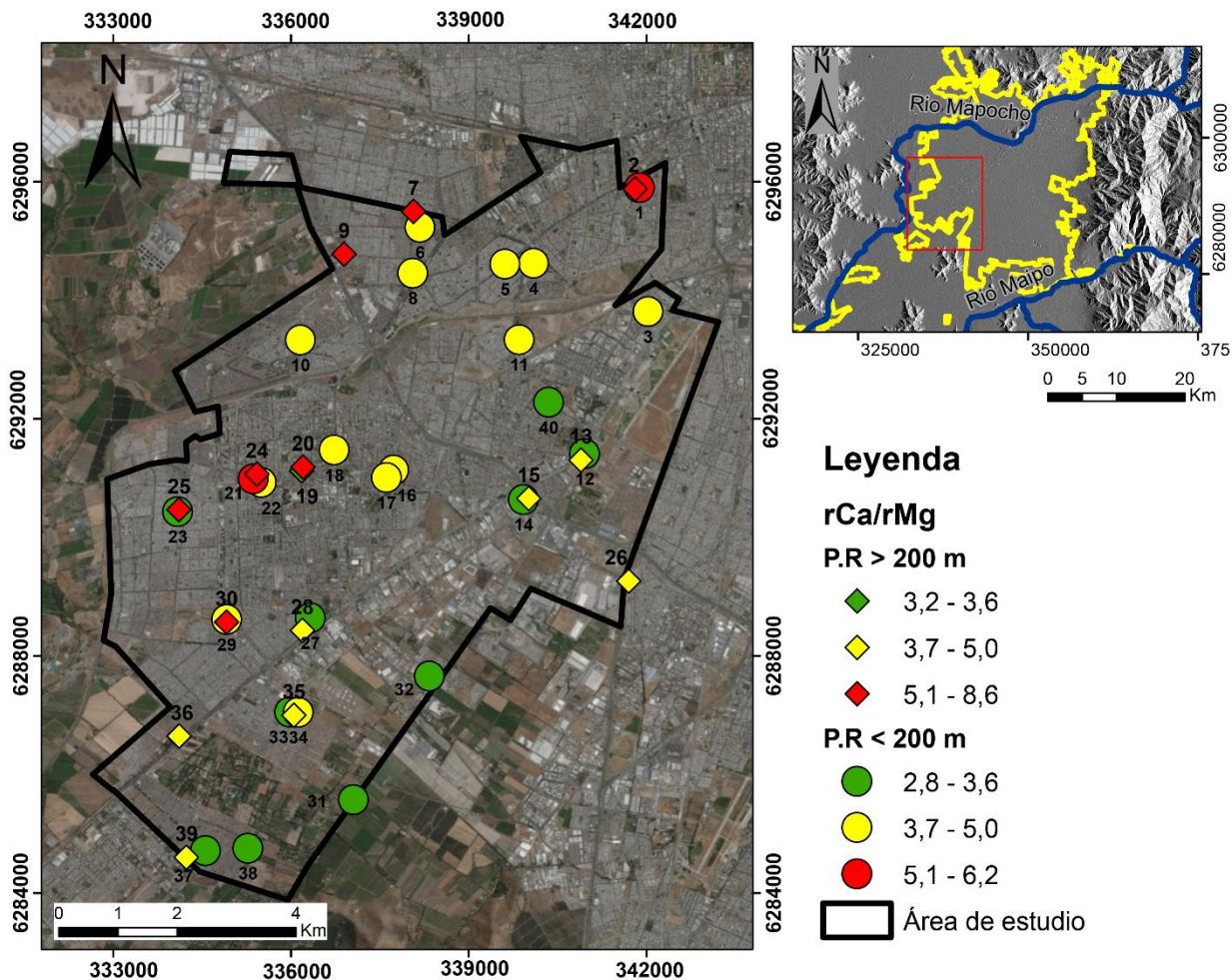
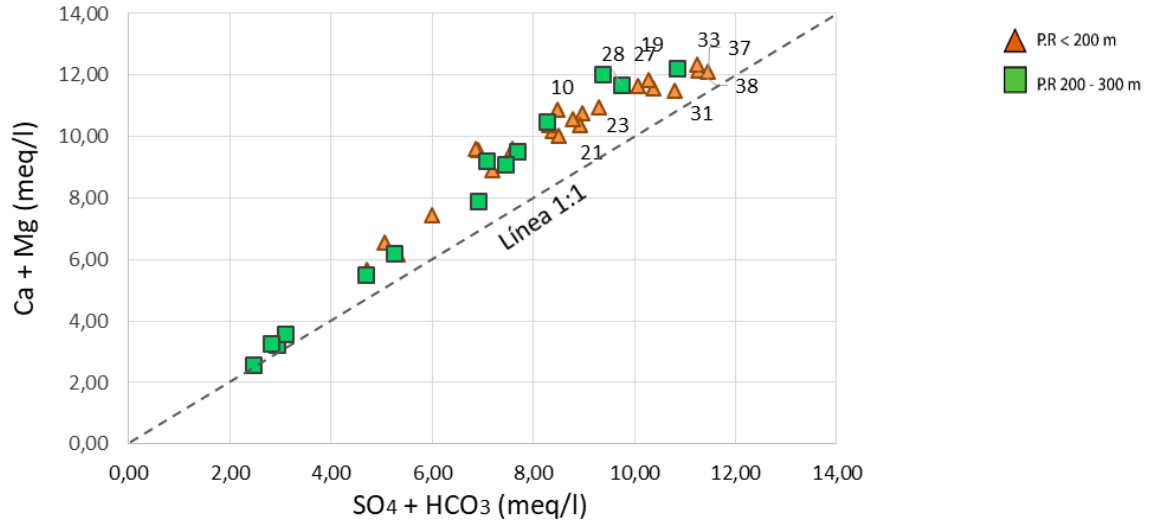


Figura 32: Distribución espacial de  $rCa^{2+}/rMg^{2+}$ . UTM (WGS 84, 19S)

Para evaluar la disolución de carbonatos y yeso en las aguas analizadas, se estudia la relación entre  $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$  vs.  $(HCO_3^- + SO_4^{2-})$ . Los datos que situados en proximidad de la línea equimolar 1:1, indicarían que la disolución de carbonatos y yeso, es un proceso presente en el quimismo de las muestras, mientras que aquellas muestras que se distribuyan hacia la derecha de la línea 1:1, indicarían que la meteorización de silicatos es el proceso dominante (Kumar et al., 2009)

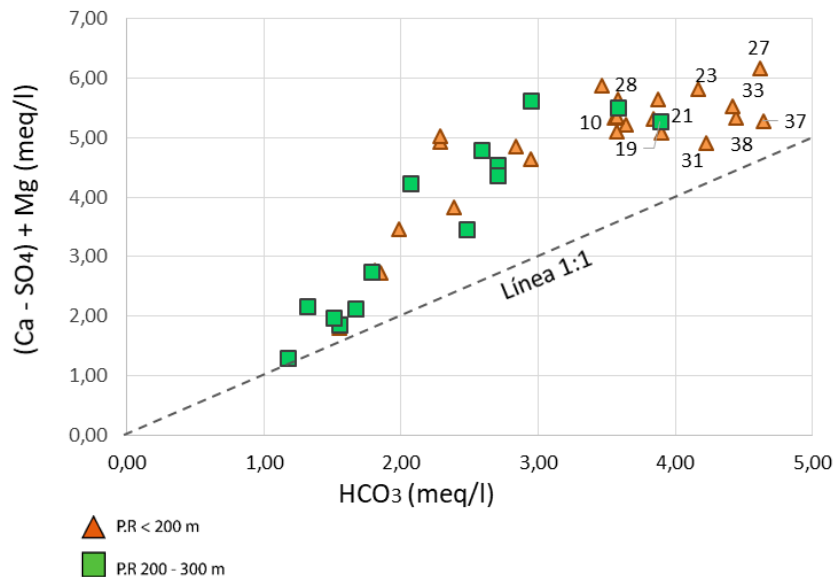
En la Figura 33, se observa las muestras se sitúan cerca de la línea 1:1 pero hacia el lado izquierdo del diagrama, un exceso de Ca y Mg con respecto a la disolución de carbonatos y yeso. Algunos autores (Manjusree et al., 2009; Yidana, 2010; Nur et al., 2012) sugieren que procesos de intercambio iónico pueden aumentar las concentraciones de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ . No obstante se debe recordar que éste puede dar cuenta de concentraciones muy pequeñas y no puede ser considerado un proceso fisicoquímico principal a nivel del acuífero.



**Figura 33: Diagrama de  $(Ca^{2+}+Mg^{2+})$  vs.  $(HCO_3^- + SO_4^{2-})$ .**

En orden de poder identificar si ocurre que litología predomina en la disolución, la

Figura 34 presentan dos diagramas, el primero (A) permite identificar el aporte a la composición química atribuible solamente a carbonatos. En esta, se observa que los datos tienden a alejarse de la línea 1:1, mostrando un exceso de cationes no pueden ser explicados por la disolución de carbonatos ni yeso, por ende, una parte de estos provendría de la meteorización de silicatos e intercambio iónico.

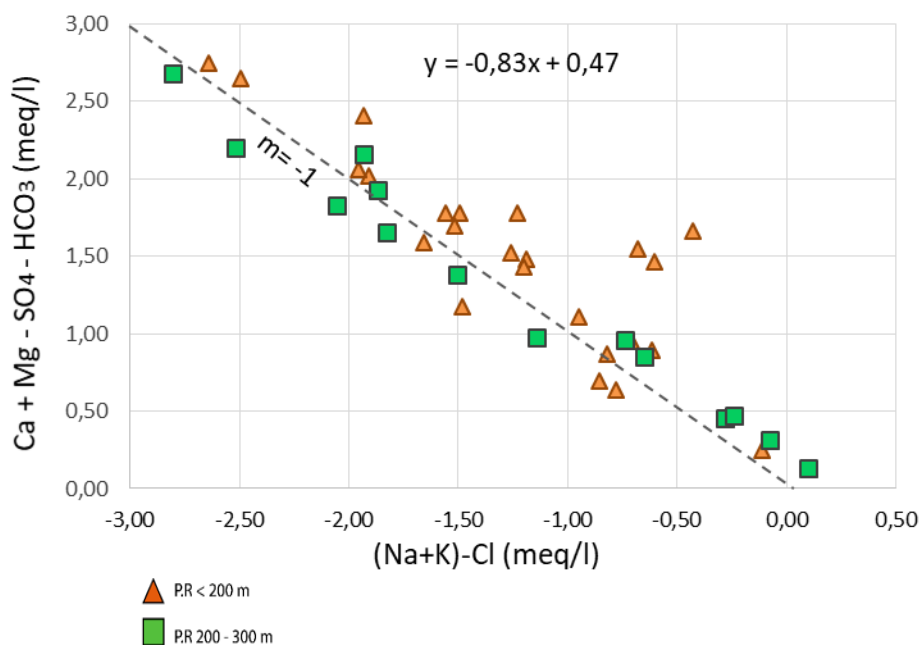


**Figura 34: Diagrama binario que representa la disolución de carbonatos.**

Para reconocer si el intercambio iónico tiene influencia en el área de estudio, Yidana et al. (2010), proponen el gráfico de  $(^-)$  vs.  $(Na^+ + k^+) - Cl^-$  en meq/l. Esta diferencia iónica permite cuantificar las concentraciones de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , por fuentes distintas a las relacionadas con carbonatos y  $Ca^{2+}+Mg^{2+}) - (HCO_3^- - SO_4^{2-})$  yeso. Por su parte, la resta de

$(Na^+ + K^+) - Cl^-$ , proporciona la concentración total de  $K^+$  y  $Na^+$  por fuentes distintas a las respectivas por  $Cl^-$  en el sistema. Si existe intercambio catiónico que involucre  $Na^+$ , con alguno de los cationes mayores en el sistema, se esperaría que los resultados se graficaran como una línea recta con pendiente cercana a -1. En ausencia de estas reacciones en cantidades significativas que influyeran la hidroquímica, todos o la mayoría de los puntos se encontrarían cercanos al origen (Jalali, 2009).

En la Figura 35 se observa que los puntos se disponen en línea recta siguiendo la ecuación  $Y = -0,82x + 0,46$ , con un índice de correlación lineal de 0,54. Viendo esto resulta evidente que el intercambio catiónico es un factor en la hidrogeoquímica del área de estudio.



**Figura 35: Gráfico de dispersión de  $(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(SO_4^{2-}+HCO_3^-)$  versus  $(Na^++K^+)-Cl^-$**

Para estudiar qué tipo de reacciones de intercambio iónico ocurren en el agua subterránea, se utilizan los índices cloro alcalinos (CAI), definidos de la siguiente manera.

$$CAI - 1 = \frac{[Cl - (Na + K)]}{Cl}$$

$$CAI - 2 = \frac{[Cl - (Na + K)]}{(SO_4 + HCO_3 + CO_3 + NO_3)}$$

Si ocurre que  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  pasan de la roca al agua, mientras que  $K^+$  y  $Na^+$  pasan del agua a la roca, entonces se esperaría que ambos índices fueran positivos. Por otro lado, si ambos índices son negativos, es indicador de intercambio catiónico reverso (Yidana et al., 2010).

En la Figura 36, se muestra que todos los datos tienen valores positivos para ambos índices, sugiriendo que ocurre intercambio catiónico normal, es decir, que  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  pasan de la roca al agua subterránea. El intercambio catiónico es factible cuando se

sabe que hay material de intercambio, por ejemplo arcillas presentes en el relleno sedimentario (Yidana et al., 2010). Teniendo en cuenta que el material de relleno corresponde a depósitos sedimentarios erosionados de la cordillera principal, principalmente volcánico (silicatado), Los minerales de arcillas provendrían de la meteorización química estos minerales producto de la interacción con el agua subterránea, junto a depósitos finos asociados a aportes fluviales.

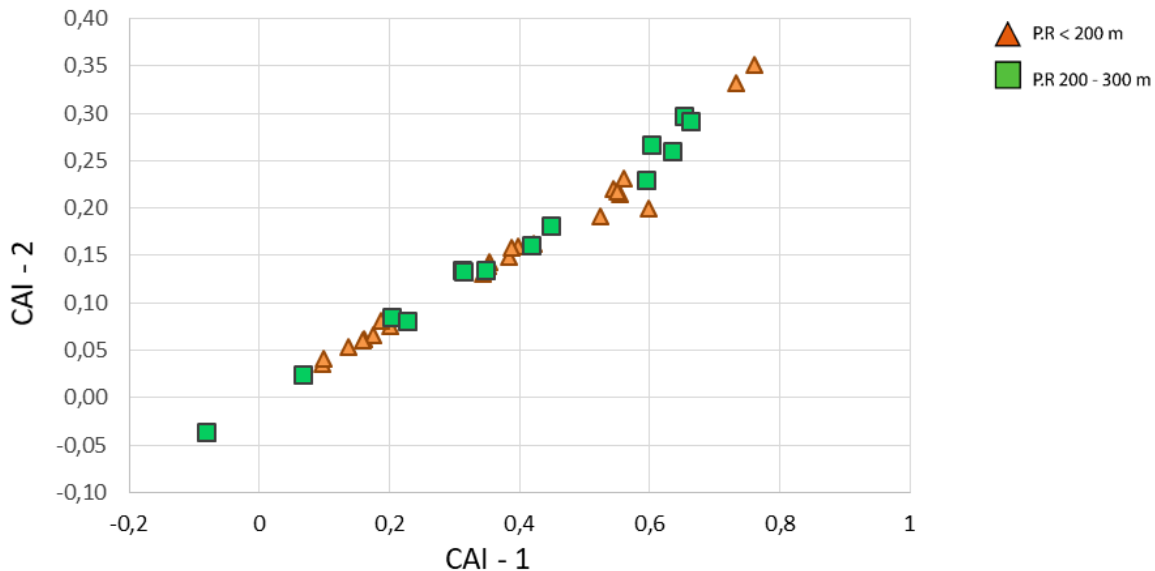


Figura 36: Gráfico de índices cloro alcalinos, CAI I vs CAI II.

Respecto a la razón  $rCl^-/rNa^+$ , Mayback (1987) indica que si el valor de la razón es menor a 1, puede ser interpretado como un exceso de  $Na^+$  respecto al  $Cl^-$  producto de la meteorización de silicatos, o bien, señalar procesos de intercambio iónico. Mientras que valores cercanos a 1, indican procesos de disolución de halita. En la Figura 37, se presenta el gráfico de esta razón en que se observa que casi la totalidad de las muestras presentan valores superiores a 1, lo que descartaría la disolución de halita.

La distribución espacial de esta relación se ilustra en la Figura 38, donde se aprecia que las muestras con P.R mayor a 200 m (verdes) a medida que aumenta el contenido de  $Cl^-$  aumenta el valor de la razón iónica. A excepción de dos puntos (n°26 y n°28) que tienen su tramo ranurado entre los 160 m a 240 m, por lo que el agua captada es una mezcla entre los dos niveles de acuífero. Por su parte, los pozos de P.R < 200 m, tienen dos comportamientos diferentes. Aquellos ubicados en la parte norte y centro el área de estudio, tienen una pauta de distribución de la razón molar similar a las muestras de mayor profundidad. Sin embargo, los pozos ubicados hacia el sur del área de estudio y de menor profundidad (<100 P.R), presentan un valor de la razón molar cercano a 1. Esto, podría estar asociado a que dichas muestras estarían influenciadas por la recarga antrópica asociada a la filtración de la red de agua potable y procesos de evaporación.

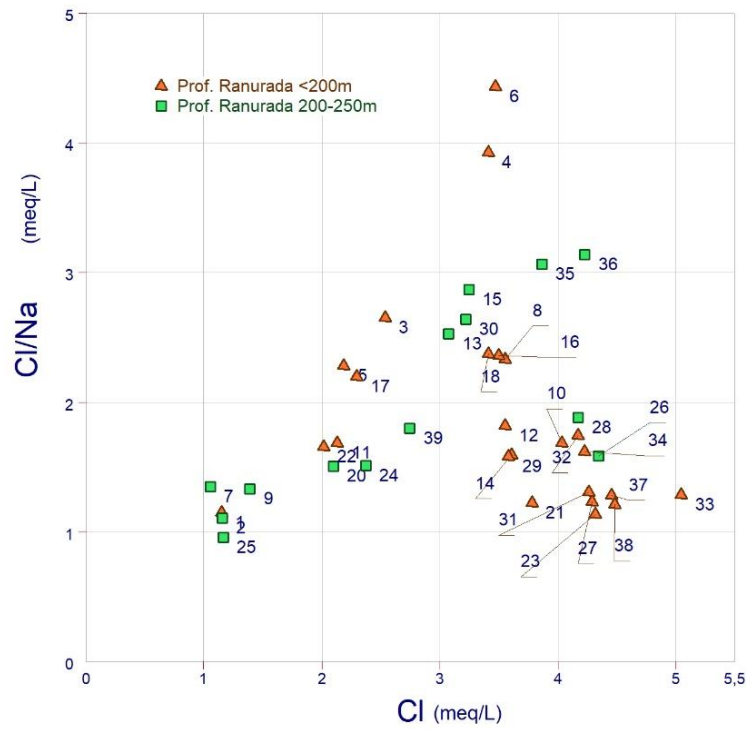


Figura 37 Relación iónica de rCl/Na versus rCl

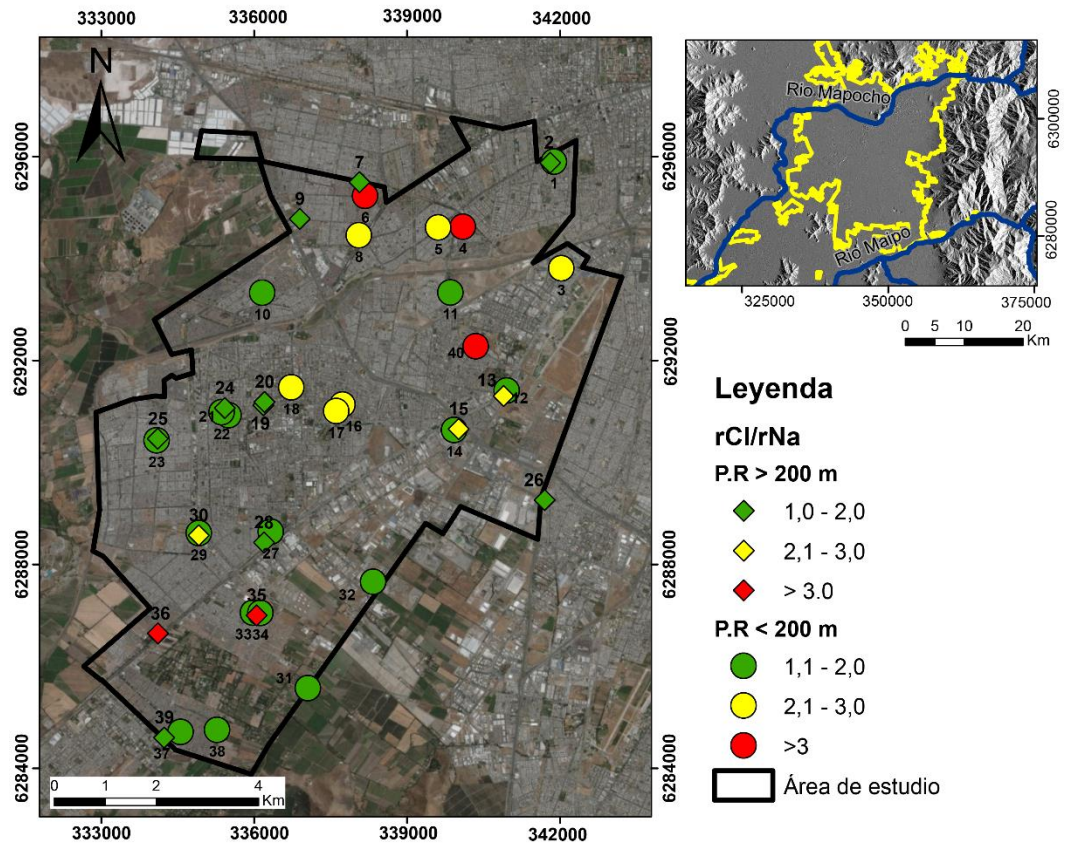


Figura 38: Distribución espacial de rCl/rNa+. UTM (WGS 84, 19S)

### 4.3.3 Distribución de elementos trazas

#### 4.3.3.1 Arsénico (As)

La distribución espacial del arsénico (Figura 39) en relación a la profundidad de los tramos filtrantes de las captaciones muestra que no se reconoce una pauta de distribución ordenada de los datos, pues la mayoría de ellos presentan concentraciones inferiores a 2 ppb, aunque todas se encuentran sobre el límite de detección (0,008 ppb). Sin embargo, se reconoce que las mayores concentraciones se encuentran en los pozos de mayor profundidad, llegando a registrar una concentración de 9,4 µg/l en el pozo 25, rozando el límite fijado por la NCh N°409 (10 µg/l). Se sugiere que las concentraciones encontradas se asocian a un origen natural, debido a que no tienen correlación con las otras variables analizadas, especialmente el  $\text{NO}_3^-$  que es un indicador de procesos antrópicos

A modo de comparación se analizan las concentraciones de As presentadas en San Juan (2015), en pozos y, estaciones de agua superficial repartidas en la cuenca de Santiago el año 2010 (ver anexo C6). En dicho trabajo, los pozos al oriente de la zona de estudio (aguas arriba) presentan bajas o nulas concentraciones de As, salvo un pozo ubicado cercano a la zona de recarga del río Mapocho (límite oriente de la Cuenca de Santiago), por lo que la fuente no provendría de dicha dirección. Por otro lado hacia el norte del área de estudio, en la localidad de Lampa, existen altos valores de arsénico tanto en aguas superficiales como subterráneas que sobrepasan entre 3 a 10 veces el límite permitido por la NCh 409, que atribuyeron a un origen natural relacionado a la presencia de minerales sulfurados como Piritita y Calcopiritita. Teniendo en cuenta la dirección del agua subterránea en la Cuenca de Santiago (Anexo C6), las concentraciones de Arsénico en el área de estudio podrían estar asociados a estos contenidos. Aunque esta es solo una aproximación general al problema, que en realidad necesita ulteriores estudios.

Cabe recordad que de acuerdo a la matriz de correlación realizada para los datos de la presente memoria, el As presenta un alto coeficiente de correlación con Cr y Mo.

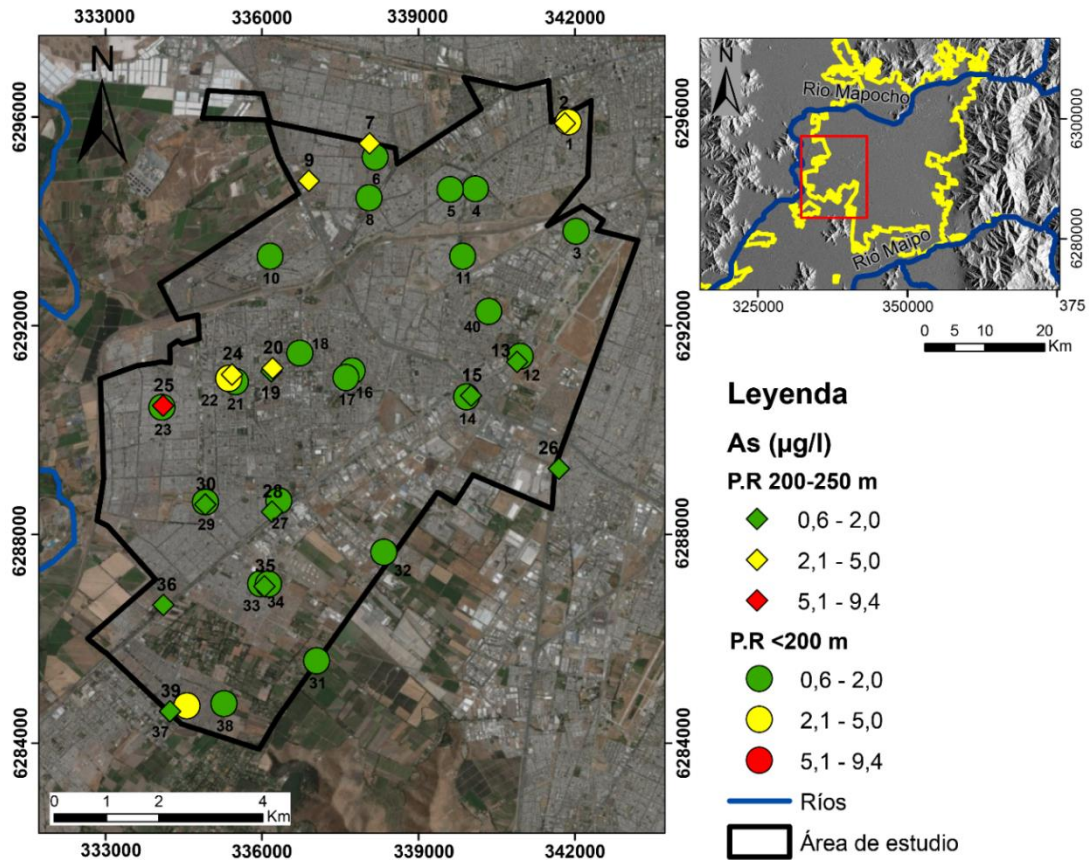


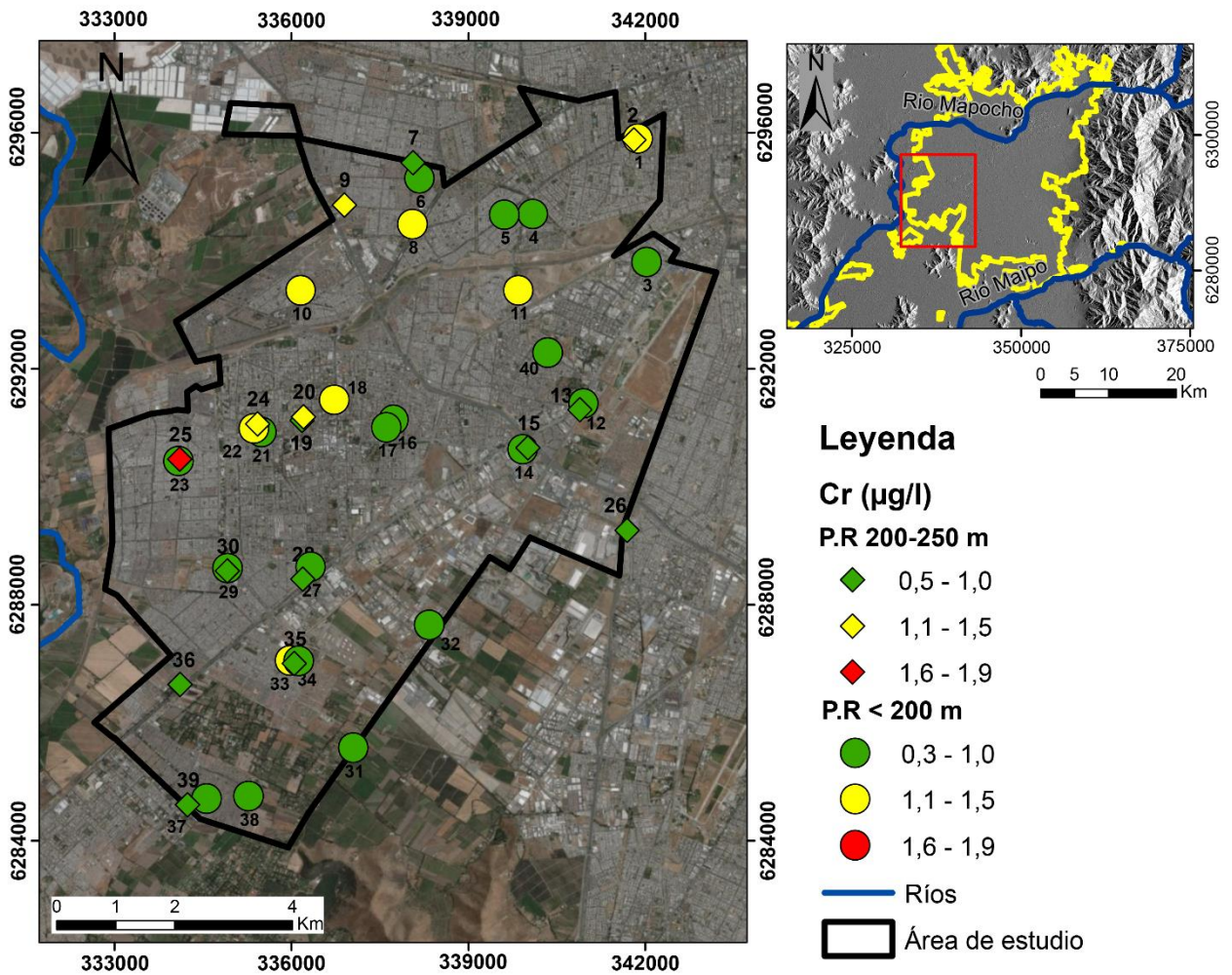
Figura 39: Distribución de As (ppb) distinguiendo entre pozos según la profundidad ranurada. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S).

#### 4.3.3.2 Cromo (Cr)

La distribución de Cr (Figura 40) es similar a la del As. Las concentraciones suelen ser bajas (<1µg/l), en los pozos de P.R. < 200 m, aunque sobre el límite de detección (0,04 ppb), mientras que en los sondajes más profundos se observan concentraciones un poco mayores, cuyo valor máximo es de 2,1 µg/l (nº25) que coincide con el máximo valor de arsénico. Estas concentraciones se encuentran dentro del rango normal en que, rara vez, se superan 2µg/l, por lo que se le atribuye un origen natural (Who, 2003). La NCh N°409, determina una concentración máxima permitida de 50 µg/l, valor que coincide con la concentración recomendada por la Organización Mundial de la Salud. En relación a esto, todas las muestras del área de estudio se encuentran ampliamente bajo la normativa vigente.

Los aportes antrópicos estarían asociados a la manufactura de pinturas y pigmentos, industria de vidrio y metales, y control de la corrosión, por lo que un contenido de Cr elevado reflejaría la extensión y presión de la actividad industrial en los recursos hídricos.





Aparte de los elementos trazas anteriormente descritos, se reconoce la asociación de Sr, Li, que tienen alto coeficiente de correlación entre ellos y con los elementos mayores. En la Figura 41, se muestra la distribución del Sr a modo de ejemplo mientras que los otros elementos se encuentran en el Anexo C. En ésta, se observa que las concentraciones aumentan en la dirección preferencial de las aguas subterráneas (dirección SO) en ambos grupos de pozos, aunque se aprecia una leve diferencia en las concentraciones según la profundidad de los sondajes. Es probable que éstos elementos tengan un origen natural asociado a la interacción agua – roca.

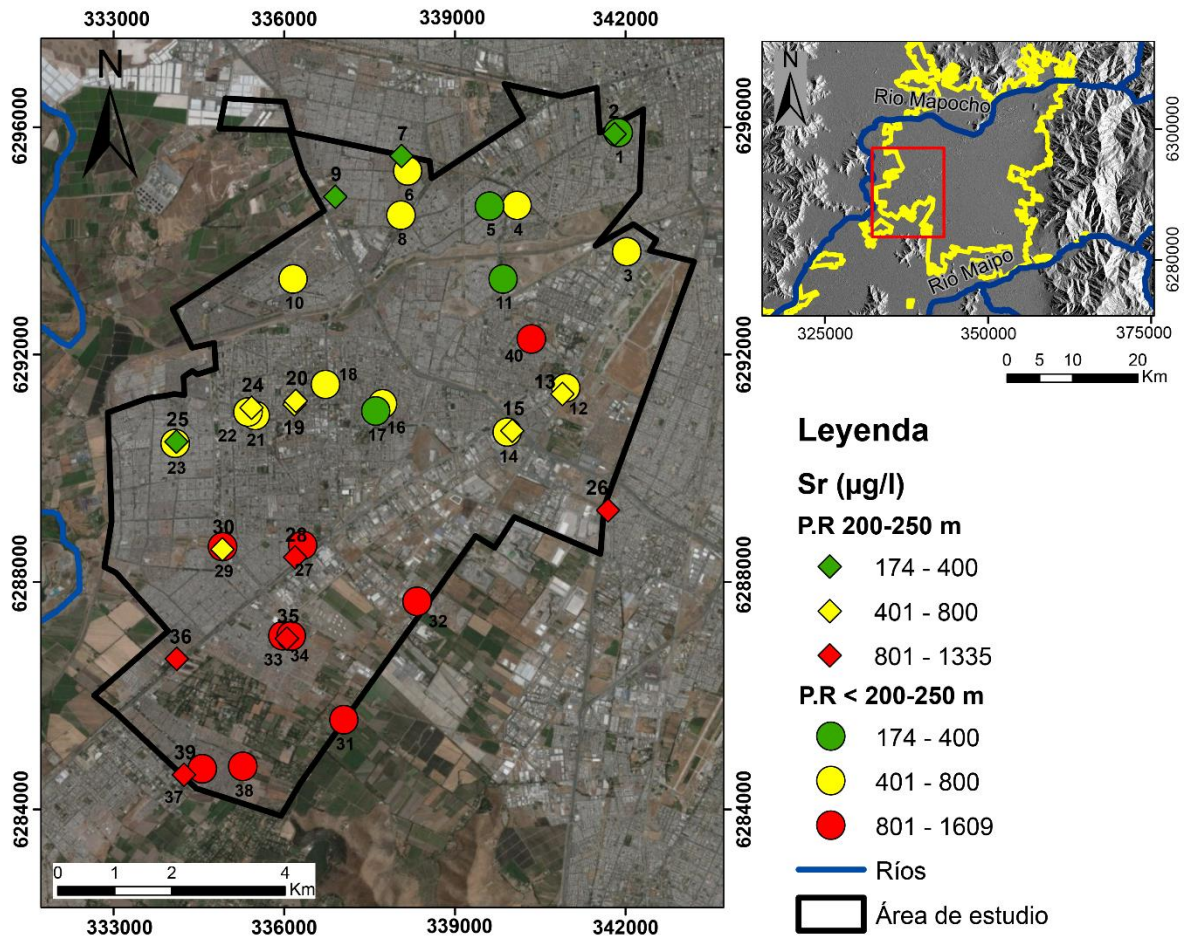


Figura 41: Distribución de Sr (ppb) distinguiendo entre pozos según la profundidad ranurada. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S).

#### 4.3.4 Análisis multivariante

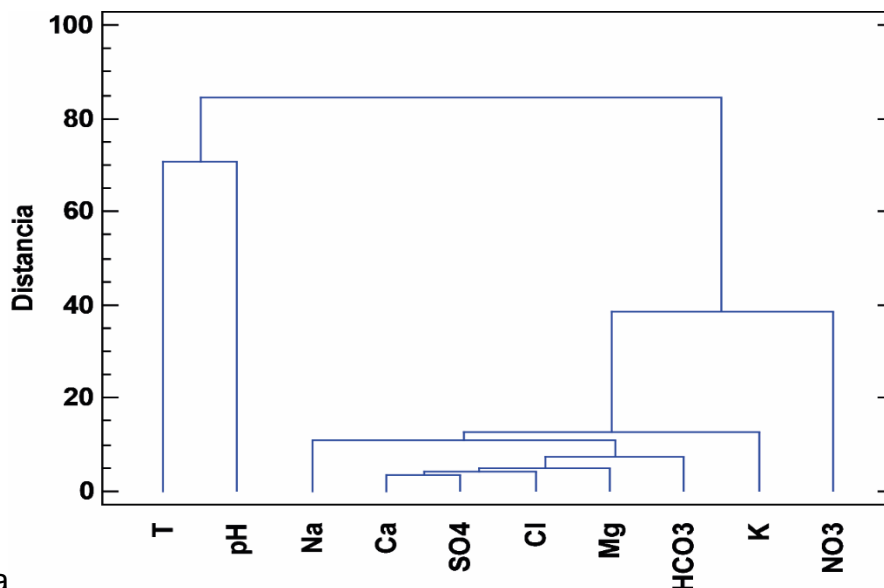
##### 4.3.4.1 Análisis de conglomerados

Es una técnica multivariante, que busca agrupar elementos (variables) tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo, y la mayor diferencia entre los distintos grupos. El dendrograma es la representación gráfica que ayuda a interpretar el resultado de un análisis de conglomerados (Gurrea, 2002). Estos diagramas, se realizan agrupando las variables con respecto a una matriz que representa su grado de similitud calculado, generalmente, en función de los coeficientes de correlación.

Existen diversas técnicas de análisis de conglomerados, pero el análisis jerárquico es el más usado en Ciencias de la Tierra y, en el tratamiento de datos hidrogeoquímicos ya que permite identificar y clasificar grupos, dentro de un conjunto de datos. Dicha clasificación, se basa puramente en la observación visual del dendrograma. (Cloutier et al., 2008).

En este trabajo, con el fin de identificar las diferencias químicas entre los datos usados se han elaborado diferentes dendrogramas considerando todos los datos como un conjunto único. El primer dendrograma considera los elementos mayoritarios, el pH y

T°. En el segundo a las variables anteriores se han agregado algunos elementos trazas. Éstos han sido seleccionados considerando aquellos que tenían todos o la mayoría de sus valores sobre el límite de detección. El último se realiza en modo Q (observaciones), para evaluar la relación entre las distintas muestras y, de esta manera, diferenciar grupos entre ellas. Los dendrogramas fueron realizados utilizando el software Statsgraphics, el método de agrupamiento utilizado ha sido el del vecino más cercano (distancia mínima) y la distancia la euclidiana cuadrada.



En la

Figura 42, se muestra el primer dendrograma donde se observa un grupo que incluye a la mayoría de las variables, en el cuál existe un único núcleo compuesto por  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , con distancia mínima. A estos dos iones, se les va uniendo a medida que aumenta la distancia  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y por último  $\text{NO}_3^-$ . La estrecha relación que se observa entre estas variables nos indica que las concentraciones de estos iones podrían ser debidas a procesos comunes a todas. También se observa que  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , tienen una menor correlación con las otras variables de estudio, y que el  $\text{NO}_3^-$  se une al resto de las variables, a través de  $\text{K}^+$ , por lo que tendría la mayor similitud con este ion. Esto induce a pensar que, al menos parte del  $\text{K}^+$  y del  $\text{Na}^+$  tienen un origen asociado al  $\text{NO}_3^-$ . Un posible proceso podría estar relacionado con la actividad agrícola y el uso de fertilizantes y pesticidas, pues aquellos nitratos de  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^+$  son los fertilizantes más utilizados en la actualidad (INIA, 2010).

Finalmente, un segundo grupo de T° y pH, se une al resto de los datos a una distancia mucho mayor. Esta situación indica que la T° y el pH, no son las variables que direccionan la composición química de las muestras analizadas.

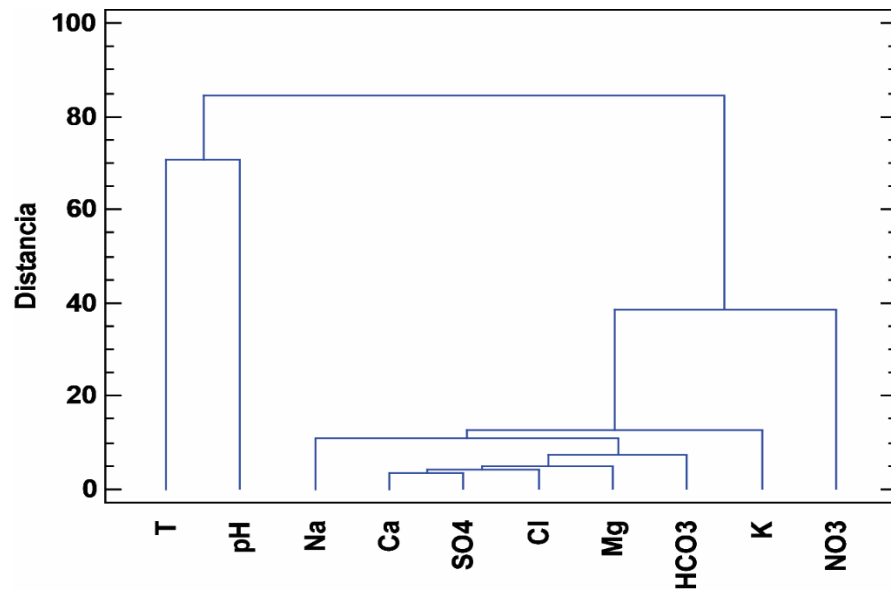


Figura 42: Dendrograma de elementos mayoritarios, T° y pH.

En la Figura 43, se ilustra el segundo dendrograma, que además de los elementos mayores, incluye algunos elementos trazas de interés: Li, Sr, B, Cr y As. En este dendrograma, se observa que Li y Sr forman un grupo, que se relaciona con K<sup>+</sup> y luego con Na<sup>+</sup> antes de unirse al grupo de las variables principales (Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), indicando que las concentraciones de Sr y Li, comparten un origen común con Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>. El boro se une después y le sigue el NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Por su parte el Cr, As, T° y pH forman un grupo aparte, que indicaría que la T° y pH influyen en las concentraciones de As y Cr, que si bien se les atribuye un origen natural, se relacionan al resto de las variables mediante el NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Este hecho, no contradice lo anterior pero pone en evidencia que probablemente, una parte de estos elementos procede desde la superficie.

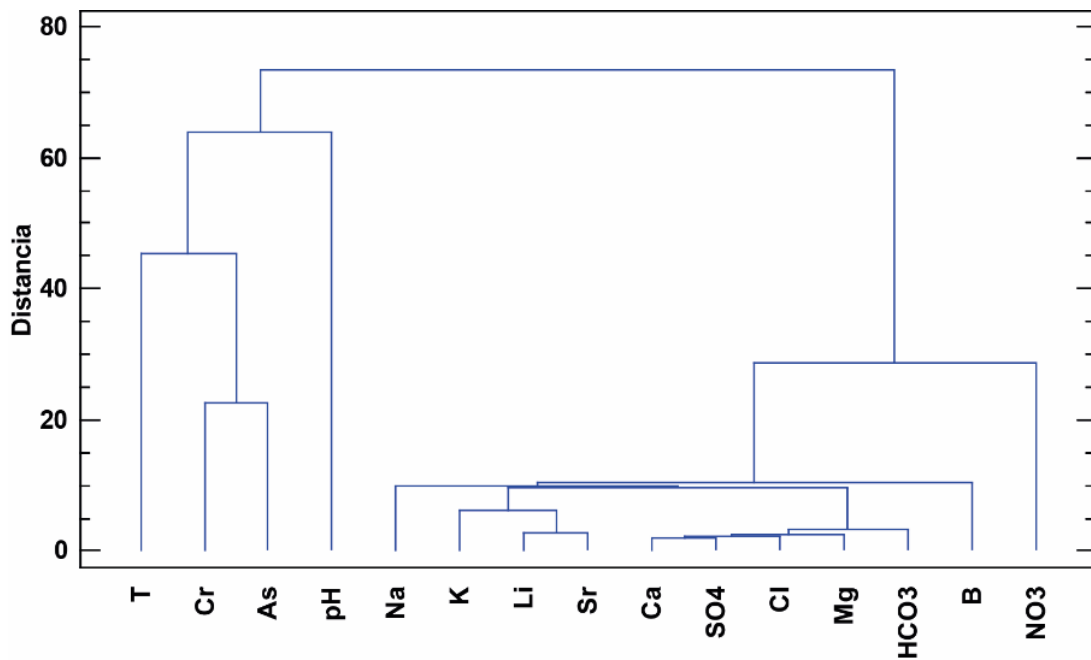


Figura 43: Dendrograma de elementos mayoritarios y trazas.

El último dendrograma, se realiza para identificar relaciones entre las muestras de agua (Figura 44), utilizando las mismas variables utilizadas para construir el dendrograma de la Figura 43. Los pozos de P.R > 200 m, se identifican de color verde en la figura. Se observa que las muestras de ambos grupos no están separadas y se van agrupando evidenciando una estrecha relación entre ellas. Considerando el área de estudio y los principales procesos fisicoquímicos detectados esto nos indica que los dos niveles se parecen y, quizás estén hidráulicamente conectados tanto a través de captaciones que cruzan ambos niveles, tanto por sus características intrínsecas. Es necesario evaluar si el diseño de la habilitación de los pozos de P.R > 200 m, puede estar facilitando la mezcla de aguas superficiales con las más profundas. Al observar el dendrograma, se aprecia un claro grupo aislado conformado por las muestras 1, 2, 7, 9 y 25, que se ubican al norte del área, con poca salinidad y con valores de  $\text{NO}_3^- < 10\text{mg/l}$ . Adicionalmente, las muestras tienden a distribuirse según su ubicación en el espacio, pudiendo reconocer también las muestras de la zona centro y sur. Por otro lado, la muestra n°25 ubicada en la parte poniente del área, se une al resto de las demás variables a una considerable mayor distancia, lo que se asocia a que esta presenta un valor anómalo de As (9,4 ppb) y la mayor concentración de Cr (1,92 ppb), a pesar de ser una de las muestras con menor salinidad en sus aguas.

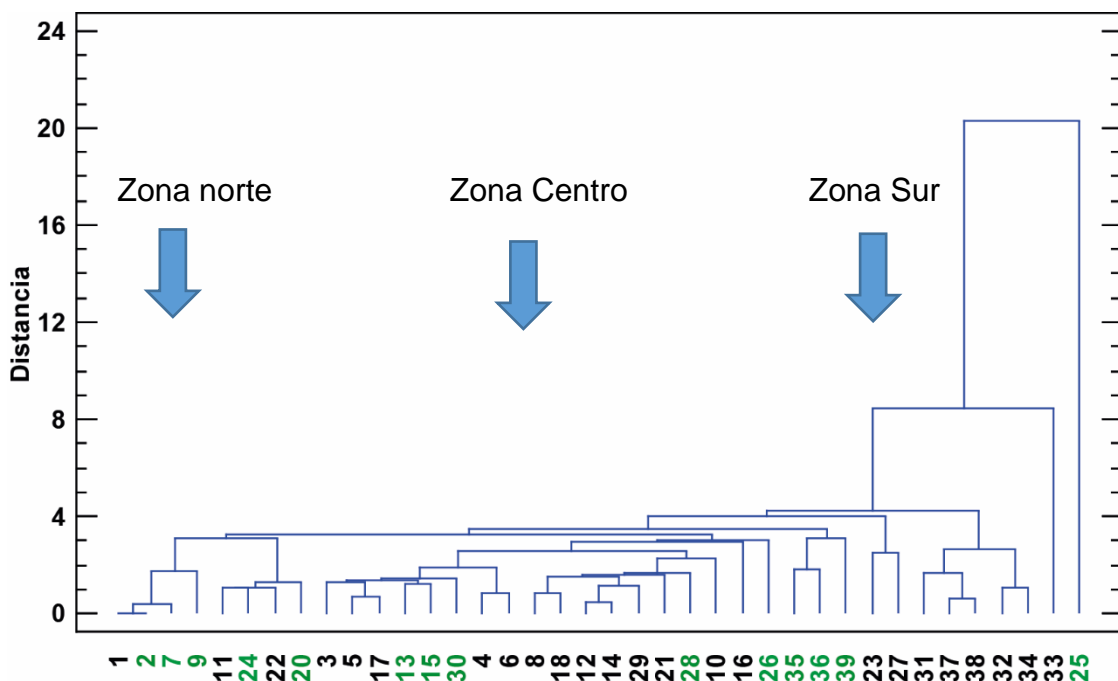


Figura 44: Dendrograma de las muestras del área de estudio. En color verde se identifican las muestras de P.R > 200 m.

#### 4.3.4.2 Análisis de Componentes Principales

Es una técnica de reducción de las variables mediante una combinación lineal de las variables originales. Sirve para reducir las dimensiones de un conjunto de variables, y reconstruirlo en combinaciones lineales que sintetizan el conjunto de datos originales, crean estructuras de interdependencia entre variables cuantitativas, generando nuevas variables que son función lineal de las originales. De acuerdo a Daniele (2007), las

nuevas variables determinan lo esencial de las variables originales y poseen las siguientes propiedades:

- Son ortogonales: cada una representa una dirección del espacio de las variables originales.
- Se escriben como combinaciones lineales de las variables originales, y pueden ordenarse por la magnitud de su varianza.
- El primer componente tiene mayor varianza, y no suelen ser necesarias más que 3 para describir en alto porcentaje la variabilidad de las variables originales.
- Aunque todas las variables originales entran en la composición de cada componente principal, algunas son más importantes que otras. Aquellas son las que determinan la naturaleza de cada componente.

En la Tabla 5, se muestra el resultado de este análisis realizados mediante el software Statsgraphics, para los elementos mayores, en que un 86,39% de la varianza total puede ser explicada a través de 3 componentes principales con valores propios mayores a 1, partiendo originalmente de 15 variables. En la Figura 45, se representa la composición de cada componente principal, en relación a las variables originales.

**Tabla 5: Composición lineal de los componentes principales a partir de las variables originales**

Componente	1	2	3
Mg	0,33	-0,08	-0,04
Cl	0,32	-0,08	-0,02
HCO <sub>3</sub>	0,32	-0,01	-0,13
SO <sub>4</sub>	0,31	-0,08	0,10
Ca	0,30	-0,19	0,03
K	0,28	0,29	0,08
Li	0,28	0,26	0,24
Sr	0,28	0,26	0,24
Na	0,28	0,26	-0,18
B	0,25	0,33	-0,16
NO <sub>3</sub>	0,17	-0,24	-0,52
pH	-0,09	0,08	<b>0,59</b>
As	-0,16	0,47	-0,03
T	-0,17	0,34	-0,13
Cr	-0,18	0,38	-0,40
Varianza	60,19%	15,50%	10,70%

El primer componente, permite explicar el 60,19% de la varianza total de los datos del área de estudio. Se encuentra constituido por los elementos mayoritarios con puntuación positiva, por lo que se interpreta que este CP representa la salinidad o conductividad eléctrica de las aguas. Se observa que el NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, tiene un menor peso en el CP 1 que el resto de los elementos mayores y en la Figura 45, se encuentra separado de los demás elementos, lo que acompañado de los resultados del dendrograma, reafirma que parte importante de su concentración en el agua subterránea obedece a procesos diferentes al resto de los elementos mayores.

El segundo componente explica el 15,5% de la variabilidad de los datos, y está conformado principalmente por As, Cr, y T, lo que reafirma que T juega un papel

importante en las concentraciones de estos dos elementos en las aguas y, que dichos procesos no involucran de manera importante al resto de los elementos mayores, especialmente el  $\text{NO}_3^-$  que tiene una puntuación negativa en este CP. Este signo negativo significa que las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  tendrían una relación inversa con estas variables. Respecto a esto, aquellas muestras con valores negativos de este componente, representarían situaciones de contaminación antrópica relacionada al  $\text{NO}_3^-$

Finalmente, el CP 3 permite explicar el 10,7% de los datos y se encuentra saturado de pH, por lo que estaría explicando principalmente su variación en el espacio.

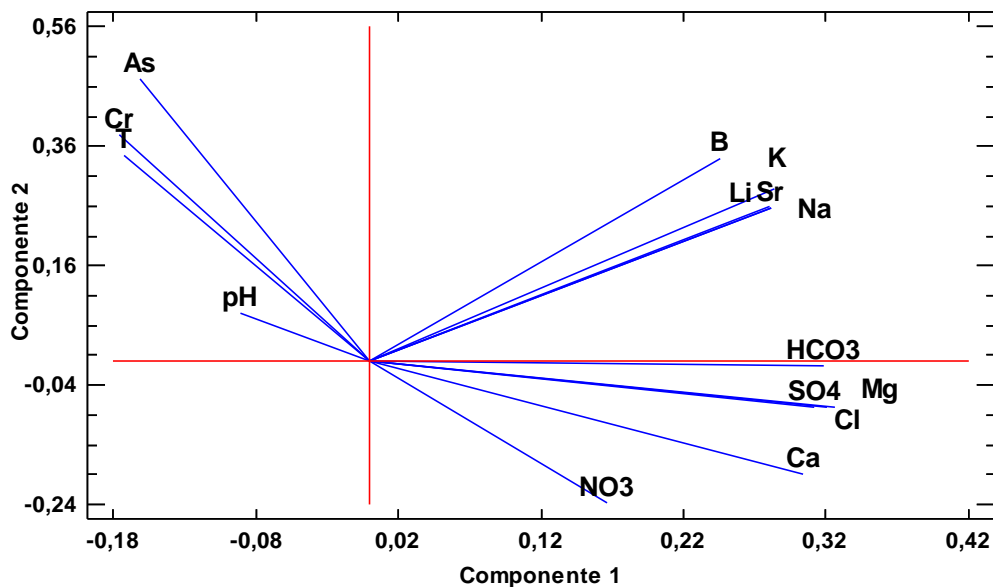


Figura 45: Componentes Principales obtenidos usando los elementos mayoritarios.

## 4.4 Índices de calidad

### 4.4.1.1 TDS

Los Solidos totales disueltos (TDS) permiten tener una buena aproximación de la aceptabilidad del agua de consumo, donde un valor menor a 600 mg/l suele considerarse como buena calidad del agua, mientras que a concentraciones mayores de 1000 mg/l la potabilidad del agua disminuye significativa y progresivamente. En adición, la presencia de altas concentraciones de TDS genera incrustaciones en tuberías, calderas y electrodomésticos, que, a pesar de no significar un riesgo para la salud, si puede convertirse en una problemática desde el punto de vista económico. En el área de estudio los valores de TDS van de 271 mg/l a 1096 mg/l, con un promedio de 735 mg/l

La OMS (2006) no dispone un límite de TDS basado en los efectos sobre la salud, pues no se disponía de datos fiables sobre los posibles efectos negativos. No obstante, recomienda para el agua potable concentraciones no superiores a 1200 mg/l. Por otro lado, también se hace necesario evaluar la calidad del agua en caso que se usen para riego. En este sentido James et al., (1982) propone una clasificación de las aguas subterráneas según la salinidad del agua de riego y por su contenido de TDS (Tabla 6).

**Tabla 6: Clasificación de aguas para riego según salinidad y TDS (James et al., 1982)**

<b>Clase de agua</b>	<b>C.E. (uS/cm)</b>	<b>TDS (mg/l)</b>	<b>Nº de Pozos</b>
Excelente	250	175	0
Buena	250 – 750	175 – 525	9
Permisible	750 – 2000	525 – 1400	31
Uso dudoso	2000 – 3000	1400 – 2100	0
Inapropiada	3000	2100	0

#### 4.4.1.2 Normas chilenas de calidad de agua

Actualmente, se encuentran en vigencia dos normas nacionales para el control de la calidad de agua, una para el control de la calidad del Agua potable (NCh. 409. Of 2005), la que debe ser cumplida por todas las empresas sanitarias del país, y que es fiscalizada por la SISS, y otra norma para regadío (NCh. 1333. Of.78).

La primera establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable suministrada por toda concesionaria que opera en el país. La fiscalización de dicha Norma lo hace la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS). Cabe destacar que no se exige el cumplimiento de esta norma para fuentes de agua potable rural. Los parámetros para definir los requisitos de calidad se han agrupado en los tipos siguientes:

<b>Tipo I</b>	Parámetros microbiológicos y de turbiedad
<b>Tipo II</b>	Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud
<b>Tipo III</b>	Elementos radiactivos
<b>Tipo IV</b>	Parámetros relativos a las características organolépticas
<b>Tipo V</b>	Parámetros de desinfección

Dado el enfoque del estudio, se hizo un análisis de elementos químicos de los tipos II y IV de la Norma Chilena, analizándose otros elementos y compuestos que no se encuentran en la norma. En la Tabla 7, se muestran los parámetros que fueron analizados en este trabajo junto con el límite de concentración máximo permitido para el agua potable. El único parámetro que sobrepasa el límite máximo permitido es el  $\text{NO}_3^-$ .

La distribución espacial de los pozos que presentan concentraciones próximas al valor límite (40-50 mg/l) y, de aquellos por sobre la norma se aprecia en la Figura 46. En esta, se observa que en general las altas concentraciones se concentran en las zonas donde el nivel freático es más somero (sector poniente del área de estudio), salvo dos pozos ubicados en la zona del cordón industrial de la comuna de Maipú (nº12 y 14), que tienen un NE de 76,5 m y 69 m respectivamente. En relación a la calidad del agua, el



mayor problema es la alta concentración de NO<sub>3</sub> en el área de producción del SMAPA, donde 6 de las 40 puntos muestreados se encuentran fuera de norma, que corresponde al 15% del total y, que el promedio es 30,5 mg/l.

Tabla 7: Norma 409/1 Of.2005

Parámetro	pH	TDS	Mg	Cl	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Cr	Fe	Mn	Cu	Zn	As	Pb
Unidades	mg / l												
Límite máximo	6,8 - 8,5	1500	125	400	500	50	0,05	0,3	0,1	2	3	0,01	0,5

La Norma Ch1333 Of. 78 (NCh N°1333), modificada en 1987, fija un criterio de calidad del agua de acuerdo a requerimientos científicos referidos a aspectos físicos, químicos y biológicos con el objetivo de proteger y preservar la calidad de las aguas que se destinen a diferentes usos.

En particular, se hace referencia a los requisitos del agua para uso de riego. En la Tabla 8, se presentan los parámetros y el límite máximo de aceptación en mg/l. En relación a lo anterior, solamente el SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> se encuentra en concentraciones que sobrepasan el límite especificado por la norma (250 mg/l). En la Figura 47, se muestran estos casos y su relación con la cota hidráulica

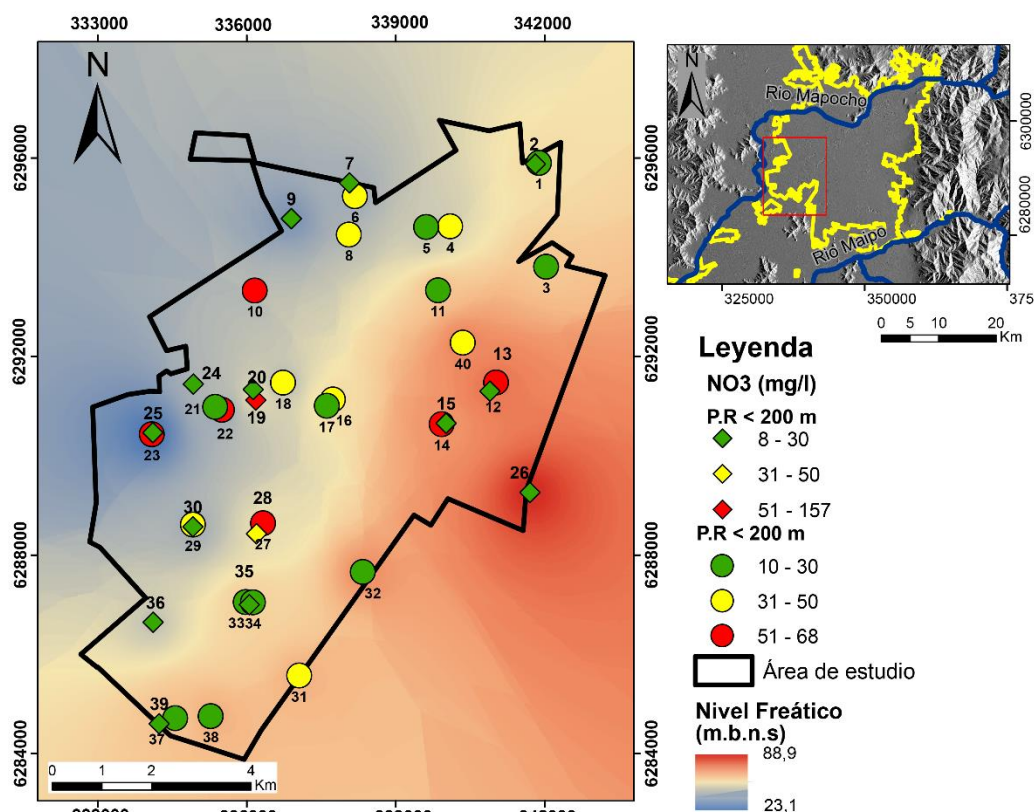
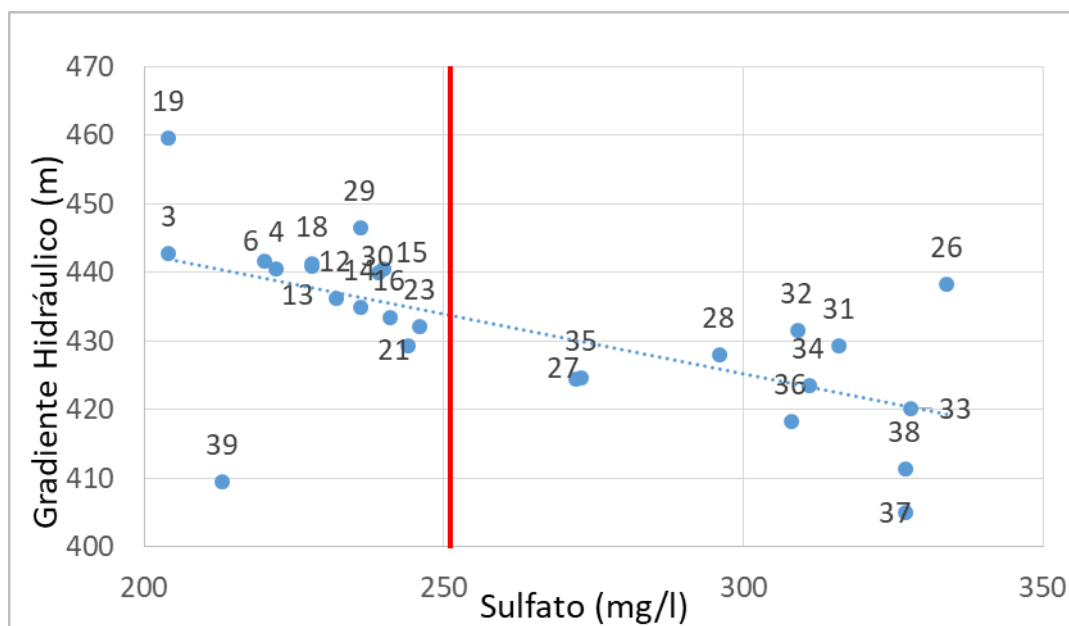


Figura 46: Concentraciones de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> cerca y por sobre el límite permitido por la Norma Chile 409/1 de calidad de agua potable y su relación con el nivel freático. UTM (WGS 84, 19S).

Las muestras que sobrepasan este límite, son la n°26, 27, 28, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 y 38, que corresponden a 12 de los 40 pozos muestreados, es decir, un 30% del total. La distribución espacial de estos pozos se muestra en la Figura 48, donde se observa claramente que los pozos fuera de norma se ubican en la parte sur del área de estudio, de modo que la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$ , aumenta en el sentido de dirección de flujo del agua subterránea, por lo que se infiere que sus concentraciones estarían asociadas a procesos naturales de interacción agua – roca y, de acuerdo a Iriarte (2003), una parte podría ser producto de filtraciones de la red de agua potable. Algunos de los puntos, como el n°10 por su posición y concentraciones, es posible que algunos de los procesos mencionados adquieran una importancia diferente, que no es la del acuífero, es decir, que la muestra n°10 estaría afectada por contaminación.

**Tabla 8: Parámetros evaluados en Norma 1333 Of. 78 y su concentración máxima**

Parámetro	pH	Al	As	Ba	B	Cd	Cl	Co	Cu	Cr	Fe	Li	Mn	Mo	Ni	Ag	Pb	SO <sub>4</sub>	Zn
Límite (mg/l)	5,5 - 9	5	0,1	4	0,75	0,01	200	0,05	0,2	0,1	5	2,5	0,2	0,01	0,2	0,2	5	250	2



**Figura 47: Muestras con  $\text{SO}_4^{2-}$  cerca y sobre el límite permitido por la Norma Chilena de Riego, y su relación con la cota hidráulica**

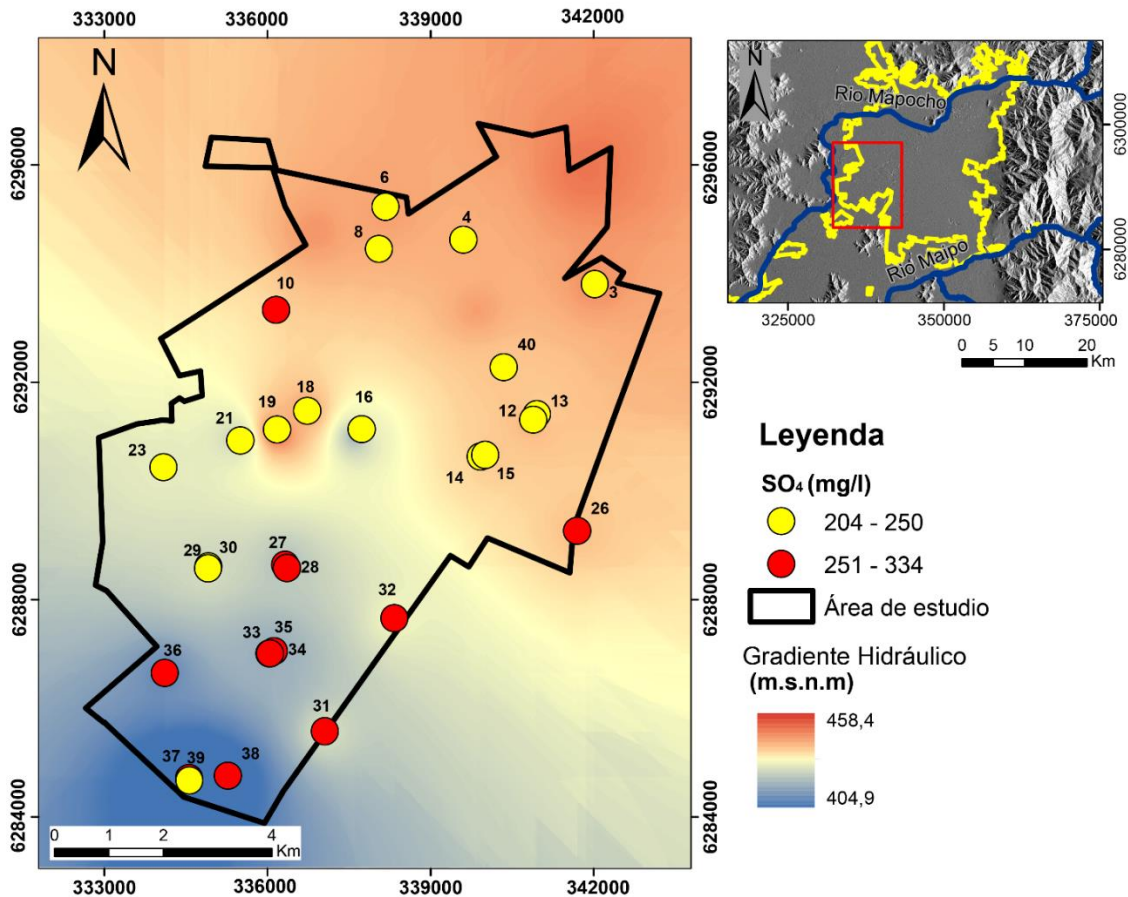


Figura 48: Distribución espacial de las muestras que se encuentran cerca y sobre el límite establecido por la norma Chilena de riego. Sistema de coordenadas UTM (WGS 84, 19S)

#### 4.4.2 Relación diseño de sondajes y calidad de agua

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, un posible factor de la calidad de agua, estaría asociado al diseño de construcción del pozo, en relación a la profundidad del sistema captante (tubería ranurada), a la distribución del empaque de grava y a la aplicación de un sello o cementación entre las paredes del pozo y la tubería de habilitación, por sobre el nivel de acuífero que se desea explotar. Los sondajes en el área de estudio son perforados en diámetros de 24" y 26", mientras que la habilitación se realiza en 16" o 14" de cañería de acero al carbono "ciega", y cañería de acero al carbono ranurada, de 12" a 14". Esto suele ser común para todos los pozos de SMAPA. Sin embargo, se detectaron diferencias importantes en el engravillado de cada pozo.

En la Figura 49, se observa el diseño de la habilitación de 3 pozos del área de estudio (N°9, 13 y 19), que se realizaron de acuerdo a los informes de construcción de pozos realizados por la empresa ANDINOR. Además, se incluyeron las concentraciones de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, medidas en este trabajo para dichos pozos, y la línea azul punteada representa la separación entre los dos posibles niveles de acuífero.

El pozo 9, tiene 300 m de profundidad y, con sistema captante entre los 200 y 300 m. El engravillado se realiza desde el fondo del pozo hasta 10 m sobre el fin de la tubería ranurada, es decir, hasta los 190 m. A partir de esta profundidad se aplica un sello de concreto en el espacio anular hasta la superficie para evitar la entrada de agua de los niveles más superficiales del acuífero. Y asegurar el ingreso de agua al pozo bajo los 200 m de profundidad. Lo que debería ser favorecido también por la presencia de una sección de alto contenido de arcillas a los 180-200 m como fue reconocido en las columnas estratigráficas. El resultado es que el agua extraída de este pozo tiene un contenido de  $\text{NO}_3^-$  de 12,9 mg/l, que se relacionaría a los valores naturales de este parámetro en el área de estudio.

El pozo 13 tiene la misma profundidad y ubicación de la tubería ranurada que el pozo 9. No obstante, en este sondaje, el engravillado se realizó desde el fondo del pozo hasta la superficie. Lo anterior, permite que se produzcan flujos descendentes de agua desde niveles superiores del acuífero, a través del empaque de grava, conectando ambos niveles de acuífero. Como resultado de lo anterior, este pozo tendrá una mezcla de aguas, que se traduce en una mayor salinidad y una vulnerabilidad a la contaminación.

Por último el pozo 19, tiene 231 m de profundidad, y ubica su sistema captante entre los 170 y 231 m. Este último es realizado en diferentes diámetros de 12", 10", 8" y 6", como se ve en la Figura 49. Esto, provoca que el mayor flujo de agua de entrada al pozo, ocurra en la sección de mayor diámetro de tubería que se encuentra en los niveles más superficiales del acuífero (sobre los 200 m) pudiendo producirse procesos de mezcla con las aguas más superficiales. A su vez, el engravillado se realiza hasta los 40 m de profundidad, lo que facilitaría el flujo descendente de agua a través del empaque de grava. Por lo tanto, a pesar de ser un pozo de profundidad mayor a 200 m, su química se encuentra influenciada principalmente por el nivel más somero del acuífero, que presenta menor calidad de agua en relación a  $\text{NO}_3^-$ , provocando que en este pozo, las concentraciones sean de 157 mg/l. El caso de este pozo es análogo al de los pozos 26, 28 y 36, pues todos estos captan agua de los 2 posibles niveles de acuífero.

En vista de los antecedentes expuestos, es posible aseverar que la calidad de agua del pozo, se encuentra fuertemente influenciada por el diseño de la habilitación. Especialmente asociado a la presencia de un sello de concreto que impida el ingreso de niveles más someros del acuífero al pozo. Por otro lado, teniendo en cuenta que las concentraciones  $\text{NO}_3^-$ , son significativamente menores bajo los 200 m, es fundamental que para velar por mantener bajas las concentraciones de este parámetro, la tubería ranurada se ubique a partir de esta profundidad, de modo que se explote mayoritariamente este nivel acuífero que, de acuerdo a los datos de este trabajo, tendría una concentración de  $\text{NO}_3^-$  en promedio de 10 mg/l. Dado que aparentemente estos dos niveles no se encuentran aislados de manera continua, si se explota intensamente el nivel inferior aumenta la posibilidad de recibir aportes de agua de menor profundidad, debido a esto se debe estudiar cuál es el caudal de explotación adecuado que permita que el agua captada sea la de mayor profundidad.

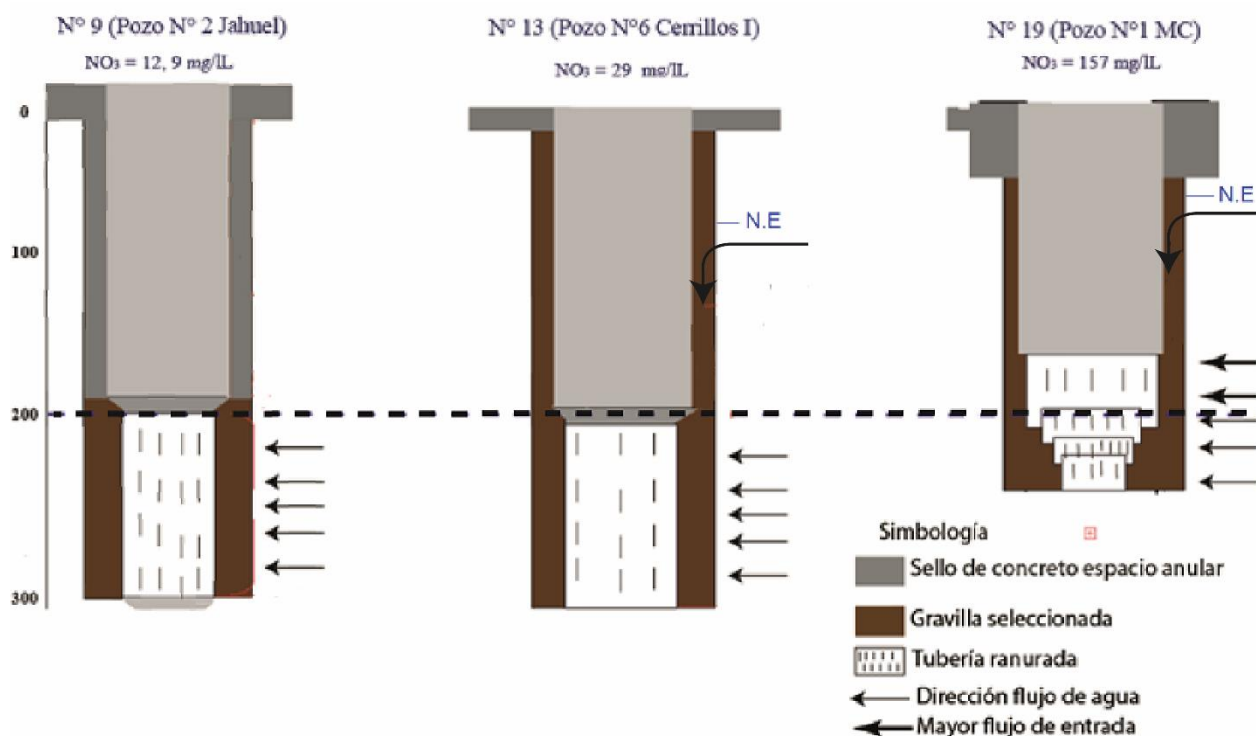


Figura 49: Habilitación de pozos y su relación el flujo de agua entrante. La línea punteada marcaría el límite entre los dos niveles de acuífero.

## 4.5 Focos potenciales de contaminación

Se ha identificado que las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ , estarían influenciadas por aportes antrópicos al acuífero, y que las mayores concentraciones se relacionan con los pozos de menor profundidad. No obstante, la ubicación geográfica también representa una variable importante a la hora de estudiar la distribución en las concentraciones del  $\text{NO}_3^-$ . En Figura 50, se muestra la distribución del  $\text{NO}_3^-$  y su relación con la demografía del área de estudio, donde se ve que las concentraciones más altas se encuentran en la zona poniente y centro del mapa. Estos sectores, corresponden a los más antiguos de las comunas de Maipú y Cerrillos, y que además concentran la mayor densidad de población. Se da así que la mayor descarga de desechos domésticos al alcantarillado, a las matrices de recolección de aguas servidas de más antigüedad (más vulnerables), por lo que es probable que la fuga de este tipo de desechos, asociado una o más filtraciones, podría ser un importante foco de contaminación de  $\text{NO}_3^-$ . De hecho, esto se considera uno de los principales focos de contaminación en el acuífero de Santiago Norte (Iriarte, 2003). El problema de los  $\text{NO}_3^-$  en agua es un problema de dimensiones mundiales afectando a muchos países. Por ejemplo en Alemania se ha estimado que se infiltran más  $100 \text{ Mm}^3/\text{año}$  de aguas servidas debido a sistemas de alcantarillado dañadas, y, en Jordania también se identifica ese foco de contaminación (Yang et al., 1999; Wakida y Lerner, 2005; Obeidat et al., 2007). Lo anterior concuerda con las observaciones realizadas Falcón y Matutano (2000) que ya habían identificado que las concentraciones  $\text{NO}_3^-$ , se relacionaban a las zonas más pobladas de Maipú y Cerrillos, en comparación con aquellos pozos ubicados sobre zonas con actividad agrícola. Se observan dos puntos de color rojo (nº14 y 27) que no se encuentran en la zona de

máxima densidad, pero que están ubicados en el sector industrial, por lo que sus concentraciones podrían asociarse a estas actividades.

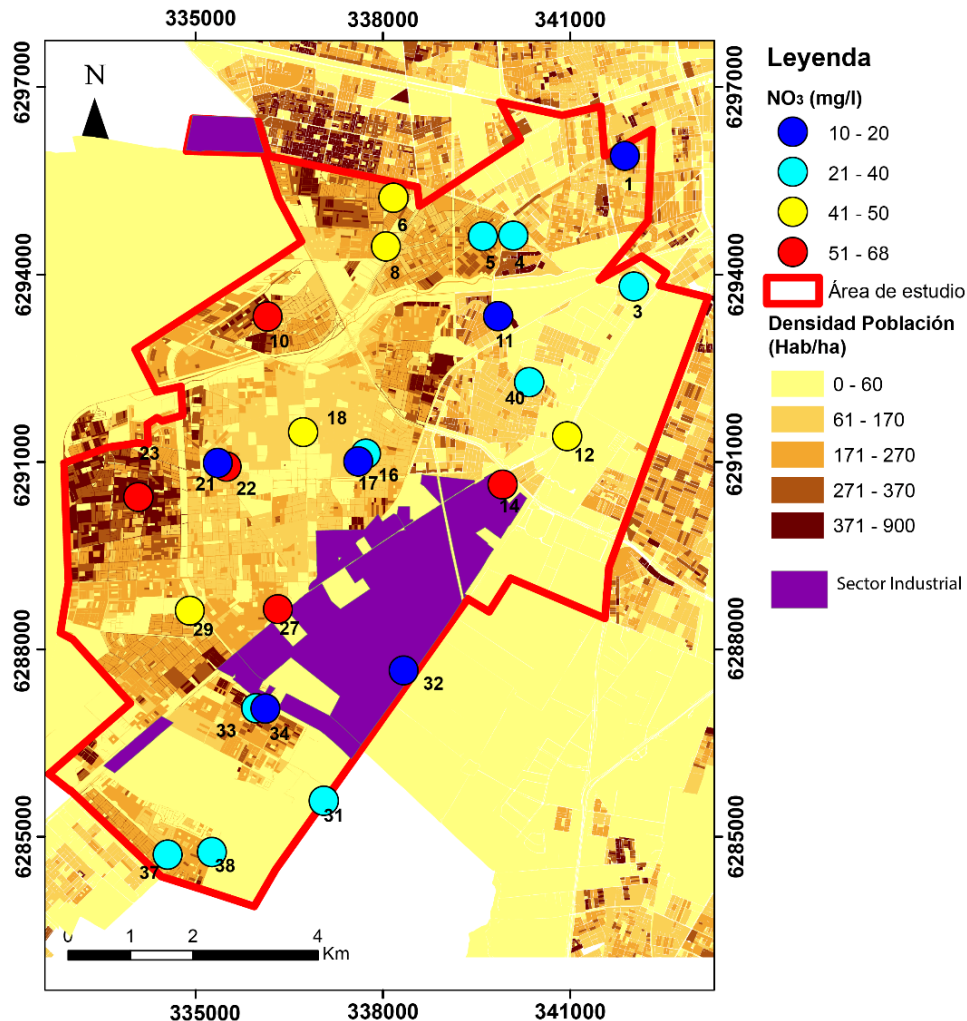


Figura 50: Densidad de Población (Hab/ha) y contenido de  $\text{NO}_3^-$ . Densidad basada en información del Censo 2012. UTM (WGS 84, 19S)

Por otra parte, hacia el sur se encuentran las zonas con mayor desarrollo de actividades agrícolas, pero en esta zona se reconocen las menores concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ , incluso en los pozos de menor profundidad, lo que indicaría que estas actividades no son una fuente importante de contaminación en dicha zona. Adicionalmente, dado que estos pozos tienen la menor cota hidráulica del área de estudio (agua subterránea se mueve hacia esa dirección), significaría que en el área de estudio existirían fuentes de recarga que estarían diluyendo las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  hacia el sur. No puede descartarse que ocurra una recarga, asociada a las filtraciones de las redes de distribución de agua potable y al retorno del agua de riego, que provocaría la dilución de las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en la dirección de flujo del agua subterránea (SW). Sin embargo, ocurre el efecto contrario con la salinidad, tal como se mostró en el diagrama de Gibbs, puesto que esta fuente de recarga estaría siendo influenciada por procesos de evaporación, que se deben, a que las filtraciones de agua potable ocurren a menos de 2 m de profundidad.

Adicionalmente, hacia el norte del área de estudio, se ubican dos cementerios (Parque el Manantial y Parque del Sendero) a menos de 2 km, hacia el norte, del pozo 10. Respecto a esto, Iriarte (2003) identifica que la contaminación por  $\text{NO}_3^-$  puede provocarse debido a la descomposición de cuerpos sepultados bajo tierra que producto el riego de las áreas verdes, se genera la lixiviación de contaminantes orgánicos a las napas subterráneas. Esta posibilidad aumenta en el caso de cementerios tipo parque (como los de la zona de estudio), que no cuentan con mausoleos que servirían para evitar la interacción de los cuerpos con el medio. Żychowski (2012), estudia el impacto del emplazamiento de cementerios y tumbas masivas cercanos a acuíferos en explotación, en varios países como Inglaterra, Australia, Estados Unidos, Polonia, Brasil, indicando que en todos los casos los cementerios afectan adversamente la calidad del agua en relación al contenido de  $\text{NO}_3$ , encontrándose valores superiores a los 60 mg/l en algunos pozos cercanos a cementerios. Por otra parte, se encuentra ubicada a poco más de un kilómetro al poniente de ambos cementerios, la planta de tratamiento de aguas servidas de La Farfana, que también podría ser un potencial fuente de contaminación de  $\text{NO}_3$  (Obeidat et al., 2007; Giuliano y Blarasin, 2014; Wakida y Lerner, 2015).

La Figura 51, muestra un mapa de cobertura de suelo, que se refiere a las coberturas biológicas o físicas presentes sobre la superficie de la tierra. Para este estudio, se clasifica la cobertura de suelo según el esquema propuesto por Hernández et al., (2016) y Zhao et al., (2016), utilizando las 10 clases del nivel 1, diferenciando según corresponda a bosques, cuerpos de agua, cultivos, hielo y nieves, humedales, matorrales, nubes, pastizales, superficies impermeables y tierras desnudas. Adicionalmente en la misma figura se ilustran posibles fuentes de contaminación puntual que corresponden a los cementerios Parque del Sendero, Parque Manantial, y Canaán; sectores Industriales y la planta de tratamiento de aguas servidas de La Farfana.

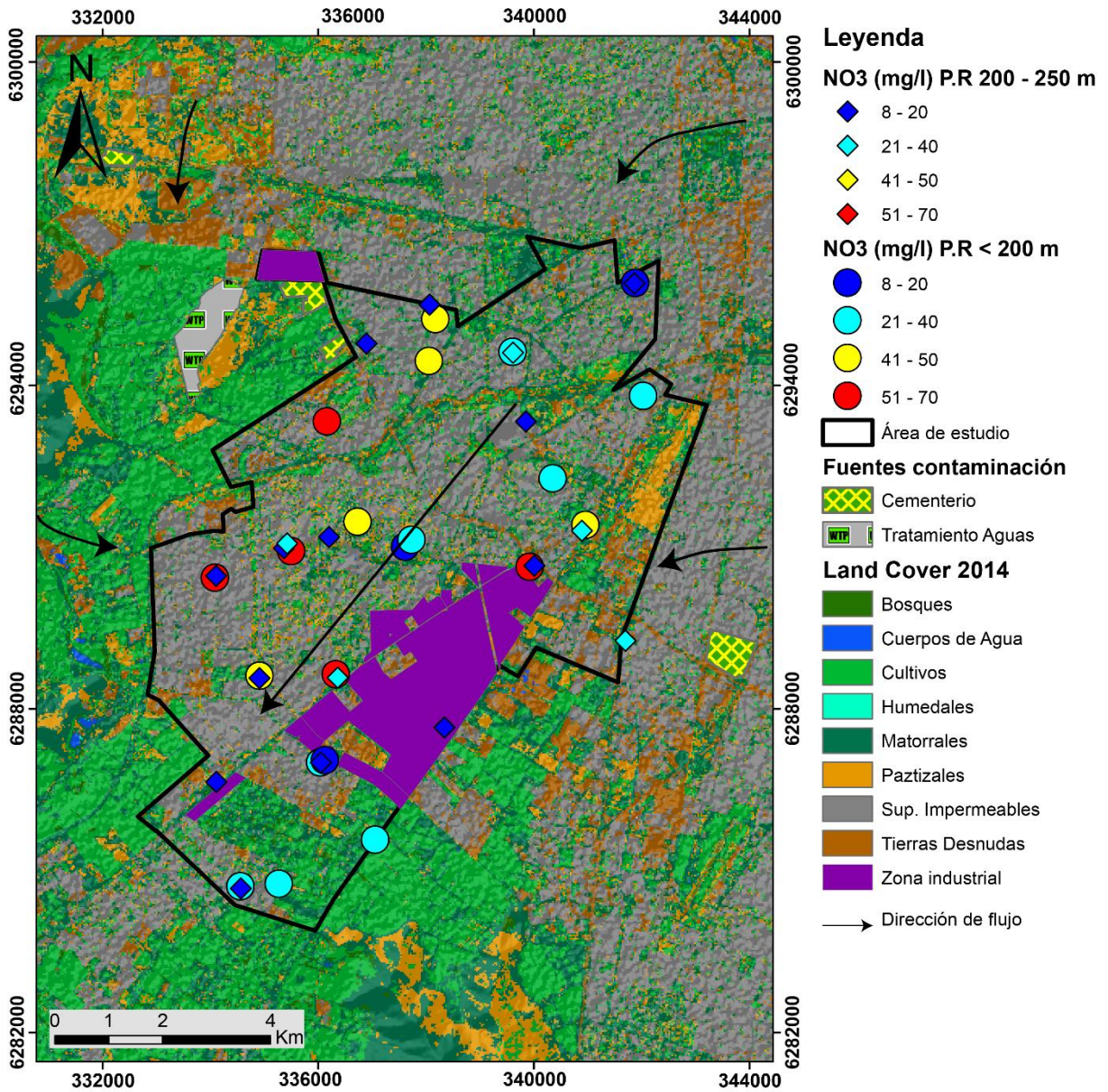


Figura 51: Potenciales focos de contaminación, concentraciones de NO<sub>3</sub> y dirección de flujo del agua subterránea dentro y fuera del área de estudio. Cobertura de suelo realizada por Hernández (2106). UTM (WGS 84, 19S)



## 5 Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusiones

Las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en las aguas subterráneas se han convertido en una preocupación a nivel mundial, puesto que han llegado a afectar a diversos acuíferos tanto en zonas agrícolas como urbanas, indicando la existencia de múltiples fuentes de contaminación difíciles de controlar. En la Región Metropolitana, SMAPA es una empresa concesionaria que usa las aguas subterráneas de la zona poniente de la Cuenca de Santiago para abastecer a cerca de un millón de personas, donde se ha observado un sostenido aumento de algunos parámetros especialmente por las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en los pozos de menor profundidad, que incluso ha provocado dejar fuera de uso a algunos de estos. Es por lo anterior, que se ha decidido realizar este trabajo para establecer una línea base de la calidad actual de las aguas subterráneas de la región Metropolitana, identificar los procesos fisicoquímicos que controlan la hidrogeoquímica y, estudiar las relaciones entre elementos que pudieran dar pistas sobre la fuente del  $\text{NO}_3^-$ . Esto, se ha llevado a cabo mediante el muestreo de 40 pozos de producción pertenecientes a SMAPA. Los datos hidrogeoquímicos obtenidos han sido evaluados y analizados mediante técnicas hidrogeoquímicas clásicas, tratamientos estadísticos y geoestadísticos para poder determinar y analizar posibles tendencias y los diferentes procesos fisicoquímicos en el área de estudio.

En primer lugar, mediante la recopilación y estudio de 14 informes de construcción de pozos de hasta 300 metros de profundidad con información estratigráfica, de la habilitación y de perfiles verticales de T° y C.E., se confeccionaron 3 columnas estratigráficas representativas de la zona norte, centro y sur del área de estudio. En relación a lo anterior, se identifican en el área de estudio dos de las tres unidades hidrogeológicas descritas por Morales (2002): A (Ignimbrita Pudahuel / impermeable) y B (Acuífero explotable), aunque con diferencias en la potencia de esta última unidad. Con los datos recopilados en este estudio, se reconoce un acuífero de 300 m de profundidad, con una transmisividad superior a los  $1000 \text{ m}^2/\text{día}$ , y, en el caso del pozo n°9, de mayor profundidad en el área de estudio (420 m), se observa en su columna estratigráfica y perfil de habilitación desarrollados por la empresa ANDINOR LTDA., que hasta esta profundidad aún no se encuentra el basamento. A diferencia de lo descrito por Morales (2002), en el área de estudio se ha encontrado espesores mayores del acuífero y no se ha reconocido la unidad hidrogeológica C, caracterizada como impermeable. En adición, la información estratigráfica y de los perfiles verticales permite identificar la existencia de dos niveles de acuíferos, el primero se desarrollaría desde el nivel freático hasta los 180-200 m de profundidad. Bajo esta profundidad, se presenta una sección estratigráfica con alto contenido de arcillas (35% a 60%) de potencia variable entre 20 y 30 m de espesor, que podría separar ambos niveles. El segundo nivel, comenzaría desde los 200-220 y con la información disponible hasta la fecha se reconoce hasta los 300 m.

De acuerdo al diagrama de Piper, las muestras del área de estudio se clasifican como sulfatadas cálcicas. A partir de la distribución de los elementos mayores, ilustrada por la ubicación geográfica de los diagramas de Stiff, de la distribución de la C.E. y, de los

resultados del análisis estadístico (gráficos binarios y dendrogramas), se reconoce que el agua subterránea en el área de estudio se encuentra fuertemente influenciada por las características hidrogeoquímicas de las cuencas del Maipo y del Mapocho, que representan una parte importante de la recarga natural del acuífero de la cuenca de Santiago. El Río Maipo, debido a su interacción con carbonatos y yacimientos yesíferos en la Cordillera Principal, se caracteriza por tener una salinidad natural inicial, que se traduce en una C.E. ( $>1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), debida especialmente a las concentraciones de  $\text{SO}_4^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Cl}^-$ . En cambio, el Río Mapocho presenta, en general, menor salinidad (C.E.  $< 300 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) antes de entrar a la ciudad de Santiago donde recibe el aporte de aguas servidas. Esta diferencia en el quimismo se ve reflejada en el agua subterránea de la zona de estudio: en la parte norte se ha medido una baja salinidad, mientras que hacia el centro y sur del área de estudio, se han medido valores mayores de C.E. y una excelente correlación entre  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  vinculada a la disolución de yeso.

Si bien el estudio de las columnas estratigráficas y los perfiles verticales de  $T^\circ$  y C.E., indican la existencia de dos niveles acuíferos en el área de estudio, los datos hidrogeoquímicos y el análisis realizado en este trabajo no permite reconocer dos unidades diferentes. Esto permite deducir que, si bien aparecen dos niveles acuíferos, estos no se encuentran separados físicamente a través de una capa impermeable continua, por lo que en el escenario dinámico de bombeo, se podría dar una mezcla de los distintos niveles, lo que es favorecido por el diseño de algunos pozos, en que no se impermeabiliza el espacio anular sobre el tramo ranurado (n°13 y 19), o que ubican su zona captante en ambos niveles (n°26, 28 y 36). Con los datos disponibles a la fecha, podrían darse áreas compartimentalizadas, donde se aprecia la diferencia entre las aguas de ambos niveles, observando que el agua de mayor profundidad presenta una menor C.E., mayor  $T^\circ$ . Además en estas áreas las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  están cercanas a  $10 \text{ mg}/\text{l}$ , lo que podría representar el valor de fondo del acuífero.

En relación a los procesos fisicoquímicos del agua, a través del diagrama de Gibbs, se reconoce que la interacción agua – roca es el principal proceso controlador del quimismo de las aguas. La disolución de carbonatos y yeso es uno de los procesos identificados. No obstante, también se reconoce un exceso de cationes ( $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) que no puede ser explicado por la disolución de los minerales mencionados, indicando el aporte de silicatos y un posible intercambio iónico. En el diagrama de Gibbs, también se observa que las muestras de agua más superficiales se encuentran próximas e incluso dentro del campo representativo de la evaporación. Estas muestras más someras, parecen recibir agua sujeta a éste proceso y considerando el desarrollo urbano del área de estudio, se sugiere que las filtraciones de la red de distribución de agua potable situada a menos de  $2 \text{ m}$  de la superficie, que fueron estimadas en este trabajo como el 20% del agua producida, es decir,  $18 \text{ Mm}^3/\text{año}$ , podrían contribuir a la recarga.

Con respecto a los índices de calidad analizados, los valores de sólidos totales disueltos, indican que el agua es aceptable para consumo, y en condiciones buenas a moderadas para su uso en el riego. En cuanto a la Norma Chilena de agua potable, solamente el  $\text{NO}_3^-$ , presenta valores sobre el límite permitido, reconociendo seis muestras sobre los  $50 \text{ mg}/\text{l}$ , con un máximo de  $157 \text{ mg}/\text{l}$  (3 veces el límite de la norma). No obstante, se identificó un grupo de elementos trazas compuesto por el As, Mo y Cr,

que presentan el mismo comportamiento hidrogeoquímico en el área de estudio, registrando sus mayores concentraciones en algunos de los pozos de mayor profundidad. El As, registra una concentración máxima de 9,4  $\mu\text{g/l}$  en el pozo n°25, que es un valor anómalo en el área de estudio, y cercano al límite establecido por la Norma Chilena de agua potable (10  $\mu\text{g/l}$ ). Dado que las concentraciones elevadas de As se encuentran en los pozos profundos, que muestran el menor contenido de  $\text{NO}_3^-$  y salinidad, se interpreta que el As y los otros elementos provendrían de origen natural, aunque sin contradecir lo anterior, el resultado del análisis de conglomerados, muestra un grado de relación entre el  $\text{NO}_3^-$  y el As, lo que pone en evidencia que probablemente, una parte de este elemento procede desde la superficie. Sin embargo, no se cuenta con los antecedentes suficientes en este estudio para identificar la fuente de estos elementos. Respecto a la Norma Chilena de agua de riego, doce pozos muestreados sobrepasan el límite exigido para el  $\text{SO}_4^{2-}$  (250 mg/l).

Para finalizar, se reconocen posibles focos de contaminación responsables de las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ . El hecho de que las concentraciones sobre la norma se encuentren asociadas a las zonas de mayor densidad de población y, que además, correspondan a las zonas de mayor antigüedad en sus redes de distribución de agua potable y alcantarillado, podría significar que la filtración de aguas de alcantarillado (residuos domésticos) sería un proceso antrópico importante en el área de estudio y de tipo multipuntual (múltiples zonas de alcantarillado dañadas). Las fuentes puntuales corresponderían a cementerios ubicados cerca, e incluso dentro del área de concesión, debido a la descomposición de los cuerpos enterrados y al riego excesivo que moviliza el  $\text{NO}_3^-$  hacia el acuífero, y a la planta de tratamiento de aguas servidas de la Farfana, ubicada al norte del área de estudio, que en caso de generarse filtraciones en sus tuberías o piscinas estaría lixiviando altos contenidos de  $\text{NO}_3^-$ , además de  $\text{Cl}^-$  y bacterias. Las muestras ubicadas al sur del área, donde se desarrolla la mayor actividad agrícola, presentan las menores concentraciones de este anión, lo que indicaría que estas actividades no son un factor de primer orden en la contaminación del acuífero.

## 5.2 Recomendaciones

Dadas las conclusiones obtenidas en este trabajo, en el sentido que se reconoce la presencia de actividad antrópica y en algunos casos fuentes o focos de contaminación puntuales, se recomienda que se realice un monitoreo continuo de la hidrogeoquímica del agua subterránea al menos una vez al año, que permita realizar un análisis temporal para establecer cuál es la evolución del acuífero en relación a la contaminación. Es necesario evaluar, si las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  aumentan en el tiempo, para decidir si es necesario tomar medidas que mitiguen la contaminación. Esto, teniendo en cuenta que el agua subterránea se utiliza para consumo humano.

Se propone aumentar el número de estaciones de monitoreo, en aquellos sectores donde existe mayor distancia entre plantas de producción de agua potable

Se sugiere que los análisis químicos desarrollados por el Servicio incluyan más datos que los que exige la Norma Chile 409, como el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , pues son necesarios para caracterizar el agua subterránea

Respecto a los posibles focos de contaminación identificados en este estudio, se recomienda realizar estudios y mediciones de calidad de aguas superficiales y subterráneas, en las inmediaciones de cementerios, planta de tratamiento de aguas servidas y de la red de alcantarillado, con el fin de determinar el impacto que podrían estar generando en las aguas subterráneas y en el caso de este estudio, sobre todas las personas que se abastecen del agua que distribuye el SMAPA.

Por último, se aconseja realizar un nuevo estudio hidrogeoquímico, que incluya análisis de isotópicos para cuantificar el tiempo de permanencia en el acuífero y poder aseverar las fuentes de recarga expuestas en este trabajo, y a su vez, discriminar entre los posibles focos de contaminación.

## Bibliografía

Araneda, M.; Avendaño, M. S.; Díaz, G. 2010. Modelo estructural de la Cuenca de Santiago, Chile y su relación con la hidrogeología. *Revista Geofísica* (n.62): pp.29-48

Beaumont, J. J., Sedman, R. M., Reynolds, S. D., Sherman, C. D., Li, L. H., Howd, R. A. & Alexeeff, G. V., 2008. Cancer mortality in a Chinese population exposed to hexavalent chromium in drinking water. *Epidemiology*, 19(1), 12-23.

Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., & Savard, M. M. 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, 353(3), 294-313.

Corporación Nacional Forestal (CONAF), 2013. Proyecto Monitoreo de Cambios, Corrección Cartográfica y Actualización del Catastro de Bosque Nativo en las Regiones de Valparaíso, Metropolitana y Libertador Bernardo, O'Higgins. Disponible *online*: <http://www.ide.cl/download/capas/item/catastros-de-uso-de-suelo-y-vegetacion.html>

Cruz, J. V., & Andrade, C. (2015). Natural background groundwater composition in the Azores archipelago (Portugal): A hydrogeochemical study and threshold value determination. *Science of the Total Environment*, 520, 127-135.

Custodio, E. & Llamas, M. R., 1976. *Hidrología subterránea* (No. TC176. C8).

Dagnino, J. 2014. Coeficiente de Correlación Lineal de Pearson. *Rev Chil Anest*, 43, 150-153.

Daniele, D. 2007. Aplicación de sistemas de información geográfica al estudio de acuíferos complejos. Caso del Campo de Dalías. Tesis Doctoral. Universidad de Almería.

Dirección Meteorológica de Chile (DMC), 2001. *Climatología Regional*. Chile

Edmunds, W.M., Shand, P. 2008. Natural Groundwater Quality-Summary and Significance for Water Resources Management. *Natural Groundwater Quality*, 441-462

Elango, L., Kannan, R. & Senthil Kumar, 2003. Major ion chemistry and identification of hydrogeochemical processes of groundwater in a part of Kancheepuram District, Tamil Nadu, India. *Journal Environmental Geosciences*, 10–4, 157–166

Falcon E., Castillo O., Valenzuela M., 1970. *Hidrogeología de la Cuenca de Santiago*. Publicaciones Especiales No. 3. Instituto de Investigaciones Geológicas. Sección Hidrogeología. Corporación de Fomento de la Producción. Departamento de Recursos Hídricos.

Falcon, M. F.; Matutano, G. 2000. Contaminación de nitratos en las aguas subterráneas del sector poniente de la cuenca de Santiago, región metropolitana, Chile. Actas del IX Congreso Geológico Chileno, Vol. 1, Sesión Temática N°1, pp. 37-41

Fock, A., 2005. Geocronología y tectónica del Neógeno entre los 33 y 34°. Tesis para optar al grado de Magister en ciencias, mención Geología. Universidad de Chile.

Gibbs, R. J., 1970. Mechanisms controlling world water chemistry: Science, Vol. 170: pp.795– 840.

Giuliano Albo, María J, & Blarasin, Mónica T., 2014. Hidrogeoquímica y estimación del fondo natural de nitratos del agua subterránea en un agroecosistema del pedemonte de la sierra de Comechingones. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 71(3), 378-392.

González, S., 1991. Prospección de elementos trazas en recursos agrícolas de Chile. II. Aguas superficiales de los valles Maipo y Mapocho, Región Metropolitana. Agricultura Técnica (Chile) 51 (1): pp.22-29.

Gurrea, M. 2002. Análisis de Conglomerados. Proyecto e-Math Financiado por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades (MECD)

Hernández, B., 2016. Expansión urbana y movilidad en Maipú, 1970-2015. Departamento de Ciencias Históricas, Universidad de Chile.

Hernández, H.J., Galleguillos, M & Estados, C. 2016. Mapa de Cobertura de Suelos de Chile 2014: Descripción del Producto. Laboratorio GEP, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.

Instituto Chileno de Normalización 2005. Norma chilena NCh 409/1. Agua potable parte 1: requisitos. Chile, p 14.

Instituto de Normalización 1987. Norma Chilena 1333, Of78. Requisitos de Calidad del agua para diferentes usos. Modificada en 1987.

Instituto Nacional de Estadística (INE), 2003. Censo 2002 Síntesis de Resultados.

Intituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro de Investigación Especializado en Agricultura del Desierto y Antiplano, INIA URURI. 2010. Los Fertilizantes en la agricultura. Informativo N°16. Ministerio de Agricultura.

Iriarte, S., 2003. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la Cuenca de Santiago: Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapa a escala 1:100,000.

Iriarte-Díaz, S. 2003. Impact of urban recharge on long-term management of Santiago Norte aquifer, Santiago–Chile (Doctoral dissertation, Master thesis).

Jalali M. 2009. Geochemistry characterization of groundwater in an agricultural area of Razan, Hamadan, Iran. *Environ Geol*, 56: pp.1479–1488.

James, D. W., Hanks, R. J., & Jurinak, J. J. 1982. *Modern irrigated soils*. John Wiley. New York.

Kazakis, N., & Voudouris, K. S. 2015. Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate, modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. *Journal of Hydrology*, 525, 13-25.

Kumar, S. K., Rammohan, V., Sahayam, J. D., & Jeevanandam, M. 2009. Assessment of groundwater quality and hydrogeochemistry of Manimuktha River basin, Tamil Nadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159(1-4), 341-351.

Mayback, M., 1987. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *Am. J. Sci.* 287: pp.401–428.

Mayo, A.L., Loucks, M.D., 1995. Solute and isotopic geochemistry and groundwater flow in the Central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology* 172: pp.31–59.

Morales F., 2002. Definición de Acuíferos en la cuenca del río Maipo. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Municipalidad de Maipú, 2015. Atlas Comunal Maipú 2015. Disponible *online*: <http://www.municipalidadmaipu.cl/wp-content/uploads/2015/12/Atlas-2015.pdf>

Muñoz, M., Garat, P., Flores-Aqueveque, V., Vargas, G., Rebolledo, S., Sepúlveda, S. & Parada, M. Á. 2015. Estimating low-enthalpy geothermal energy potential for district heating in Santiago basin–Chile (33.5° S). *Renewable Energy*, 76, 186-195.

Obeidat, M. M., Massadeh, A. M., Al-Ajlouni, A. M., & Athamneh, F. S. (2007). Analysis and evaluation of nitrate levels in groundwater at Al-Hashimiya area, Jordan. *Environmental monitoring and assessment*, 135(1-3), 475-486.

Organización Mundial de la Salud (OMS), 2006. *Guías para la calidad del agua potable*. 3ra ed. Ginebra

Piper AM (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Am Geophy Union Trans* 25:914–923

Plan Regulador Metropolitano, 2013, Usos de Suelo en Santiago. Disponible *online*: [http://ide.ocuc.cl/layers/geonode:prms\\_uso\\_suelo](http://ide.ocuc.cl/layers/geonode:prms_uso_suelo)

San Juan A., 2015. Caracterización Hidrogeoquímica de Recursos Hídricos de la Cuenca de Santiago. Departamento de Geología, Universidad de Chile.

Sellés D, Gana P., 2001. Geología del área Talagante e San Francisco de Mostazal: regiones Metropolitana de Santiago y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería. 1 map, scale 1:100,000.

Salvador Figueras M. y Gargallo P. (2003). Análisis Exploratorio de Datos. <http://www.5campus.com/leccion/aed>

Servicio Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Maipú (SMAPA), 2017. Memoria SMAPA 2015. Consultado el 10 de Diciembre de 2017 en la página [https://issuu.com/smapamaipu8/docs/memoria\\_20smapa\\_202016\\_20ok\\_20ok\\_20](https://issuu.com/smapamaipu8/docs/memoria_20smapa_202016_20ok_20ok_20)

Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), 2016. Producción y facturación de agua potable. Disponible en [www.siss.cl/577/w3-propertyvalue-6377.html](http://www.siss.cl/577/w3-propertyvalue-6377.html)

Thomas, H., 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de La Ligua y la cuesta Barriga. Instituto de Investigaciones Geológicas; Boletín N°2

Tukey J.W., 1977. Exploratory data analysis. Addison-Wesley, Reading.

UNESCO, 2009. World Water Assessment Programme: The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World. Paris.

Vystavna, Y., Yakovlev, V., Diadin, D., Vergeles, Y., & Stolberg, F., 2015. Hydrochemical characteristics and water quality assessment of surface and ground waters in the transboundary (Russia/Ukraine) Seversky Donets basin. *Environmental Earth Sciences*, 74(1), 585-596.

Wakida, F. T., & Lerner, D. N. (2005). Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study. *Water research*, 39(1), 3-16.

Wall R, Gana P, Gutiérrez A., 1996. Mapa geológico del área de San Antonio y Melipilla, regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapa a escala 1:100,000.

Wall R., Sellés D, Gana P., 1999. Área Tiltill e Santiago, Región Metropolitana. Santiago, Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapa a escala 1: 100,000.

World Health Organization. (2003). Chromium in Drinking-water. World Health Organization (WHO), Geneva.

Yang, Y., Lerner, D.N., Barrett, M.H., Tellam, J.H., 1999. Quantification of groundwater recharge in the city of Nottingham, UK. *Environ. Geol.* 38, 183–198

Yidana, S. M., Banoeng-Yakubo, B., & Akabzaa, T. M., 2010. Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 58(2), 220-234.



Zhao, Y.; Feng, D., Yua, L., Wang, X., Chen, Y., Hernández, H.J., Galleguillos, M., Estades, C., Biging, G., Radke, J. & Gong, P., 2016. Detailed dynamic land cover mapping of Chile: accuracy improvement by integrating multi-seasonal land cover data. *Remote Sensing of Environment* 183, 170–185.

Żychowski, J., 2012. Impact of cemeteries on groundwater chemistry: A review. *Catena*, 93, 29-37.

A. Nur, J. Ishaku and S. Yusuf., 2012. "Groundwater Flow Patterns and Hydrochemical Facies Distribution Using Geographical Information System (GIS) in Damaturu, Northeast Nigeria," *International Journal of Geosciences*, Vol. 3 No. 5, 2012, pp. 1096-1106. doi: 10.4236/ijg.2012.35111.

Manjusree, T. M., Joseph, S., & Thomas, J., 2009. Hydrogeochemistry and groundwater quality in the coastal sandy clay aquifers of Alappuzha district, Kerala. *Journal of the Geological Society of India*, 74(4), 459.

Dehnavi, A. G., Sarikhani, R., & Nagaraju, D., 2011. Hydro geochemical and rock water interaction studies in East of Kurdistan, NW of Iran. *Int J Environ Sci Res*, 1(1), 16-22.

# Anexos

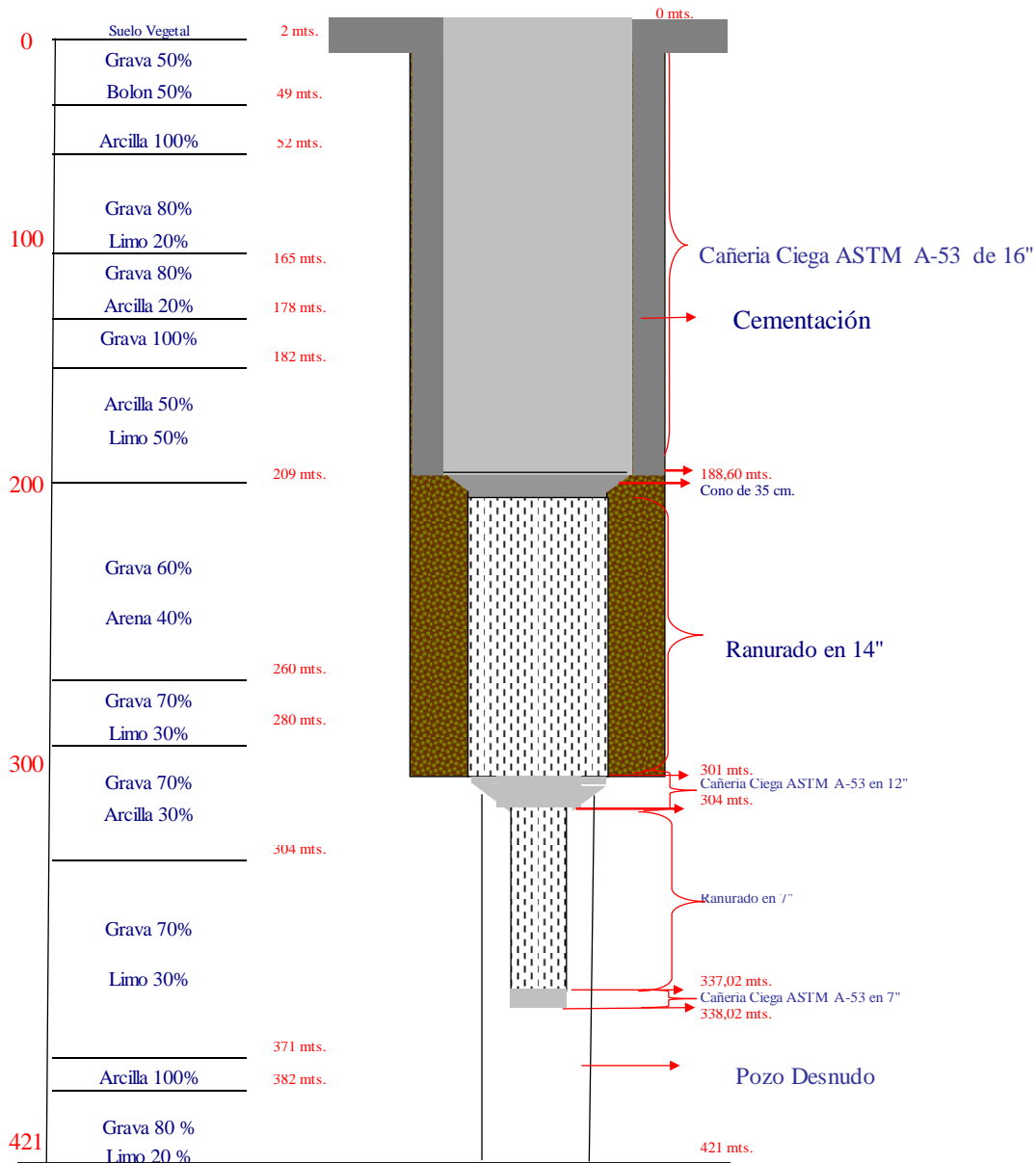
## Anexo A: Resultados de los análisis de elementos trazas

Nombre	Li (ug/L)	B (ug/L)	Al (ug/L)	Cr (ug/L)	Fe (ug/L)	Mn (ug/L)	Ni (ug/L)	Cu (ug/L)	Zn (ug/L)	As (ug/L)	Rb (ug/L)	Sr (ug/L)	Mo (ug/L)	Ag (ug/L)	Cs (ug/L)	Ba (ug/L)	Pb (ug/L)	U (ug/L)
1- C.SATE	30,6	219,3		0,56		0,21	2,17	1,24	20,30	2,08	5,88	1587	0,17		0,03	34,64		2,36
1- LUIS	16,9	242,3		0,89	40,80	3,48	2,13	1,91	10,60	0,90	2,14	753			0,01	37,64		1,91
2 - ANA	25,6	177,4		0,63		0,12	2,09	1,32	13,90	1,97	4,71	1488	0,32		0,09	30,19		3,12
1A- SJC	2,3	94,4	6,80	1,10	8,60	0,78	0,66	1,28	20,20	2,77	1,03	174	0,87		0,04	9,01	0,30	0,37
PZ 1- CERR II	7,2	155,7		0,78		0,63	2,03	3,65	12,60	0,69	1,90	812	0,23	8,49	0,01	38,50		1,73
PZ 1A- ALM	10,8	185,0		0,76		0,33	1,98	3,00	45,30	0,80	2,13	679			0,01	57,83	0,53	1,79
6- ERRRA	3,4	84,1		0,72		0,26	1,24		39,90	1,00	1,78	332	0,05			23,76		0,67
1- JARDIN I	16,8	201,8		0,91		0,91	2,21	6,11	21,00	0,85	3,08	1179			0,03	41,37	0,85	2,66
1- EL ABRA	28,1	346,5		1,13		0,40	2,19	0,85	8,10	1,75	5,15	1609	0,10		0,01	33,04		2,42
MC PZ 1	5,8	119,0		0,83	14,60	0,38	1,86		18,20	1,12	2,04	505	0,05			49,72	0,10	1,32
1- ALA	5,3	137,6		1,03	64,70	0,36	2,10		6,60	1,02	2,56	602	0,06			46,84	0,16	1,72
1- JARDIN II	13,1	167,1		0,77		0,13	2,49	5,76	34,80	0,85	1,92	830			0,01	48,15	3,84	1,65
1A-Pajaritos	6,6	120,7		1,08		0,17	2,21	0,25	46,00	0,84	1,84	563				48,95	0,44	1,48
REFO	7,5	177,9		1,18	13,40	0,38	1,98	0,42	10,10	0,74	2,09	615			0,01	51,09		2,14
1A- ADEL	8,5	126,2		0,85		1,18	1,84	0,52	8,10	0,62	1,73	682			0,01	44,36		1,98
3- VER I	4,1	85,5		0,35	22,90	1,25	1,76		8,60	0,87	1,68	537			0,02	26,93	0,12	1,12
PZ 6- CERR I	4,1	97,0		0,81	21,90	0,88	2,15		16,70	0,79	1,60	496				43,09	0,04	1,48
4- EL ABRA	23,5	230,7		0,79		0,33	2,04	129,95	8,60	1,58	4,01	1359			0,02	32,09	0,45	2,93
Pz 4A - Tranque	4,1	92,9		0,60	9,20	1,30	1,64	1,34	33,80	0,84	1,76	395				35,07	0,06	1,02
Pz 2A- ALM	6,2	104,8		1,07		0,12	2,60	1,63	22,30	2,34	5,06	426	0,12			41,10	0,24	1,05
2A- ERRRA	4,1	59,1		0,56	8,80	1,12	2,27		11,80	0,77	1,38	449				27,80	0,11	0,93
Pz6A- ALM	5,6	121,7		1,26		0,23	2,52	2,56	31,20	2,39	2,70	471				37,76	0,30	0,75
2A- LUIS	3,6	117,8	2,00	1,92	4,78	0,25	0,56	0,76	9,50	9,40	2,44	198	1,00		0,01	14,21	0,07	0,27
PZ N3A- CERR I	8,9	131,5		0,77	10,20	0,55	2,00		11,90	0,67	2,11	787				39,80		1,90
3-WILL	3,1	95,5		0,67		0,19	2,00		48,90	0,66	1,24	497				36,64	0,49	1,82
2- S.MAR	23,7	278,0		0,63		0,30	2,08	19,90	19,90	1,75	3,36	1348			0,02	41,50	0,19	2,76
N3- V.ALE	18,1	141,7		0,71		0,23	2,27	2,04	7,60	0,69	3,38	1335			0,01	53,06		3,23
N1- PLATH	3,8	109,0		1,20		0,26	1,23		14,10	1,47	2,80	370	0,06			35,68		0,81
1- VER II	2,7	99,8	1,30	0,95	2,50	0,14	0,75	1,78	6,40	2,42	1,38	201	0,37		0,02	10,03	0,17	0,49
2-JAH	3,8	104,1	1,50	1,43	3,60	0,45	0,76	0,44	19,50	3,14	3,51	241	0,55		0,04	15,77	0,05	0,63
MC PZ 2	4,4	107,3		1,23		0,27	1,13		26,30	3,30	2,42	437				31,67	0,05	0,43
9- ADEL	5,1	105,8		0,81		0,19	2,06		13,10	0,78	1,78	527				40,24	0,02	1,56
4- C.SATE	28,9	201,0		0,55		0,31	2,29	2,98	19,50	1,92	5,67	1589	0,19		0,10	33,80		2,64
5- SJC	2,3	96,2	1,30	1,10	6,40	0,14	0,62	0,25	4,30	2,85	1,02	174	0,89		0,04	7,07		0,36
3- JARDIN II	9,8	128,3		0,83		0,40	3,56		30,60	1,34	2,30	758				42,15	0,22	1,18
Pz 2A - Tranque	9,7	141,3		0,52	11,60	0,92	2,01	1,06	25,70	0,75	1,92	449			0,01	47,14	0,35	1,71
2A- JARDIN I	10,9	140,2		0,75	29,10	0,99	2,17	2,30	27,50	0,61	2,31	874			0,01	49,54	0,84	2,54
PZ 1-Bosq	15,4	112,4		0,60	11,50	2,03	2,28		21,80	0,86	2,50	989			0,01	35,33		2,09
5- EL ABRA	19,2	74,6		0,47		0,27	1,88	0,64	8,50	1,32	3,24	1069			0,02	49,43	1,26	1,92
6- C.SATE	21,4	89,6		0,45		0,24	1,50		16,10	1,64	2,78	1056	0,25			47,42		1,11

## Anexo B: Habilitación Pozos de SMAPA

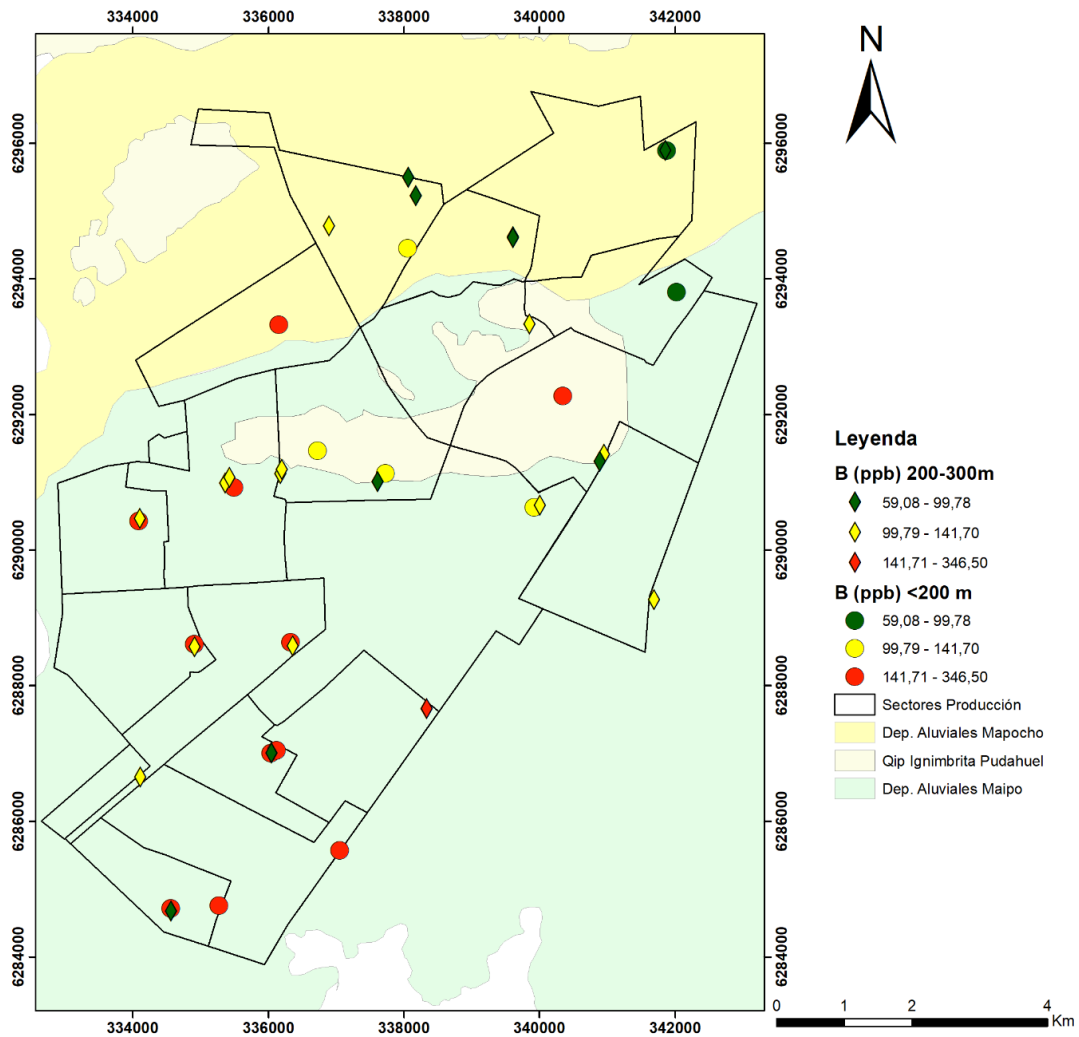
### B1: Habilitación pozo N° 9

Propietario : Ilustre Municipalidad de Maipu  
 Ubicación : Arquitecto Hugo Bravo N° 1121, Maipu  
 Habilitación : 16"- 14"- 12"- 7"  
 Pozo : N° 9 (Pozo N° 2 Jahuel)  
 Fecha inicio de : 06-05-05  
 UTM norte : 6294777  
 UTM este : 336896

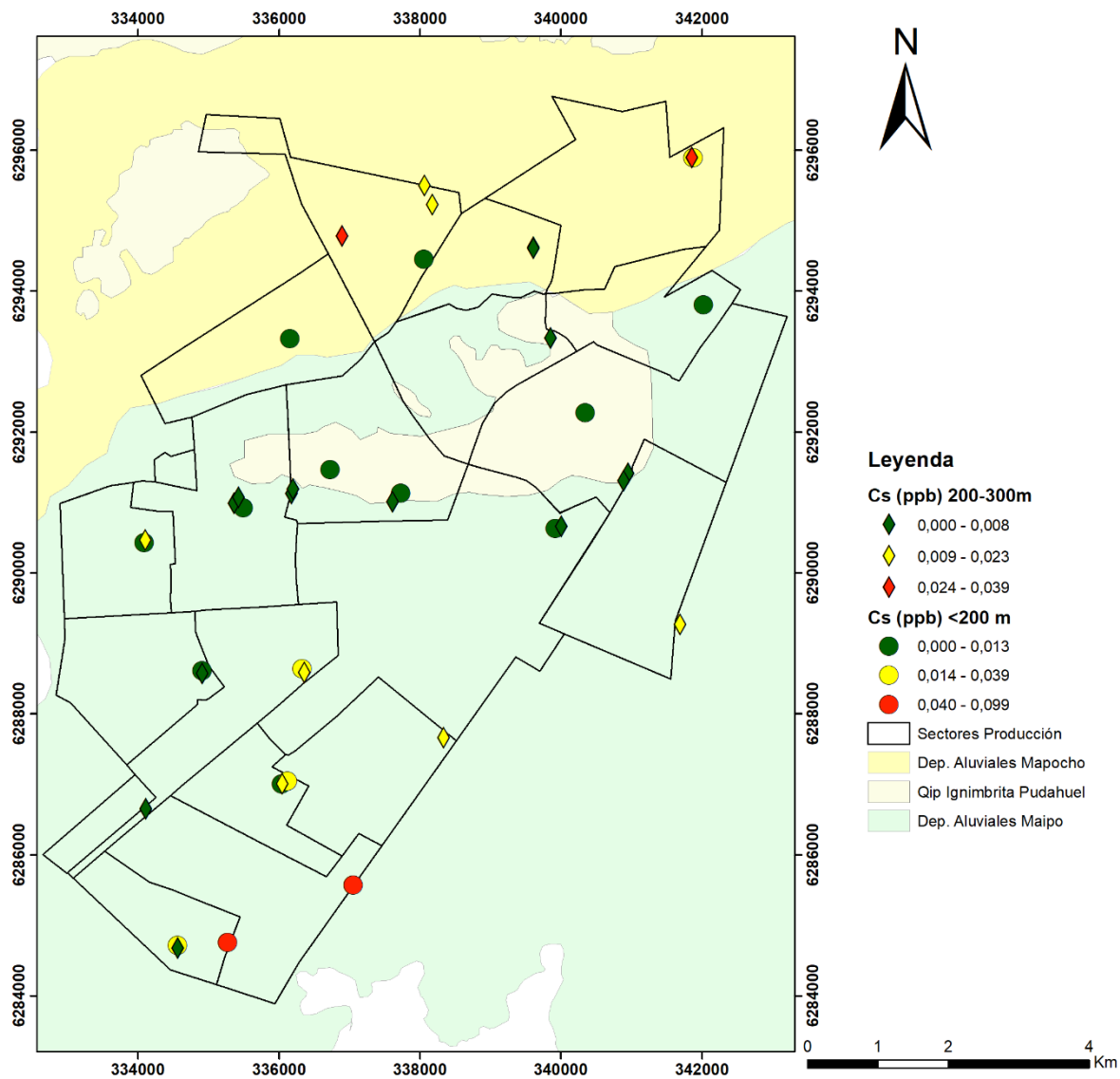


## Anexo C: Mapas de Distribución

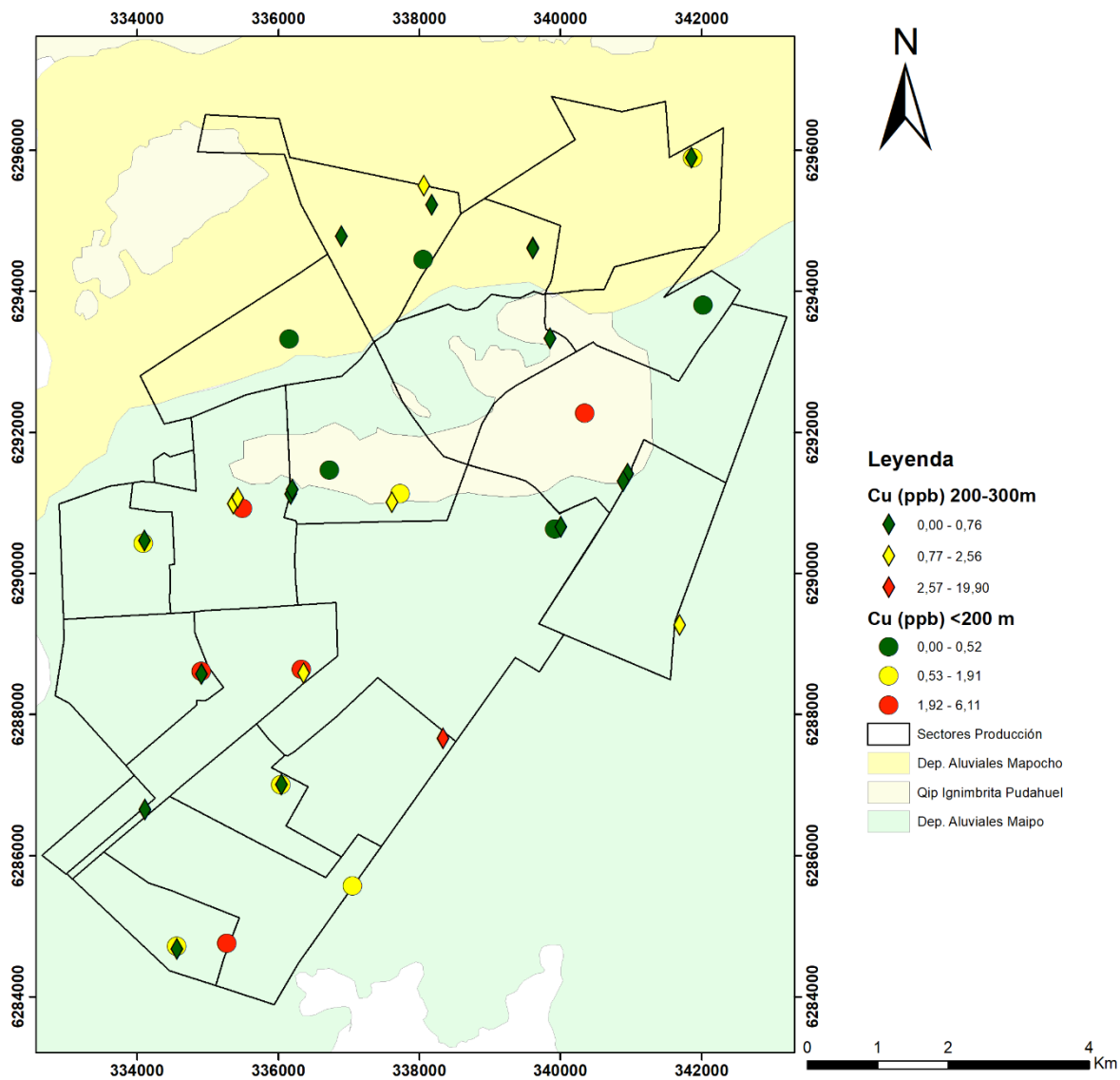
C1. Mapa de Distribución de Boro para el año 2015. Sistema de Coordenadas UTM Huso 19 S



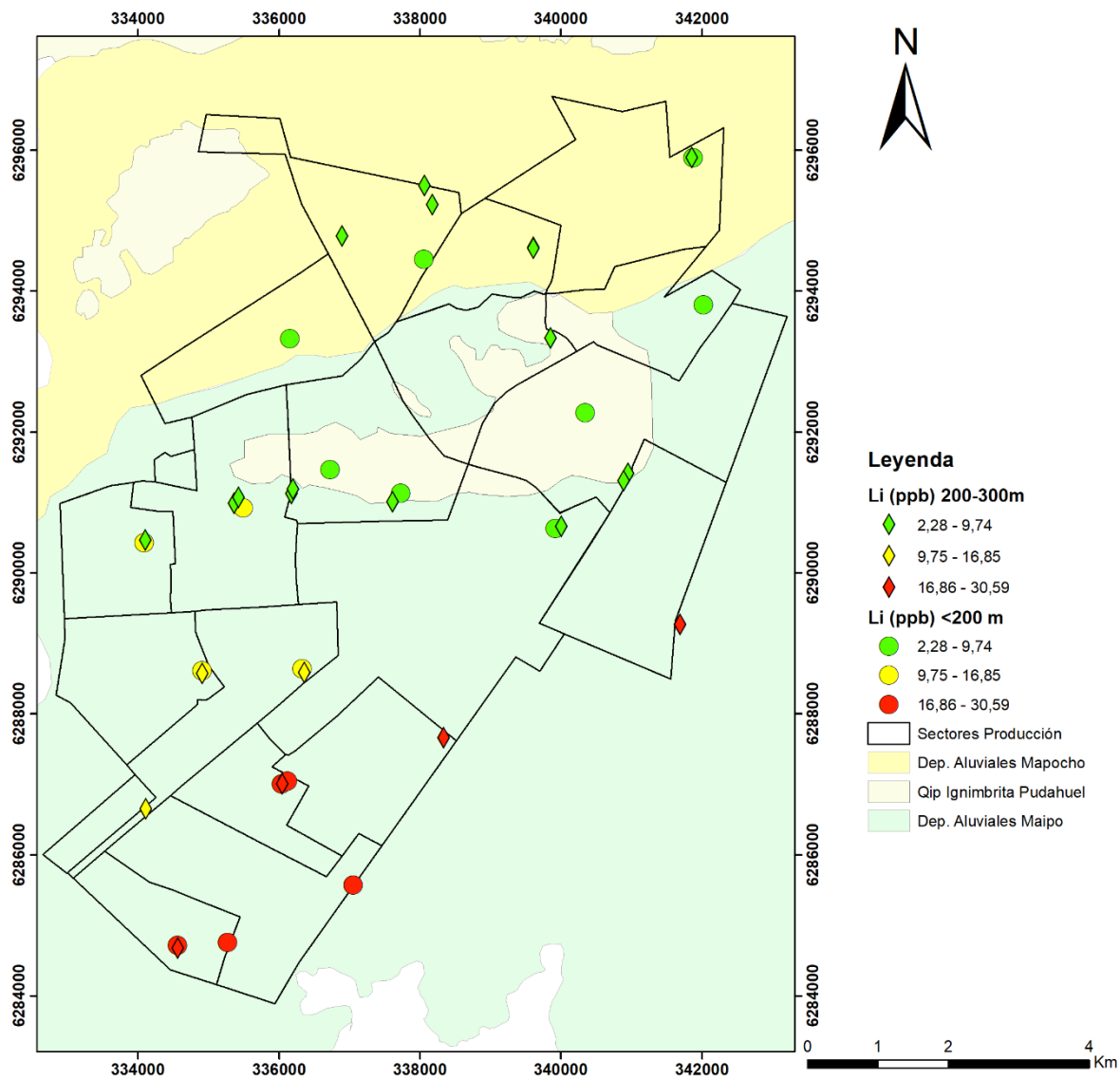
C2. Mapa de Distribución de Cesio para el año 2015. Sistema de Coordenadas UTM Huso 19 S



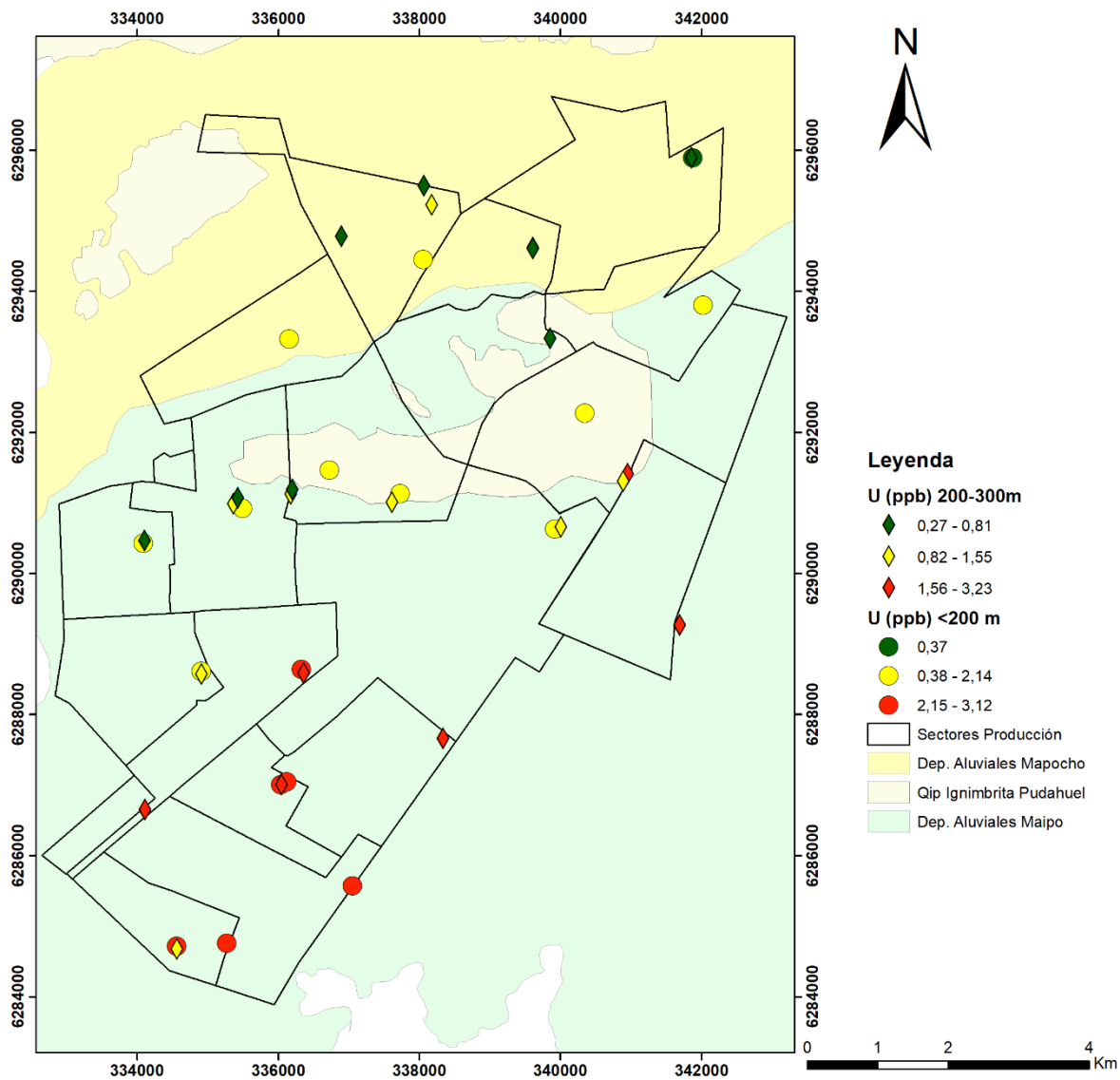
C3. Mapa de Distribución de Cobre para el año 2015. Sistema de Coordenadas UTM Huso 19 S



C4. Mapa de Distribución de Litio para el año 2015. Sistema de Coordenadas UTM Huso 19 S



C5. Mapa de Distribución de Uranio para el año 2015. Sistema de Coordenadas UTM Huso 19 S





C6. Mapa de distribución de As para el año 2010 en la cuenca de Santiago. Sistema de Coordenadas UTM, 19S. Datos extraídos de San Juan (2015). Dirección de flujo agua subterránea realizada por Iriarte (2003)

