



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DPTO. DE CONSERVACIÓN Y PROTECCIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS**

DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA REGIÓN LIB. BERNARDO O'HIGGINS

REALIZADO POR:

Departamento de Conservación y Protección de Recursos
Hídricos (DCPRH)

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

S.D.T. N° 383

SANTIAGO, MARZO 2016

**Director General de Aguas
Sr. Carlos Estévez Valencia**

**Dpto. de Conservación y Protección de Recursos Hídricos
Ing. Jefa Sra. Mónica Musalem Jara**

Profesionales participantes

**Sr. Carlos Quintana Sotomayor
Sr. Diego San Miguel Cornejo**

**Estudiantes colaboradores
Byron Riquelme Vásquez.**

Índice de contenidos

1. Resumen.....	6
2. Introducción	7
3. Objetivo	8
4. Antecedentes	9
4.1. Geología de la VI Región.....	10
4.2. Hidrogeología de la VI Región	10
4.3. Caracterización de los sectores acuíferos de la VI Región.	13
4.4. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos	15
5. Metodología	17
5.1. Selección de pozos para el muestreo de aguas subterráneas	17
5.2. Selección de parámetros de calidad de aguas	17
5.3. Uso de equipos y materiales	18
5.4. Metodologías Analíticas y Límites de Detección.....	19
5.5. Selección del período y frecuencia de muestreo	19
5.6. Preparación del trabajo en terreno.....	20
5.7. Análisis y presentación de resultados químicos.....	20
5.8. Cálculo de Índice de Calidad.....	22
5.8.1. Índice de calidad individual por parámetro	23
5.8.2. Cálculo e interpretación del Índice de calidad general	24
6. Resultados	25
6.1. Descripción general de las actividades en terreno y laboratorio.....	25
6.1.1. Toma de muestras.....	25
6.2. Distribución de los puntos de muestreo	26
6.3. Datos registrados en terreno	28
6.4. Cálculo del balance iónico	32
6.5. Concentración de iones.....	32
6.6. Nitrato	36
6.7. Amonio (NH ₄) y Fosfato (PO ₄)	37
6.8. Microelementos	38
6.9. Pesticidas.....	42
7. Índice de calidad.....	43
7.1. Índice de calidad general.....	43
7.2. Índice de calidad temporal.....	45
8. Conclusiones.....	47

9. Recomendaciones	49
10. Bibliografía	51

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema simplificado del proceso de contaminación difusa de aguas continentales (tomado de: González S., en revista Inia Tierra Adentro, Nov-Dic 2007).	9
Figura 2: Extracto de Mapa Hidrogeológico, DGA. Se representa la VI región. Escala 1: 1.000.000	11
Figura 3: Mapa hidrogeológico de la VI Región. (Basado en Geología Escala 1:1.000.000, Sernageomin (tomado de: DGA, 2011).	12
Figura 4: Localización de acuíferos Alhué, Cachapoal, Tinguiririca y costeros en la VI región. Además se incluye la localización de los pozos estudiados. Las líneas grises representan las divisiones de cada sector acuífero	13
Figura 5: Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en la VI Región (Sernageomin, 2006; escala del estudio: 1:500.000).	16
Figura 6: Clasificación de los diversos tipos de agua según diagrama de Piper.	21
Figura 7: Esquema y diagrama de flujo de metodología.	22
Figura 8: Cálculo de índice de calidad mediante interpolación lineal entre clases.	23
Figura 9: Fotografías de trabajo de terreno.....	26
Figura 10: Distribución de puntos de muestreo por comuna y por provincias (Colchagua, Cachapoal y Cardenal Caro.	27
Figura 11: Distribución de pozos muestreados en la VI región.	28
Figura 12: Profundidades de los pozos y sus respectivos registros de profundidad del agua medida en terreno (niveles estáticos).....	29
Figura 13: Profundidades de los pozos y sus respectivos registros de profundidad del agua medida en terreno (niveles dinámicos).....	29
Figura 14: Parámetros físico químicos registrados in-situ en aguas de 40 pozos de la VI Región. Arriba: datos de T; Abajo: datos de pH.	30
Figura 15: Parámetros físico químicos registrados in-situ en aguas de 40 pozos de la VI Región. Arriba: datos de conductividad; Abajo: datos de potencial de óxido reducción.	31
Figura 16: Distribución porcentual del error del balance iónico de las muestras de agua subterránea.	32
Figura 17: Diagramas de Stiff-modificado para las 40 muestras de aguas subterráneas tomadas en la VI región. En color verde se representan las aguas bicarbonatadas, mientras que en rosados los diagramas de aguas con mayor contenido de sodio y cloro.	33
Figura 18: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el sector de la provincia de Cachapoal. Se pueden considerar como bicarbonatadas cálcicas. Geológicamente tienen relación con rocas cristalinas o rocas carbonatadas. Se logra distinguir que las comunas de San San Vicente, Pichidegua, y alrededores presentan valores relativos más altos de Sulfato.	34
Figura 19: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el sector de la provincia de Cardenal Caro. Se pueden considerar como bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas y sulfatada y/o clorurada sódica y/o magnésica. Geológicamente tienen relación con rocas cristalinas o rocas carbonatadas y con procesos de oxidación de sulfato, salmueras, rocas sedimentarias y agua de mar.....	35
Figura 20: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el sector de la provincia de Colchagua. Se pueden considerar como	

bicarbonatadas cálcicas. Geológicamente tienen relación con rocas cristalinas o rocas carbonatadas.....	36
Figura 21: Representación de rangos de concentración de nitrato (NO ₃) detectado en los pozos muestreados en acuíferos de la VI Región.....	37
Figura 22: Concentración total de Arsénico detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409).....	40
Figura 23: Concentración total de Hierro detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409).	40
Figura 24: Concentración total de Manganeseo detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409) y norma de agua para distinto uso (NCh 1333, riego).	41
Figura 25: Concentraciones de arsénico por rango detectadas en los pozos muestreados en la VI región. El pozo 1 en rojo corresponde a APR Idahue San Vicente y el pozo 2 a Pupuya.	41
Figura 26: Resultados de Análisis de Índice de calidad de los pozos estudiados en la VI Región. ...	43

Índice de Tablas

Tabla 1: Listado de parámetros controlados en las aguas subterráneas de la VI Región.....	17
Tabla 2: Parámetros medidos y las respectivas metodologías del Laboratorio ANALAB	19
Tabla 3: Parámetros medidos y las respectivas metodologías del Laboratorio Ambiental de la DGA	19
Tabla 4: Relación entre clases de calidad y valores de corte.....	23
Tabla 5: Definición de clases de calidad de agua.....	24
Tabla 6: Criterios para establecer el IC general	24
Tabla 7: Resumen de los resultados de análisis químicos de microelementos en aguas subterráneas de la VI Región.	38
Tabla 8: Índices de calidad General de Pozos APR año 2014 y 2015.	45
Tabla 9: Resumen del número de pozos que superó alguno de los parámetros normados en la NCh409/2005, por sector acuífero. Se indica también el número de pozos que presentó concentraciones de nitrato mayor a lo esperado en aguas subterráneas (>30 mg NO ₃ /L), pero resultó menor al límite establecido para agua potable (50 mg NO ₃ /L).....	48
Tabla 10: Resumen pozos a incorporar en el seguimiento por parte de la DGA.....	49

1. Resumen

El presente informe expone los resultados de un estudio hidroquímico realizado a las aguas subterráneas de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins, cuyo objetivo fue diagnosticar la actual condición de la calidad de las aguas subterráneas, identificar la presencia de sustancias atribuibles a fuentes de contaminación difusa¹, comparar con resultados anteriores y proponer recomendaciones para futuros monitoreos a cargo de la Dirección General de Aguas (DGA). El área de estudio abarcó los acuíferos Cachapoal, Alhué, Tinguiririca y los acuíferos costeros. Para estos fines, se llevó a cabo la visita y toma de muestras de agua en 40 pozos, siendo seleccionados en función del espacio y en relación a los estudiados el año anterior. Dentro de la metodología de trabajo se incluyó el registro de parámetros en terreno (T, pH y Conductividad, Potencial de óxido-reducción) y el análisis de un gran número de parámetros en laboratorio (iones, microelementos y pesticidas). Los resultados se presentan gráficamente mediante el uso de diagramas de Stiff y Piper, permitiendo detectar diferencias en la concentración de iones entre las aguas subterráneas muestreadas. El total de datos químicos fueron comparados con los estándares de las normas de agua potable (NCh409/2005) y riego (NCh1333/1987), llamando la atención algunos pozos donde se identificaron concentraciones más elevadas de nitrato, arsénico, entre otros. Respecto a los resultados de análisis de pesticidas, es importante señalar que, de acuerdo a la metodología analítica utilizada, no se detectó este tipo de sustancias en las aguas subterráneas de la región. Como último trabajo se realizó el cálculo de los diferentes Índices de calidad, individual, general y temporal, en el cual se compararon los resultados con los del año anterior y así ver un mejoramiento o empeoramientos en las aguas estudiadas. Finalmente, como parte de las recomendaciones, se plantea un conjunto de medidas tendientes a reforzar el seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas como instrumento relevante para la gestión de los recursos hídricos de la región y del país.

¹ Para la identificación de cambios en las aguas subterráneas atribuibles a fuentes de contaminación difusa se consideraron las concentraciones de nitrato con magnitud igual o mayor a 30 mg/L.

2. Introducción

La Dirección General de Aguas (DGA), de acuerdo a las disposiciones establecidas en el art. 129, bis 3, del Código de Aguas, es el organismo del Estado encargado de establecer y operar la red de estaciones de control de calidad, cantidad y niveles de las aguas tanto superficiales como subterráneas en cada cuenca u hoya hidrográfica. Además, de acuerdo al artículo 299, la DGA es el organismo encargado de operar y mantener el Servicio Hidrométrico Nacional.

Este Servicio cuenta con una red de control de aguas subterráneas, la cual se compone de 70 puntos de monitoreo distribuidos en 12 regiones. Esta red tiene como objetivo monitorear el estado químico actual de los acuíferos, así como detectar sus cambios temporales y espaciales; todo para contar con una caracterización de los recursos hídricos y disponer de información para el desarrollo de instrumentos de gestión.

Considerando las necesidades señaladas y la importancia que tienen las aguas subterráneas para múltiples usos, la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (DGA, 2012) estableció como “objetivo prioritario prevenir la contaminación difusa de las aguas superficiales y subterráneas”, siendo el mejoramiento de la red de monitoreo de calidad de aguas subterráneas una de las medidas necesarias para avanzar en materia de prevención y detección temprana de sustancias contaminantes en los acuíferos.

3. Objetivo

El objetivo general del estudio fue conocer la condición actual de calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos de la VI Región y su evolución con respecto al año 2014², mediante una comparación aplicando la metodología de los Índices de calidad. Además, como objetivos específicos pueden ser citados los siguientes: Identificar la presencia de sustancias químicas atribuibles a fuentes de contaminación difusa y revisar la aplicación de recomendaciones realizadas en el informe del año 2015 con respecto al programa de monitoreo futuro y al mismo tiempo evaluar la implementación de ajustes.

² http://documentos.dga.cl/SDT_368_Diagnostico_calidad_aguas_subterranas_VI_Region_2015.pdf

4. Antecedentes

En cuanto a la región del Libertador General Bernardo O'Higgins (VI Región) se pueden mencionar diferentes factores que permiten realizar el mejoramiento de las redes de monitoreo de calidad de aguas subterráneas, entre estos están:

- Usos de suelo: la VI Región es la región que con mayor porcentaje destina a uso de suelo agrícola.
- Además de la agricultura, la VI región tiene múltiples usuarios de las aguas superficiales y subterráneas e importantes fuentes de contaminación difusa.
- Prácticas de riego en agricultura: El tipo de riego más utilizado es de tipo gravitacional. Existen estudios que señalan que métodos de riegos poco eficientes (como el riego gravitacional) aumentan el riesgo de generar contaminación difusa por efecto de lixiviación en el suelo, lo cual se ve incrementado con la aplicación intensiva de fertilizantes y sustancias agroquímicas. (Ver **Figura 1**)
- Uso intensivo de agroquímicos: La VI Región tuvo el primer lugar en ventas de plaguicidas (40% del total nacional) (SAG, 2008).
- Características actuales de la red de monitoreo de calidad de la DGA y factibilidad de detectar a tiempo problemas de contaminación difusa: La DGA dispone en la VI Región de cinco (5) puntos donde se ha monitoreado la calidad de las aguas subterráneas. Este número de pozos resulta insuficiente para llevar a cabo un diagnóstico y seguimiento adecuado de la calidad de las aguas subterráneas de la región (experiencia internacional sugiere como densidad óptima de monitoreo entre 25 a 150 Km²/punto (DGA, 2009)). Actualmente existe infraestructura construida en la región que resulta aprovechable para los fines señalados, dentro de los cuales cuentan los pozos particulares donde la DGA mide niveles de las aguas subterráneas y los pozos de abastecimiento de Agua Potable Rural (APR) construidos por la Dirección de Obras Hidráulicas.

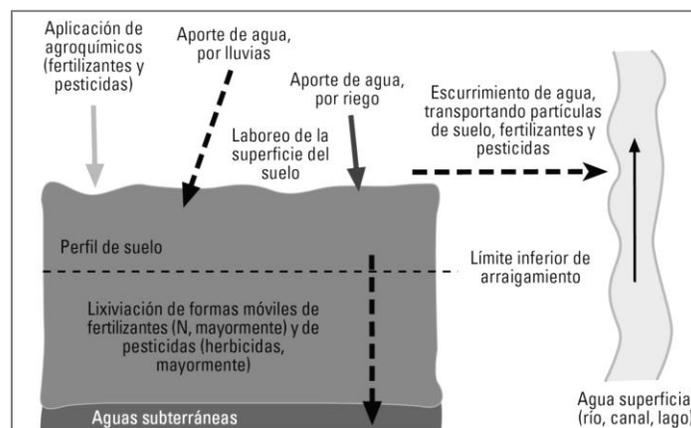


Figura 1: Esquema simplificado del proceso de contaminación difusa de aguas continentales (tomado de: González S., en revista Inia Tierra Adentro, Nov-Dic 2007).

4.1. Geología de la VI Región

La geología de la región se caracteriza por tener los componentes principales observados a lo largo de Chile. De este a oeste; la Cordillera de los Andes, Depresión Intermedia, Cordillera de la Costa y Planicie Costera, con esta últimas poco extensa. Los cauces principales están controlados por la topografía, viajando entre depresiones y valles, rodeados por cerros. Estos cauces corresponden al río Cachapoal y Tinguiririca, estando el primero más al norte y el segundo al sur, ambos confluyen al embalse Rapel.

Las estructuras presentes, comprenden en su mayoría a fallas normales, inversas e invertidas, junto con pliegues, en la Cordillera Principal. (Charrier, 2005)

Las principales unidades litológicas presentes, definidas por Godoy en el año 2009 en la Carta Geológica de la VI Región, corresponden a rocas sedimentarias, intercalaciones de rocas volcánicas y sedimentarias, rocas ígneas y depósitos cuaternarios. De más antiguo a más joven, se tiene la Formación lo Prado, Formación Las Chilcas, luego se tiene un hiato que abarca el Paleoceno, posteriormente la Formación Abanico, la cual es atravesada por un set de fallas normales y otras fallas inversas aisladas, de orientación NS. Finalmente se tienen depósitos desde el Pleistoceno hasta el Holoceno, que corresponden a depósitos fluviales, siendo rodeados por depósitos aluviales.

La región está caracterizada por tres acuíferos principales: Alhué, Cachapoal y Tinguiririca, siendo los últimos dos los de mayor envergadura, además se tiene otro grupo de acuíferos, los costeros, de menor tamaño.

4.2. Hidrogeología de la VI Región

Como se observa en la **Figura 2**, en celeste se distinguen las zonas con alta importancia hidrogeológica, debido a que corresponden a depósitos no consolidados o de relleno. Por otra parte las zonas con color ocre representan zonas con rocas volcánicas, intrusiva, o sedimentarias mezcladas con volcánicas, es por esto que poseen poca permeabilidad y del mismo modo tienen baja a nula importancia hidrogeológica relativa.

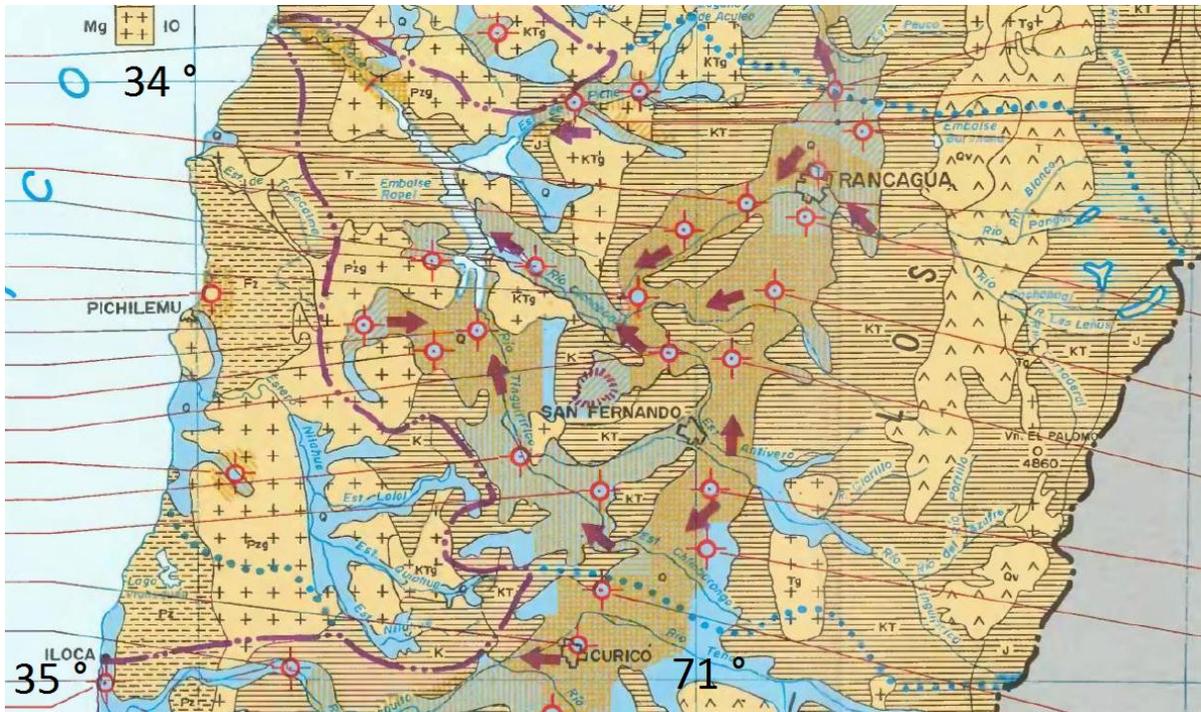


Figura 2: Extracto de Mapa Hidrogeológico, DGA. Se representa la VI región. Escala 1: 1.000.000

Según las distintas propiedades de las unidades litológicas, éstas se clasifican de acuerdo a su permeabilidad (alta, media, baja o nula).

Los sedimentos y depósitos no consolidados son los de mayor importancia en cuanto a regular la presencia, cantidad, calidad y disponibilidad del agua subterránea.

La **Figura 3** expone las tres unidades hidrogeológicas principales que existen en la zona. Para este estudio se trabajó con un mapa realizado por el SERNAGEOMIN con una escala de 1:600.000.

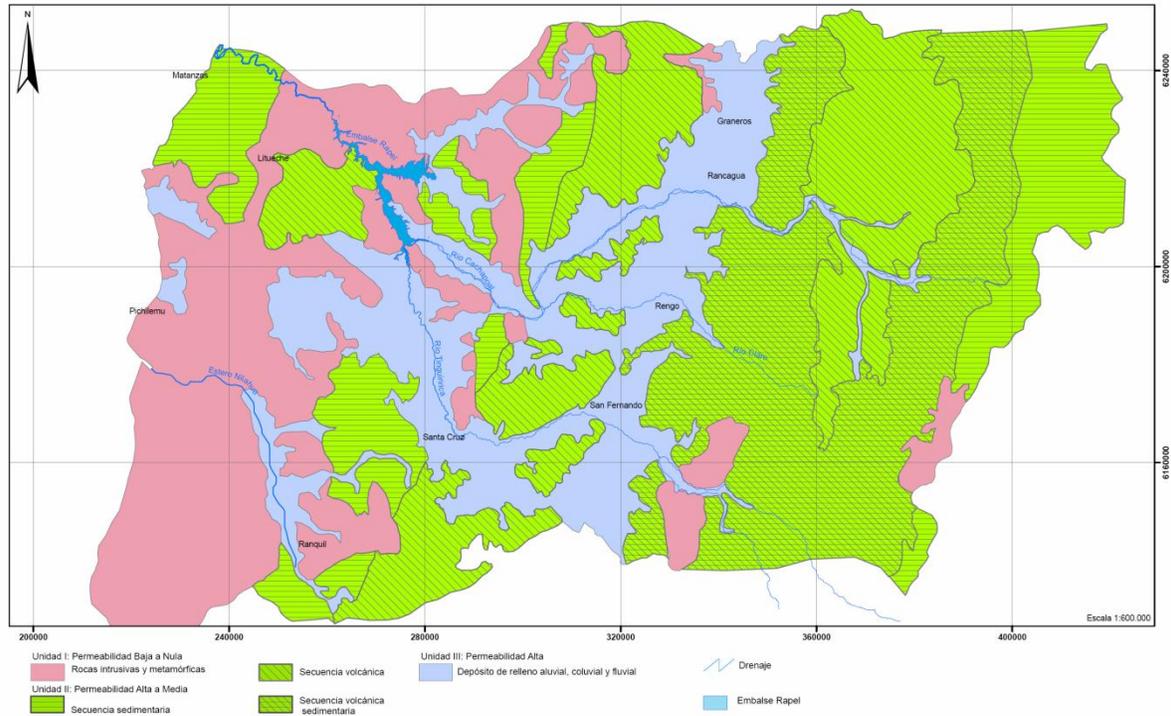


Figura 3: Mapa hidrogeológico de la VI Región. (Basado en Geología Escala 1:1.000.000, Sernageomin (tomado de: DGA, 2011).

Unidad I: permeabilidad baja a nula

Los cuerpos intrusivos abarcan el área más extensa de esta unidad, siendo los puntos topográficos más altos y antiguos (en la Cordillera de la Costa especialmente), además se tiene la presencia de rocas metamórficas de grado bajo en zonas localizadas. Estas rocas están altamente meteorizadas. (DGA, 2011)

Unidad II: permeabilidad alta a media

Dentro de esta unidad se distinguen tres subunidades de rocas: rocas sedimentarias, rocas volcánicas y una intercalación de ambas. Las subunidades de rocas volcánicas e intercalaciones de rocas volcánicas y sedimentarias pertenecen en su mayoría a la Cordillera de los Andes, por lo que corresponden a unidades antiguas (no tanto como la Cordillera de la Costa) y presentan los mayores altos topográficos de la región, mientras que la subunidad sedimentaria se localiza principalmente al oeste, en la Cordillera de la Costa. (DGA, 2011)

Los materiales laháricos (sedimento y agua asociado a flujos volcánicos) a pesar de corresponder a sedimentarios recientes (Cuaternario) y estar contenidos dentro de la Unidad II por la litología, tienen un comportamiento hidrogeológico similar al de las rocas pertenecientes a la Unidad I. Corresponden a material macizo y pobremente estratificado, denso, compacto y resistente, por lo tanto, tienen escasa porosidad y permeabilidad, disminuyendo así su importancia hidrogeológica.

Unidad III: permeabilidad alta

Está constituida por depósitos no consolidados, tanto aluviales, coluviales como fluviales. Estos se encuentran localizados principalmente en la Depresión Intermedia, segmentados por secuencias volcánicas de la Unidad II. En la cuenca del Cachapoal se distinguen 2 tipos de depósitos, uno

compuesto por abundantes partículas finas y el otro por estratos de granulometría gruesa como ripios, gravas y arenas. La base del depósito detrítico está compuesta por arena y arcilla. Esta secuencia tiene una alta continuidad y se ha llegado a detectar una base con una profundidad de 150 m (DGA, 2011)

Los depósitos con la mayor importancia hidrogeológica pertenecen a arenas de playas y dunas, que son arenas bien gradadas de grano medio-fino, y depósitos fluviales en cauces actuales, principalmente gravas y gravas arenosas. Estos se encuentran en los lechos de los cauces y en la costa.

4.3. Caracterización de los sectores acuíferos de la VI Región.

La Figura 4 muestra la localización de los acuíferos Alhué, Cachapoal, Tinguiririca y los sectores acuíferos costeros (en tonos grisáceos).

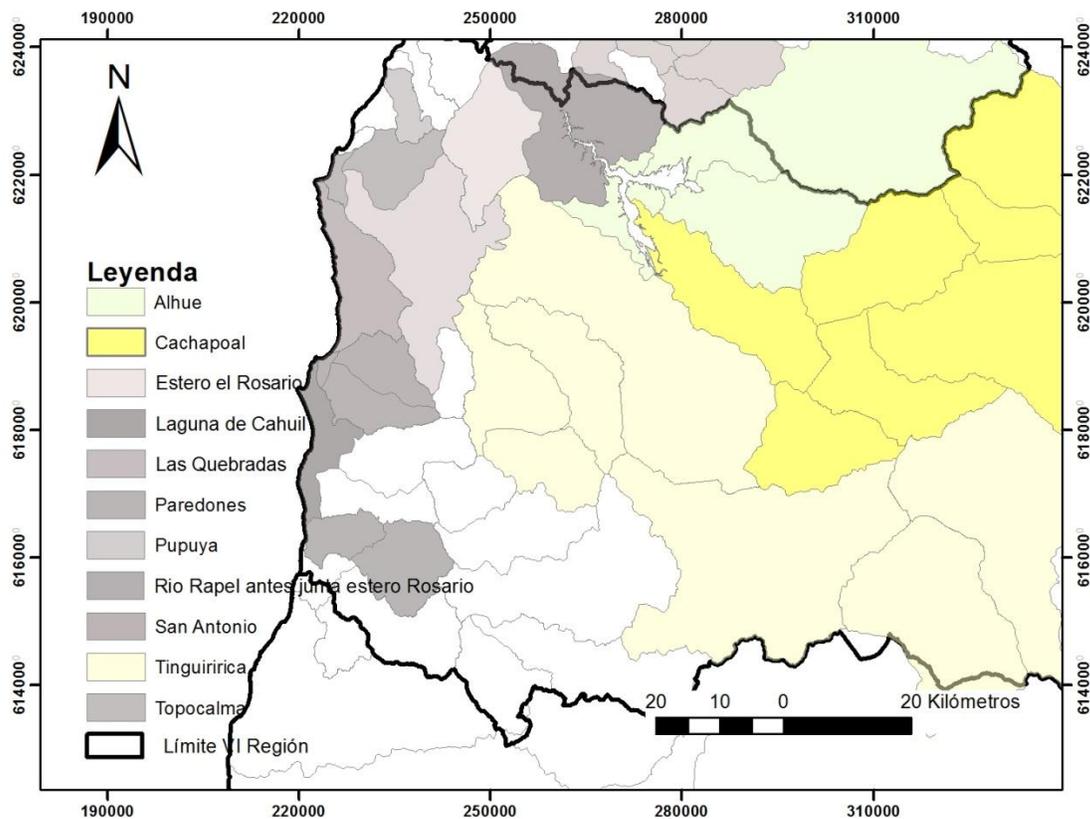


Figura 4: Localización de acuíferos Alhué, Cachapoal, Tinguiririca y costeros en la VI región. Además se incluye la localización de los pozos estudiados. Las líneas grises representan las divisiones de cada sector acuífero

- a) **Acuífero Alhué:** está ubicado en las cuencas de Alhué y Las Palmas. En el sector de Alhué, se encuentra en la zona superior un material de granulometría media a gruesa (50 m de potencia aproximadamente) y una unidad inferior compuesta por intercalaciones de

sedimentos. Se caracteriza por un espesor de relleno creciente desde las cabeceras de los esteros hacia el embalse Rapel.

Se estima un volumen inicial almacenado en 944 millones de m³, con una porosidad de drenaje considerada entre 3% y 8%. La principal fuente de recarga de la zona corresponde a la infiltración de precipitación (directa e indirecta), mientras que los afloramientos en los cursos superficiales constituyen la principal fuente de descarga. (DGA, 2005).

- b) Acuífero Cachapoal:** constituido principalmente por depósitos fluviales como gravas, arenas y arcillas, los que conforman dos estratificaciones, uno inferior compuesto mayoritariamente por arcilla, lo que genera una baja permeabilidad y uno superior, constituido por materiales gruesos de 100 m de espesor, siendo el acuífero de carácter libre. En el norte de Rancagua esta estratificación posee espesores de 5-12m, quedando su base y techo confinada por estratos con matriz arcillo-limosa. En el sector bajo, el espesor permeable tiene entre 60-100 m, donde se conforman acuíferos libres.

El volumen inicial estimado en el acuífero corresponde a 16.620 millones de m³ con una porosidad variable entre un 3% y un 15%. Se considera que la principal fuente de recarga de la zona corresponde a la infiltración de ríos y esteros que toma lugar en las partes altas, mientras que esos mismos cursos actúan como la principal fuente de descarga en las partes medias y bajas. (DGA, 2005).

- c) Acuífero Tinguiririca:** está constituido principalmente por materiales de granulometría gruesa desde las zonas altas de la cuenca hasta Santa Cruz, en algunos sectores como la depresión intermedia predomina un componente arcilloso, en donde bajo esta estratificación se localiza una tercera unidad granulométrica media a gruesa, la que le da al acuífero un carácter confinado a semiconfinado en algunos sectores de la Depresión Intermedia. Cercano a Santa Cruz, la unidad varía entre un material medio a fino arcilloso, el que domina hasta el lago Rapel. En las cuencas costeras el acuífero se encuentra condicionado por una intercalación de estratos de granulometría media a fina.

El volumen inicial de agua está estimado en 14.027 millones de m³ con una porosidad de drenaje considerada entre 3% y 15%. La principal fuente de recarga, al igual que el acuífero Alhué, corresponde a la infiltración de precipitación (directa e indirecta), mientras que los afloramientos en los cursos superficiales constituyen la principal fuente de descarga. (DGA, 2005).

- d) Acuíferos costeros:** se disponen en el lado occidental de la Cordillera de la Costa. Geomorfológicamente, están conformados por dos unidades: Llanos de sedimentación fluvial y Planicies costeras marinas. En general, la explotación de aguas subterráneas en las áreas de estudio es escasa, siendo la de mayor importancia en la cuenca del estero Nilahue. El sector está dominado por áreas de secano y los cultivos se concentran principalmente en los valles de los esteros. (DGA, 1998). Desde el punto de vista de importancia geológica, salvo algunas zonas, es muy baja o nula, debido a que la zona está dominada por rocas volcánicas, plutónicas, o rocas sedimentarias mezcladas con volcánicas; por lo que la zona en general resulta ser bastante impermeable y posee pocas características acuíferas. (DGA, 1998) (Ver **Figura 2**)

A modo de resumen, es posible indicar que en los sectores acuíferos de Alhué, Cachapoal y Tinguiririca de la VI Región, se pueden encontrar distintos tipos de materiales sedimentarios lo que a su vez determina la capacidad de almacenamiento de los acuíferos y la impermeabilidad de los suelos. Encontrándose, en términos generales, una granulometría de mayor tamaño como arenas o gravas en capas superiores como en la zona superior de Alhué y del acuífero del Cachapoal, lo que les permite tener una alta permeabilidad, y por otro lado, partículas más pequeñas como arcillas en zonas inferiores, las que se encuentran dentro de los 3 acuíferos y a su vez, genera una baja permeabilidad y retiene el agua subterránea. Mientras que por otra parte, en los acuíferos costeros dominan rocas intrusivas y volcánicas, de baja permeabilidad, por lo que la importancia hidrogeológica de esta zona es, en general, baja o nula.

4.4. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos

Se dice que un sistema acuífero es vulnerable ante cierta acción cuando ésta puede causar un perjuicio (daño, deterioro o degradación) del acuífero. La vulnerabilidad sería una medida cualitativa o cuantitativa, en general expresada mediante un índice sin dimensiones, de la mayor o menor facilidad con que se puede infligir ese perjuicio (Sernageomin, 2006). Para la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH), la vulnerabilidad es definida como una propiedad intrínseca de un sistema de agua subterránea que depende de la sensibilidad de éste frente a impactos humanos o naturales.

En la **Figura 5** se muestra un mapa con las categorías de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos de la VI Región. En el estudio (Sernageomin, 2006) se utilizaron dos metodologías: GOD y SGFRA-BGR. El método GOD estima la vulnerabilidad de un acuífero considerando los parámetros “tipo de acuífero o modo de ocurrencia del agua subterránea”, “litología de la zona no saturada”, y la “profundidad del agua subterránea”. El método SGFRA-BGR considera “permeabilidad del suelo orgánico o agrícola en superficial”, “litología de cada estrato en la zona no saturada”, “espesor en metros de cada estrato hasta la zona no saturada” y “tasa de percolación o recarga al acuífero”.

Los grados de vulnerabilidad obtenidos se dividen en las siguientes categorías:

- **Extrema:** vulnerable a la mayoría de los contaminantes del agua, con impacto rápido en muchos escenarios de polución.
- **Alta:** vulnerable a muchos contaminantes (a excepción de aquellos fuertemente absorbidos o rápidamente transformados) en muchos escenarios de polución.
- **Moderada:** vulnerable a algunos contaminantes, pero sólo cuando hay descargas continuas o lixiviados.
- **Baja:** sólo vulnerable a contaminantes conservativos, en el largo plazo, cuando son descargados continuamente.
- **Nula:** capas confinantes presentes, sin flujo vertical de agua subterránea de importancia.

Resulta relevante señalar que *“en el largo plazo todos los acuíferos son vulnerables a contaminantes persistentes en el tiempo y no degradables, inclusive aquéllos que presentan una baja vulnerabilidad a la contaminación. Estos últimos tienden a ser los más difíciles de limpiar una vez contaminados, por lo que no existen sectores en el acuífero en los que el agua subterránea no se vea afectada por la presencia de contaminantes conservativos y persistentes”* (Sernageomin, 2006).

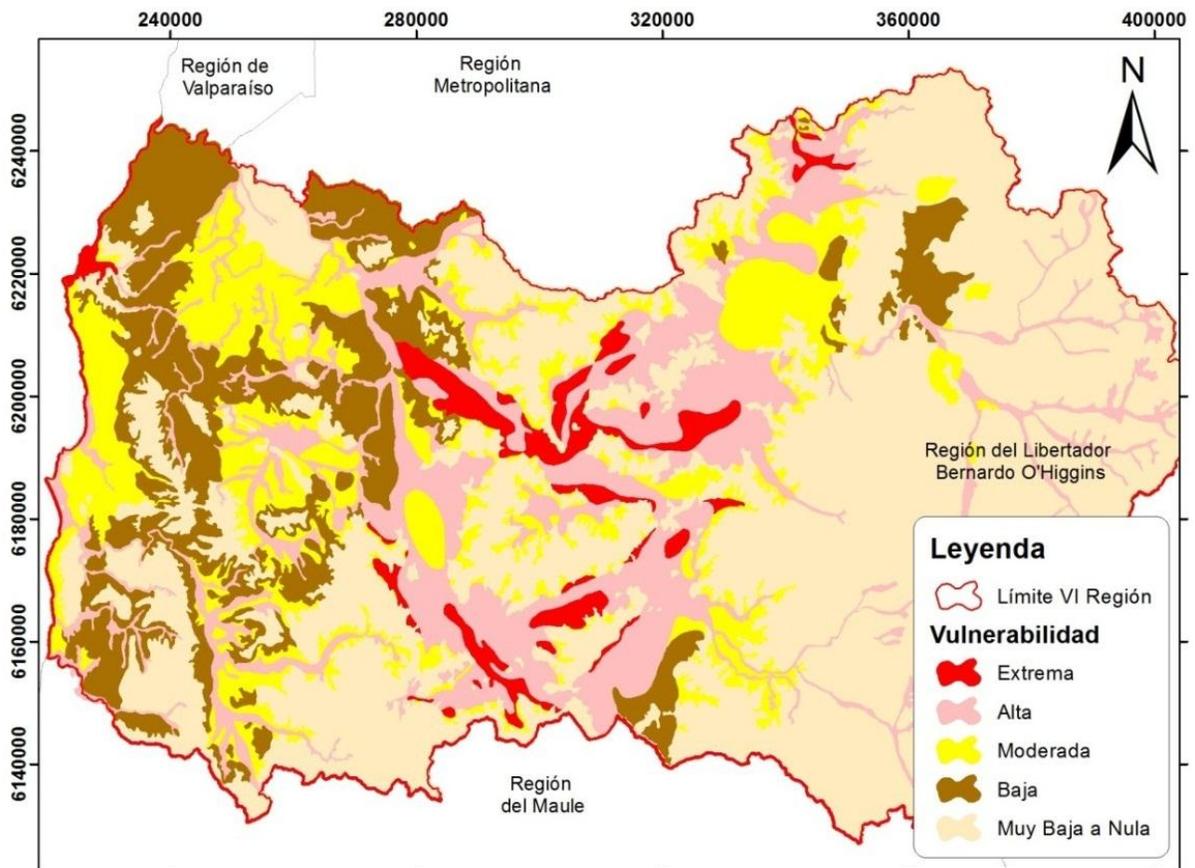


Figura 5: Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en la VI Región (Sernageomin, 2006; escala del estudio: 1:500.000).

Como se observa en la **Figura 5** las zonas de mayor vulnerabilidad se encuentran alrededor de los flujos de escorrentía y en las zonas costeras. Mientras que las zonas dominadas por rocas intrusivas, volcánicas, y sedimentarias volcánicas presentan baja vulnerabilidad.

5. Metodología

5.1. Selección de pozos para el muestreo de aguas subterráneas

Para la selección de los pozos se utilizaron las recomendaciones dadas en el Diagnóstico de calidad de aguas subterráneas de la VI Región realizado en el año 2015, dentro de las cuales se pueden mencionar:

1. Implementación de seguimiento de la calidad de aguas subterráneas en aquellos pozos cuyas aguas superaron al menos un parámetro de la norma de agua potable (NCh409/2005).
2. Monitoreo de sectores incluidos en el estudio del 2015 en donde se detectaron concentraciones de nitrato en un rango próximo al máximo permitido para agua potable
3. En el resto de los acuíferos se mantuvo al menos un pozo para la observación de la mantención en el tiempo de la calidad de las aguas subterráneas.
4. Con respecto al punto anterior, algunos pozos fueron quitados del estudio y otros agregados, en función de la factibilidad de realizar las mediciones, es decir, respecto a la disponibilidad, el acceso, entre otros factores.

5.2. Selección de parámetros de calidad de aguas

Con el objetivo de determinar la actual condición físico-química de las aguas subterráneas en los acuíferos de la VI Región, identificar la presencia de sustancias químicas atribuibles a fuentes de contaminación difusa y hacer comparaciones con los datos del año anterior, se seleccionó el mismo conjunto de parámetros del 2015 y se parámetros complementarios que permitiesen caracterizar de un modo más integral la calidad de las aguas (Ver **Tabla 1**).

Tabla 1: Listado de parámetros controlados en las aguas subterráneas de la VI Región.

Categoría	Total de parámetros	Parámetro
Físico-químico (en terreno)	4	Temperatura, pH, conductividad eléctrica., potencial de óxido reducción.
Iones (análisis en laboratorio)	10	Cloruro (Cl), Sodio (Na), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Nitrato (NO ₃), Amonio (NH ₄), Sulfato (SO ₄), Bicarbonato (HCO ₃), Fosfato (PO ₄), Alcalinidad total, Solidos disueltos totales.
Microelementos (análisis en laboratorio)	11	Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Mercurio (Hg), Manganeso (Mn), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Selenio (Se) y Zinc (Zn)
Pesticidas (análisis en laboratorio)	243	2,4D, Aldrin, Acetocloro, Alachlor, Aldrin, Atrazina, Carbófura, Chloropyrifos, Cianazina, Clordano, Clorpirifos Etil, DDD, DDE, DDT, Diazinon, Dichlobenil, Dicofol, Dimethoato, Dieldrin, Dimethoate, Endosulfan, Endosulfan 1, Heptachlore Epoxido Heptacloro, Hexachlorobenzeno, Hexazinona, Kresoxim methyl, Lenacil, etc.

En cuanto a los análisis de iones y pesticidas, éstos fueron analizados por un laboratorio externo (ANALAB) contratado mediante licitación pública ID N°1019-101-LE15. El trabajo contratado para

este estudio incluyó la visita a terreno de 40 pozos en la Región de O'Higgins, la toma de muestras de aguas subterráneas para el análisis de iones y pesticidas y la posterior entrega de informes de análisis en los formatos y plazos establecidos en las bases de licitación. El monto de inversión utilizado para la contratación de estos servicios fue \$20.000.000 (veinte millones de pesos).

5.3. Uso de equipos y materiales

Durante el trabajo en terreno se utilizaron los siguientes equipos:

- Se utilizó el equipo marca Hanna, modelo HI-98129 para la medida de Temperatura, Conductividad eléctrica y Ph.
- Para la medición del potencial óxido reducción se utilizó un equipo marca Hanna, modelo HI 98.121.

Las metodologías analíticas usadas por el laboratorio ANALAB consistieron en el uso del método QUECHERS, de comprobada factibilidad. Las confirmaciones de los resultados positivos se realizaron a través el análisis mediante cromatógrafos acoplados a detectores de masa (GC – MS, HPLC- MS/MS y HPLC-MS)

Equipo:

- Marca: Perkin Elmer
- Modelo: Optima 7300DV
- Rango de Lectura: 0,1 -300 mg/l

Se registraron los siguientes parámetros físico-químicos del agua en los lugares de muestreo:

- Temperatura del agua (°C)
- Conductividad eléctrica del agua (uS/cm)
- pH (unidad de pH)
- Potencial óxido reducción (mV)

Los equipos requeridos y sus sensores fueron calibrados con una frecuencia diaria, para asegurar la calidad de los datos.

Los tres primeros parámetros fueron medidos con equipo marca Hanna, modelo HI-98129.

Temperatura: lectura directa por el equipo. Resolución 0,5(°C)

Conductividad eléctrica: calibrado con patrón de 1413 uS/cm (Hi 7031). Resolución 1.

pH: calibrado con 3 soluciones buffers, valores 4, 7 y 10. Resolución 0,01.

Para la medición del potencial óxido reducción, se utilizó un equipo de marca Hanna, modelo HI 98.121. Resolución ORP 1mV.

5.4. Metodologías Analíticas y Límites de Detección

La metodología empleada por ANALAB para la determinación rutinaria de residuos de un amplio espectro de plaguicidas está acreditada por el INN según NCh-ISO 17025 / 2005 y está basada en metodología oficial norteamericana y europea: Pesticide Analytical Manual (PAM) del FDA (método Luke), Método QUECHERS de comprobada confiabilidad. Las confirmaciones de los resultados positivos se realizaron a través el análisis mediante cromatógrafos acoplados a detectores de masa (GC-MS, HPLCMS/MS y HPLC-MS Trampa de Iones).

Tabla 2: Parámetros medidos y las respectivas metodologías del Laboratorio ANALAB

Parámetro	Metodología de análisis
Cloruro	Metodología ME – 28 – 2007. Manual SISS. Método volumétrico.
Nitrato	Método 4.500 – NO ₃ – B. Standard Methods, 22th. Ed. 2012. Método espectrofotométrico.
Amonio	Método ME – 27 – 2007. Manual SISS. Método electrodo específico.
Sulfato	Metodología ME – 30 – 2007. Manual SISS. Método gravimétrico.
Bicarbonato	Método 2320 – B. Standard Methods. 22th Ed. 2012. Método volumétrico.
Alcalinidad	Método 2320 – B. Standard Methods. 22th Ed. 2012. Método volumétrico
Sólidos disueltos totales	ME – 31 – 2007. Manual SISS. Método gravimétrico.
Metales (Na, K, Ca, Mg, P)	ICP.

Cabe señalar que las metodologías utilizaron un límite de detección igual a 0,003 mg/L (3 µg/L).

Las metodologías utilizadas por el Laboratorio Ambiental de la DGA corresponden a las siguientes:

Tabla 3: Parámetros medidos y las respectivas metodologías del Laboratorio Ambiental de la DGA

Parámetro	Metodología de análisis
Arsénico	Método 3114 – B. Standard Methods. 22th Ed.
Selenio	Método 3114 – B. Standard Methods. 22th Ed.
Mercurio	Método 3112 – B. Standard Methods. 22th Ed.
Cadmio	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Cobalto	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Cobre	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Fierro	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Manganeso	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Níquel	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Plomo	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.
Zinc	Método 3111 – B. Standard Methods. 21th Ed.

5.5. Selección del período y frecuencia de muestreo

Se consideró 1 muestreo (frecuencia anual) para así evitar las variaciones producidas naturalmente por la estacionalidad y medir los cambios relativamente a largo plazo. Se mantuvo el periodo de muestreo (entre Octubre y Noviembre) para así poder comparar con el año anterior.

5.6. Preparación del trabajo en terreno

Las actividades incluidas dentro de los preparativos de las labores en terreno fueron las siguientes:

- Informar, coordinar y retroalimentar la selección de posibles puntos de muestreo con los profesionales de la Dirección Regional de Aguas VI Región.
- Contactar a los responsables del acceso a los pozos y coordinar el día y hora de visita.
- Revisar rutas de acceso a los distintos puntos y programación de los listados de pozos a visitar cada día.
- Elaborar e imprimir fichas para el registro de datos levantados en terreno.
- Preparar materiales necesarios para la toma de muestras y mantención de éstas en terreno.
- Coordinar el correcto ingreso de muestras al Laboratorio Ambiental de la DGA, de acuerdo con el instructivo LADGA-5.8-01 Procedimiento Ingreso de Muestras.

En las actividades en terreno participaron:

- Dirección Regional de Aguas, Región de O'Higgins – MOP.
- Laboratorio ANALAB.

La metodología de muestreo se realizó de acuerdo con los estándares de la Norma chilena NCh 411/11 (Guía para el muestreo de aguas subterráneas)

5.7. Análisis y presentación de resultados químicos

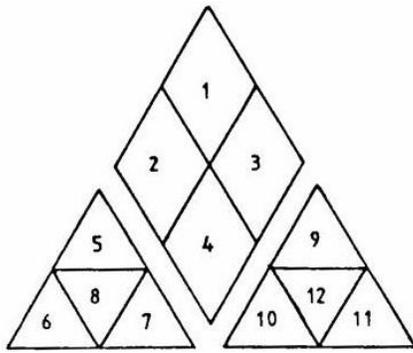
La calidad de los resultados de los análisis químicos de iones fueron verificados mediante el cálculo del balance iónico. Este cálculo considera la sumatoria de cationes y aniones expresados en unidades de miliequivalentes/litro (meq/L). Para aguas con una conductividad eléctrica entre 200 y 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se considera admisibles errores cercanos al 10% (Custodio y Llamas, 1996).

$$Error(\%) = 200 \cdot \frac{\sum \text{cat iones} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cat iones} + \sum \text{aniones}}$$

Para la presentación de los resultados se utilizaron las siguientes gráficas:

- Parámetros físico-químicos medidos en terreno: gráficas de bolas sobre cartografía.
- Iones mayoritarios: diagrama de Stiff-modificado y diagrama de Piper. Para su construcción se utilizó el software EASY QUIM v5.0 (2012).
- Microelementos: gráficos de barra comparando con estándares de calidad de agua para consumo humano (NCh 409/2005).
- Pesticidas: gráficos indicativos de ausencia o presencia de pesticidas en cada muestra.

La interpretación de los diagramas de Piper (**Figura 6**) se realizó acorde con la siguiente clasificación de las aguas que considera la distribución porcentual de cationes y aniones.



1. Aguas sulfatadas y/o cloruradas, cálcicas y/o magnésicas.
2. Aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas.
3. Aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas.
4. Aguas bicarbonatadas sódicas.
5. Aguas magnésicas.
6. Aguas cálcicas.
7. Aguas sódicas.
8. Aguas magnésicas, cálcicas y sódicas.
9. Aguas sulfatadas.
10. Aguas bicarbonatadas.
11. Aguas cloruradas.
12. Aguas sulfatadas, bicarbonatadas y cloruradas.

Figura 6: Clasificación de los diversos tipos de agua según diagrama de Piper.

Para la identificación de cambios en las aguas subterráneas atribuibles a fuentes de contaminación difusa se consideraron las concentraciones de nitrato con magnitud igual o mayor a 30 mg/L.

5.8. Cálculo de Índice de Calidad

Como se observa en la **Figura 7**, muchos pasos de la metodología original³ se obviarán, entre ellos los pasos iniciales de rasterización. Es por lo anterior que los resultados finales serán puntuales de cada pozo y por lo tanto, no se generarán valores continuos de los Índices de calidad en toda la región.

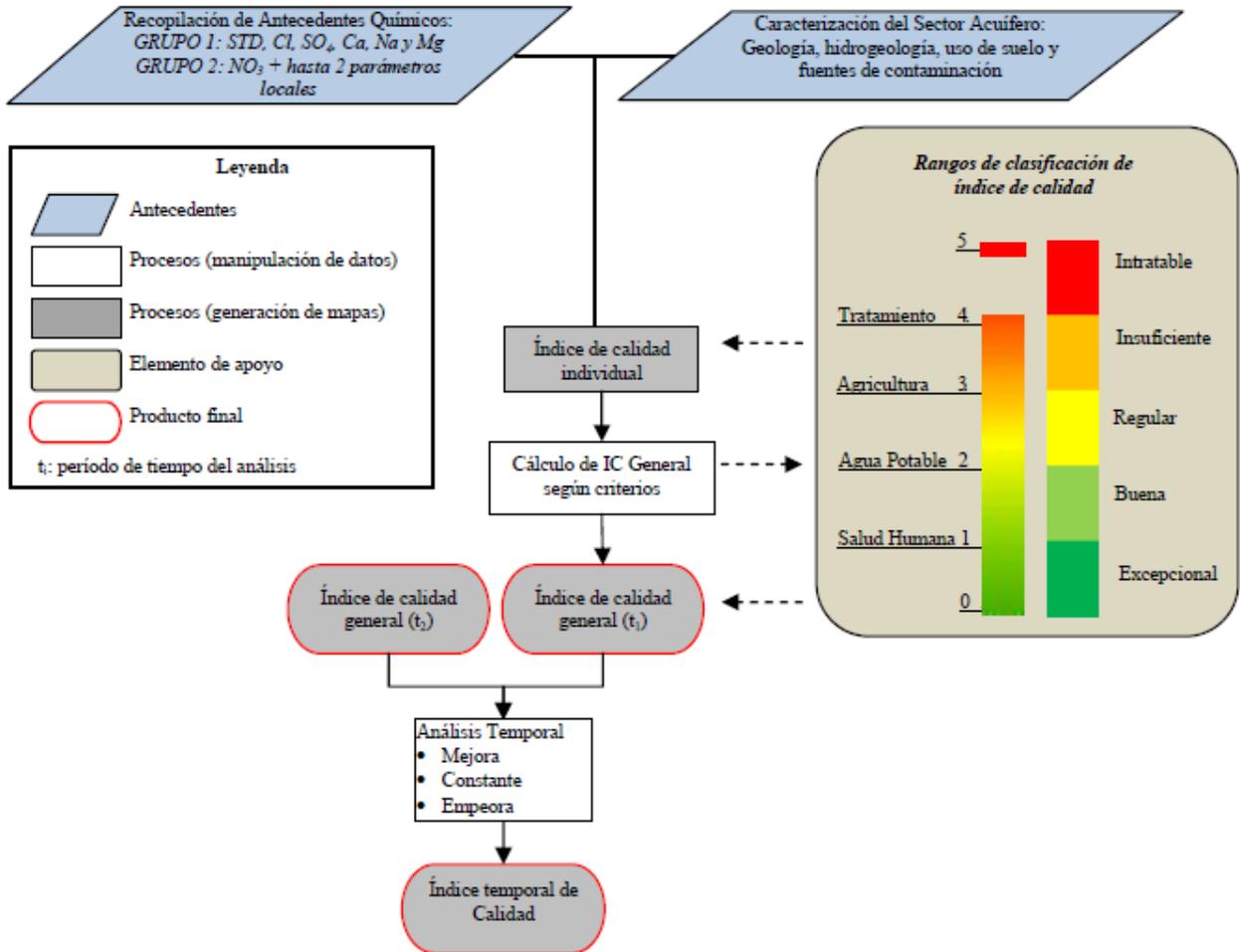


Figura 7: Esquema y diagrama de flujo de metodología.

Cabe destacar que en la metodología, a diferencia del año 2015, se realizó el análisis temporal. Así, además de calcular los índices de calidad individuales y el general, se puede estudiar la evolución de los sectores acuíferos analizados previamente. Así, se concluye cualitativamente si la calidad de las aguas subterráneas ha mejorado o empeorado. Por ejemplo, un acuífero considerado actualmente como Bueno se puede identificar un grado de empeoramiento si el año anterior se encontraba Excepcional, para resaltarlo como potencial acuífero a gestionar (implementación de medidas para frenar el empeoramiento).

³ <http://documentos.dga.cl/COA5168v1.pdf>

5.8.1. Índice de calidad individual por parámetro

Este trabajo se debe realizar con programas que permitan manipular y operar con gran número de celdas, por ejemplo Excel.

El índice de calidad de un pozo, se obtiene mediante la interpolación lineal entre las condiciones límites de cinco clases de calidad (C1, C2, C3, C4 y C5) y los valores de corte (VC1, VC2, VC3, VC4 y VC5), tal como se muestra en la **Figura 8** y en la **Tabla 4**.

Tabla 4: Relación entre clases de calidad y valores de corte

Índice de calidad (IC)	Valor de corte (VC)
C1 Excepcional	VC1 Según Indicaciones de OMS respecto a la calidad de agua de uso humano.
C2 Buena	VC2 Norma Chilena con respecto a calidad de aguas.
C3 Regular	VC3 Norma para actividad agrícola, y norma chilena de riego.
C4 Insuficiente	VC4 Puede ser tratada para alcanzar la calidad de agua potable definida por la norma establecida.
C5 Intratable	VC5 Aguas que no se pueden tratar. De ser posibles serían mediante procesos muy costosos o complejos.

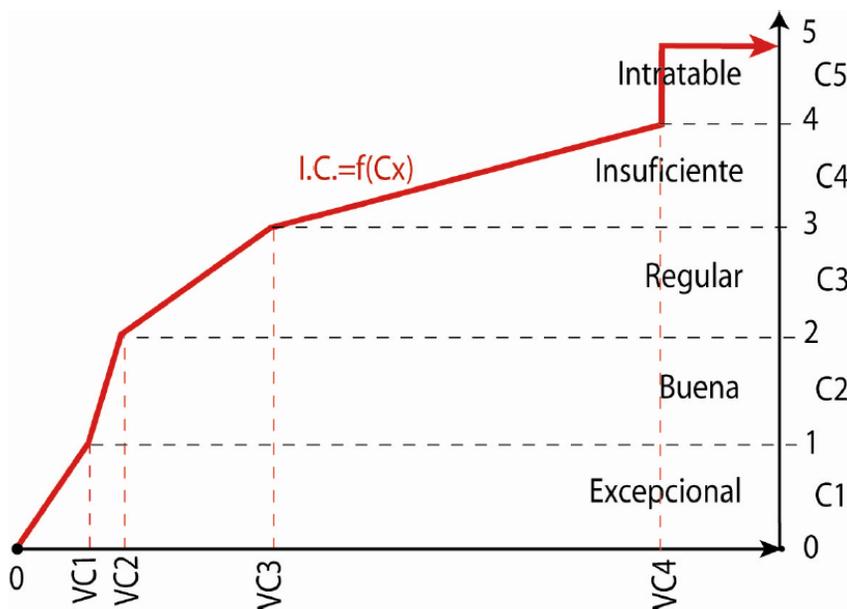


Figura 8: Cálculo de índice de calidad mediante interpolación lineal entre clases.

Para más detalle se recomienda revisar el Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos (DGA 2009).

En el caso de este estudio, los valores de cada clase dependen de los valores de corte mostrados en la **Tabla 5** para cada componente químico

Tabla 5: Definición de clases de calidad de agua

N°	CLASE	Cloruro	Sulfato	Calcio	Sodio	Magnesio	Nitrato	Arsénico
1	Excepcional	<= 250	<= 250	<= 100	<= 200	<= 100	<= 10	<= 0,01
2	Buena	<= 400	<= 500	<= 200	<= 200	<= 125	<= 50	<= 0,01
3	Regular	<= 1064	<= 961	<= 401	<= 920	<= 250	<= 133	<= 0,10
4	Insuficiente	<= 1600	<= 10000	<= 4000	<= 6000	<= 2500	<= 200	<= 4,00
5	Intratable	> 1600	> 10000	> 4000	> 6000	> 2500	> 200	<= 4,00

5.8.2. Cálculo e interpretación del Índice de calidad general

Una vez que se dispone el Índice de calidad (IC) individual de cada parámetro es posible obtener el IC general del sector acuífero. Se definió que los criterios para definir el IC general dependieran principalmente de los elementos químicos que, de acuerdo a la norma chilena de agua potable vigente (INN), afecten a la salud humana y busquen reflejar que la calidad del acuífero esté definida por el parámetro de peor calidad. Los criterios se presentan en la **Tabla 6:** Criterios para establecer el IC general y se aplican para cada celda del sector acuífero de acuerdo a la interpolación generada.

Tabla 6: Criterios para establecer el IC general

Condición IC individual	Resultado IC general	Expresión
Si existe un parámetro con IC Intratable	IC general es Intratable	$\text{Si } IC_{individual} > 4$ $IC_{general} = 5$
Si alguno de los parámetros que afectan la salud humana, según NCh409, presentan IC Bueno, Regular o Insuficiente	IC general es el peor IC individual de todos los parámetros	$\text{Si } 1 < IC_{individual} \leq 4$ $IC_{general} = \text{Max}(IC_{individual})_{i=\text{parámetro}}$
Si todos los parámetros que afectan la salud humana, según NCh409, presentan IC Excepcional.	IC general es el promedio del IC individual de todos los parámetros	$\text{Si } 1 \geq IC_{individual}$ $IC_{general} = \frac{\sum_{i=\text{parámetro}} IC_{individual}}{n^{\circ} \text{ parámetros}}$

A partir de lo anterior se obtiene un valor para el índice de calidad general del sector acuífero en el rango continuo entre 0 y 5. Sin embargo, para efectos de la visualización se utiliza una escala discreta de las cinco clases establecidas. La interpretación de la calidad según el IC general está definida en base a los criterios utilizados para su determinación, es decir, los parámetros que afectan la salud humana y/o que presenten la peor calidad química. Para mayor información se recomienda revisar el Diagnóstico y clasificación de sectores acuíferos, 2009.

6. Resultados

6.1. Descripción general de las actividades en terreno y laboratorio

6.1.1. Toma de muestras

Los 40 pozos muestreados, actividad que se realizó en el transcurso del mes de Octubre de 2015, fue un trabajo abordado por personal calificado de ANALAB, con amplia experiencia en este tipo de actividades, durante el período de un mes, en semanas corridas.

La totalidad de los pozos muestreados corresponden a pozos utilizados para abastecimiento de la población rural (Programa Agua Potable Rural – APR, de la Dirección de Obras Hidráulicas).

Los pozos seleccionados provinieron de un acuerdo tomado con Inspección Fiscal de la DGA.

Previamente al muestreo se verificó el cumplimiento de las condiciones mínimas que aseguren la calidad de las muestras.

La DGA gestionó la autorización previa para el acceso y que los pozos dispusieran de un equipo de bombeo y una llave o válvula para recoger la muestra de agua cruda desde la superficie.

Se mantuvo un estrecho contacto con los encargados de APR para la confirmación de lugares muestreados, fechas de muestreo, imponderables de última hora para efectuar algún muestreo y eventuales cambios de algunos pozos a muestrear.



Instrumento en Idahue San Vicente



Paredones



Indura Graneros



Pueblo Hundido



Trabajo de laboratorio



Trabajo de Laboratorio

Figura 9: Fotografías de trabajo de terreno.

6.2. Distribución de los puntos de muestreo

Los pozos 40 muestreados se distribuyeron entre las provincias de Cachapoal (22), Colchagua (11) y Cardenal Caro (7), abarcando 26 comunas en total. (Ver **Figura 10**)

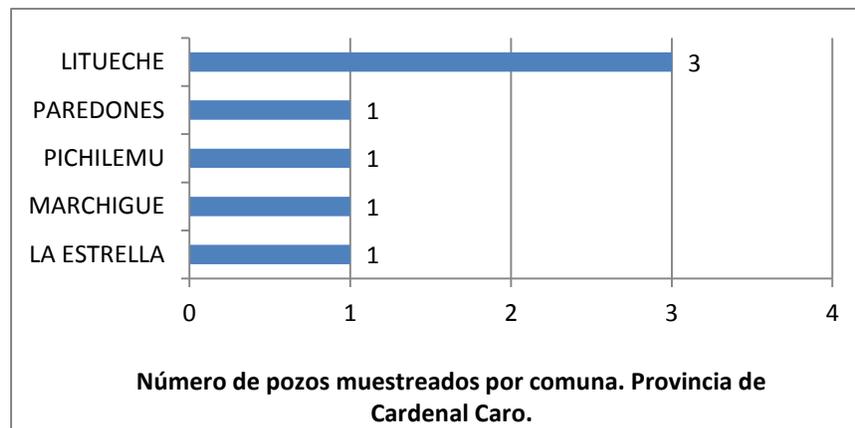
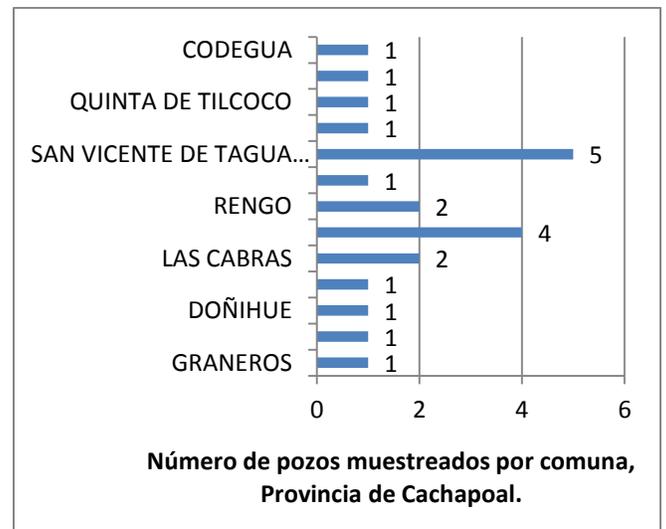
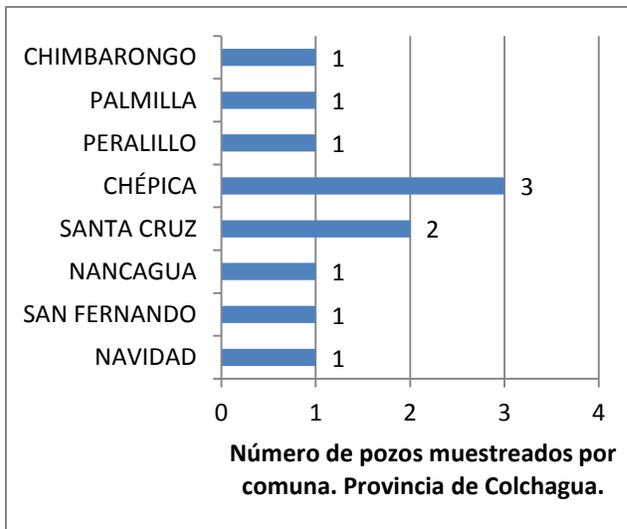


Figura 10: Distribución de puntos de muestreo por comuna y por provincias (Colchagua, Cachapoal y Cardenal Caro).

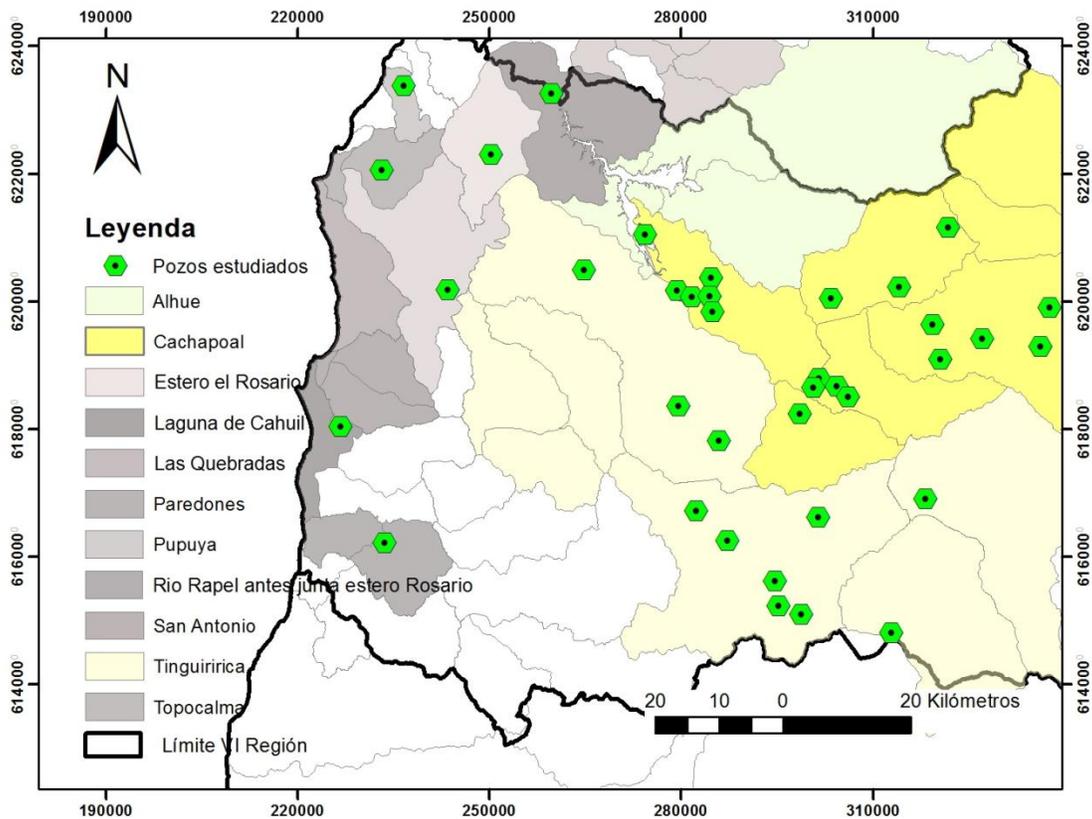


Figura 11: Distribución de pozos muestreados en la VI región.

6.3. Datos registrados en terreno

En la **Figura 12** y **Figura 13** se presentan comparaciones entre los registros de la profundidad de agua medida en terreno (para nivel estático y nivel dinámico).y la profundidad del pozo .

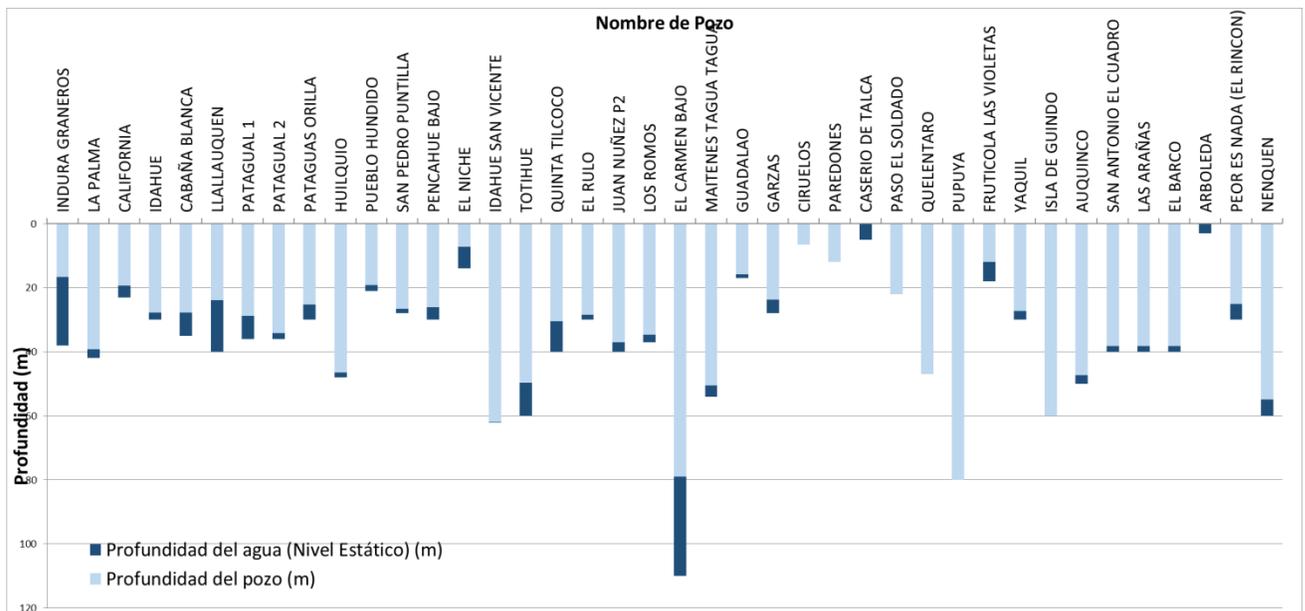


Figura 12: Profundidades de los pozos y sus respectivos registros de profundidad del agua medida en terreno (niveles estáticos)

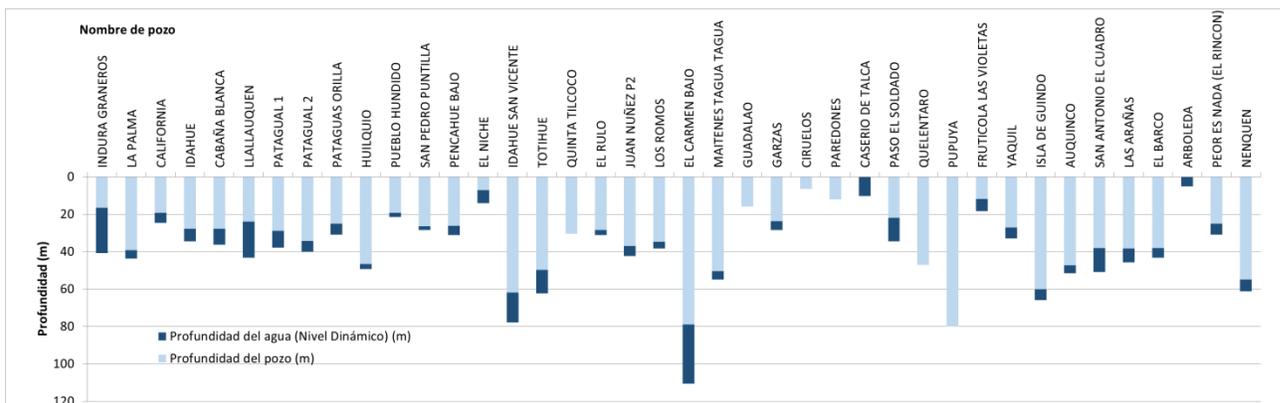
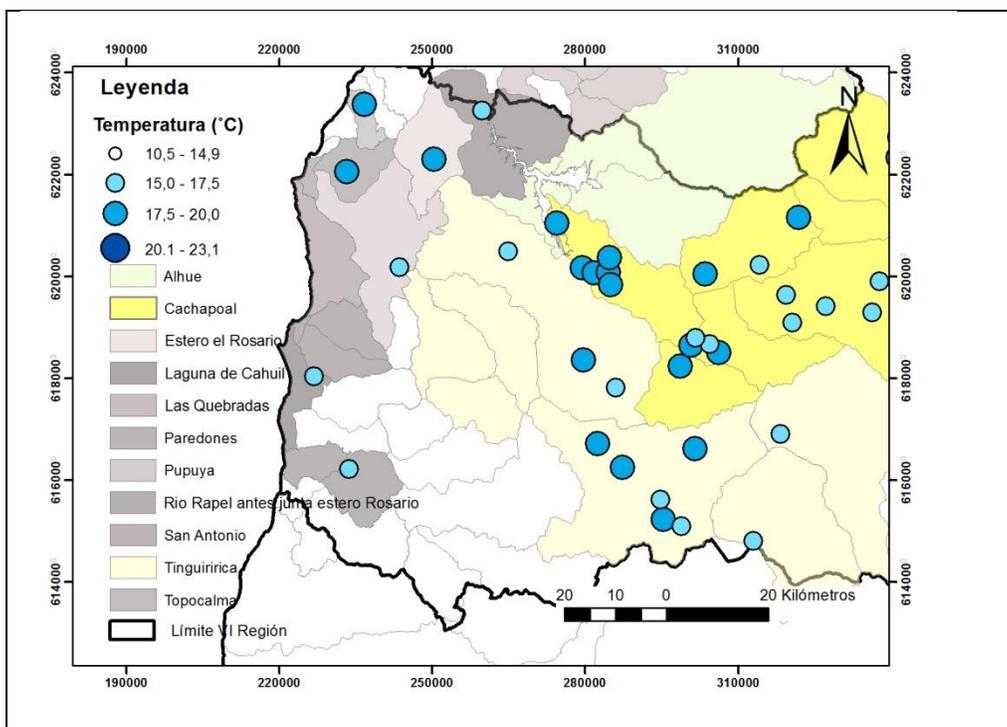


Figura 13: Profundidades de los pozos y sus respectivos registros de profundidad del agua medida en terreno (niveles dinámicos)

Los parámetros físico-químicos medidos en terreno (temperatura, pH, conductividad eléctrica y potencial óxido reducción) se detectaron, en general, dentro de rangos típicos esperables para aguas subterráneas. (Figura 15 y Figura 15)



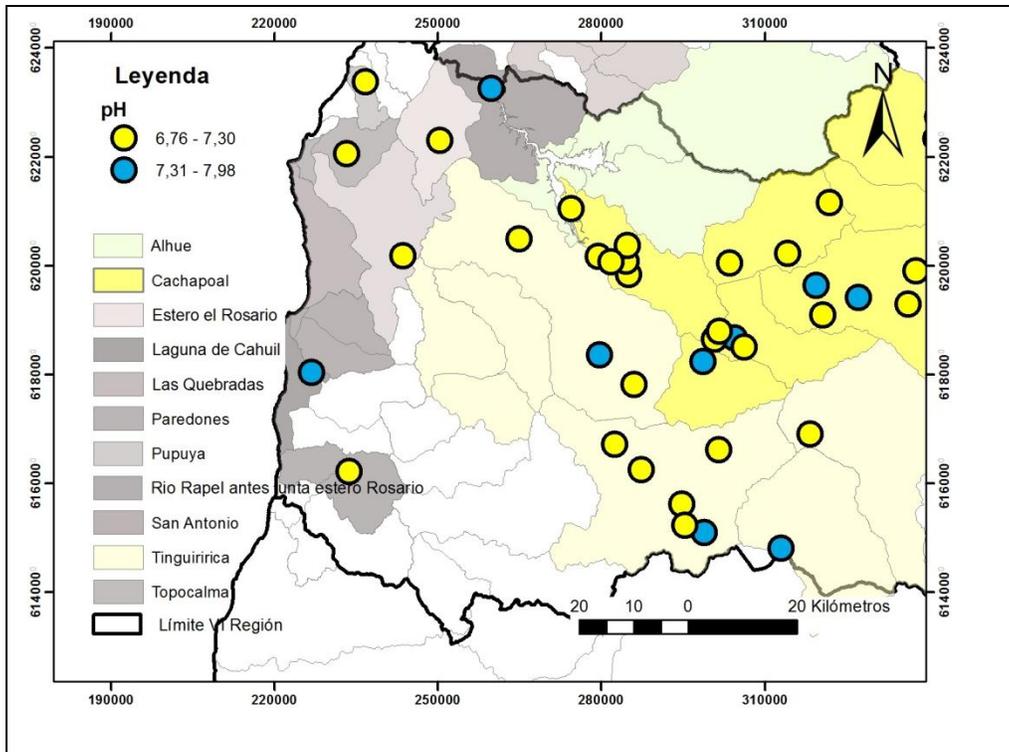


Figura 14: Parámetros físico químicos registrados in-situ en aguas de 40 pozos de la VI Región. Arriba: datos de T; Abajo: datos de pH.

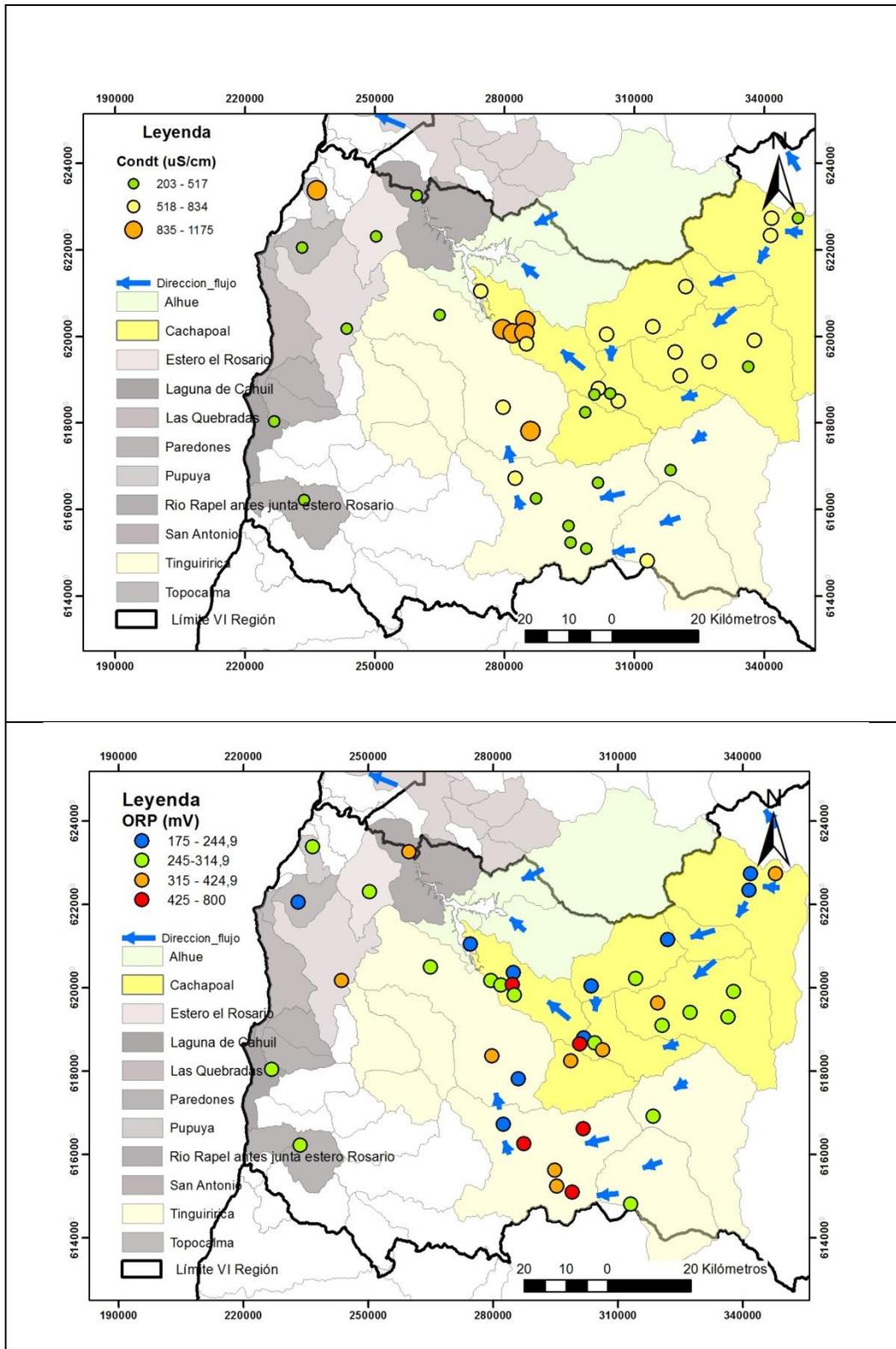


Figura 15: Parámetros físico químicos registrados in-situ en aguas de 40 pozos de la VI Región. Arriba: datos de conductividad; Abajo: datos de potencial de óxido reducción.

6.4. Cálculo del balance iónico

El error de balance iónico fue cuantificado por el laboratorio ANALAB a partir de los resultados de análisis químicos que informaron para cada una de las 40 muestras. Al respecto se detectó 15 casos (37%) con un error menor al 1% y 25 casos (63%) con un error entre 1% y 5%, lo que se observa en la **Figura 16**. En vista de los buenos resultados en el balance, se consideró adecuado utilizar el total de los datos de análisis químicos de las muestras de agua tomadas en los 40 pozos para analizar la situación de contaminación difusa en la región, sin descartar resultados.

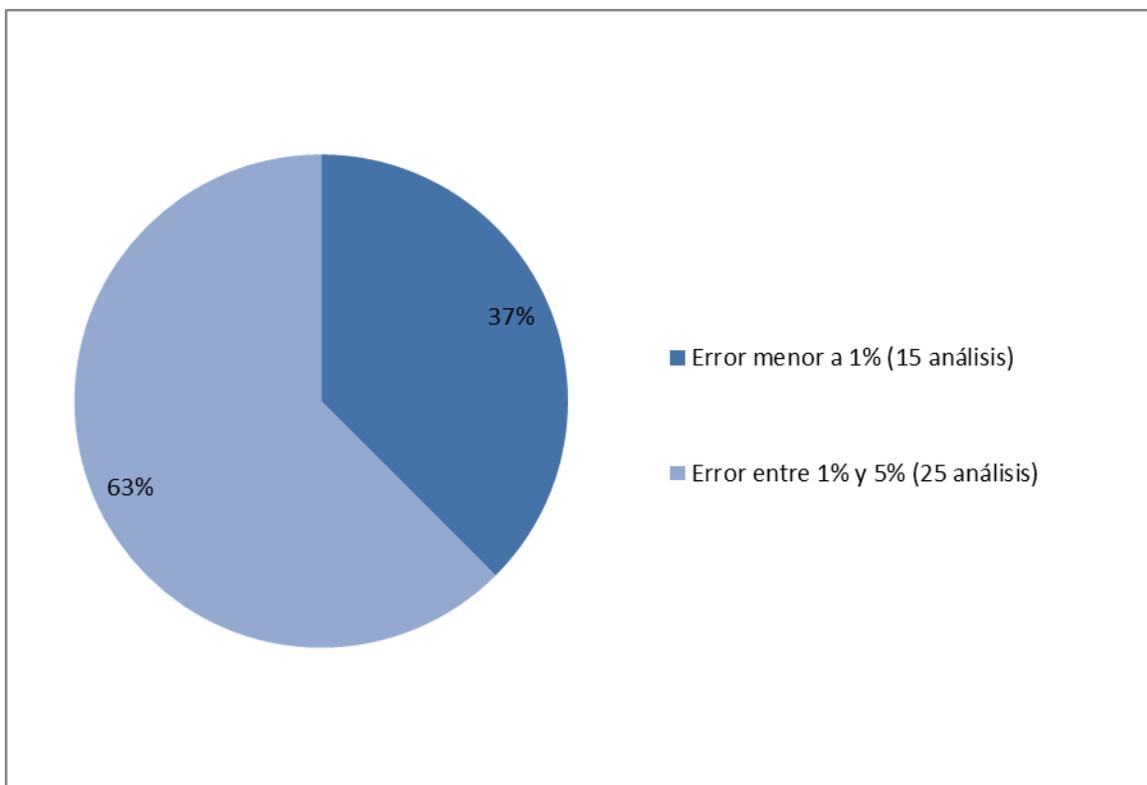


Figura 16: Distribución porcentual del error del balance iónico de las muestras de agua subterránea.

6.5. Concentración de iones

El análisis de iones mayoritarios y sus resultados son presentados mediante diagramas de Stiff-modificado y diagramas de Piper. (**Figura 18**, **Figura 19** y **Figura 20**)

Una primera interpretación de los diagramas de Stiff-modificado, permite destacar, en la zona central, el incremento en sentido Este-Oeste de la concentración total de iones, lo que, como norma general, se relaciona con un mayor tiempo de permanencia del agua en el terreno. Mientras que en la zona costera se observa una muy baja concentración de iones en comparación con la zona central, debida a que esta zona está dominada por rocas intrusivas y metamórficas. (**Figura 17**)

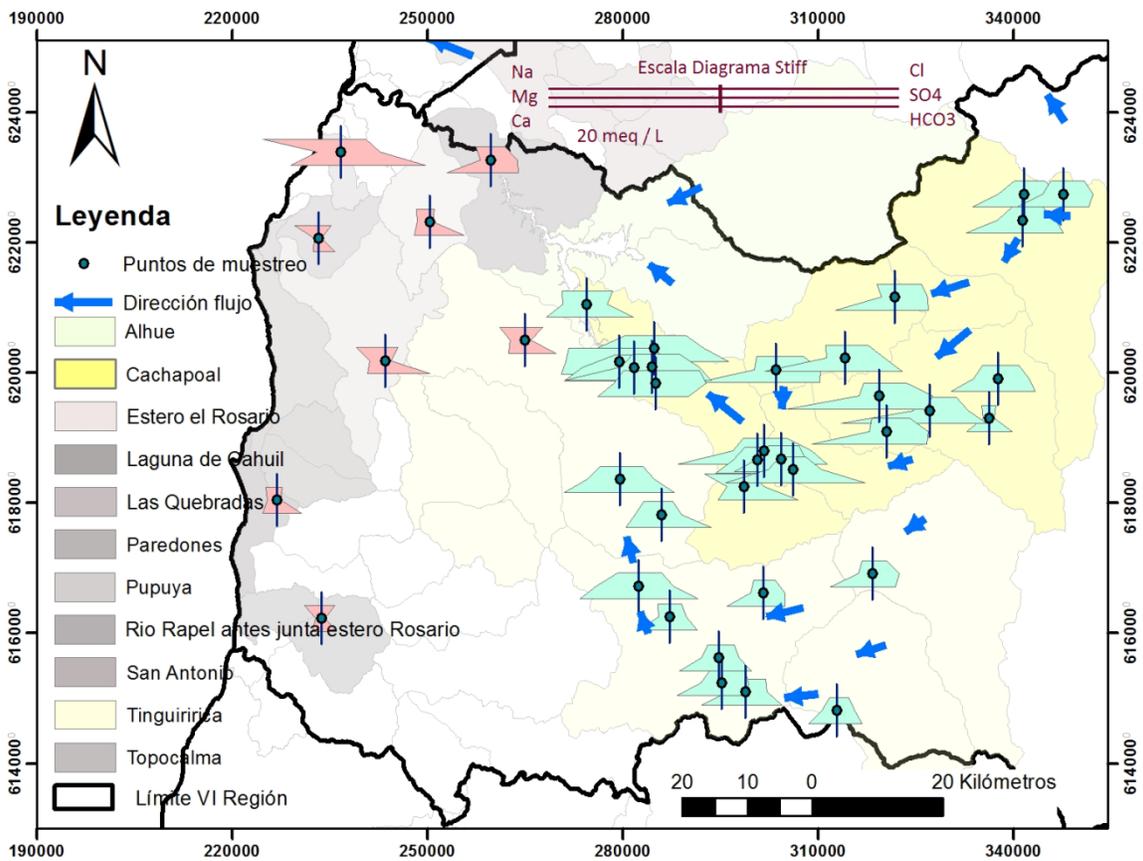


Figura 17: Diagramas de Stiff-modificado para las 40 muestras de aguas subterráneas tomadas en la VI región. En color verde se representan las aguas bicarbonatadas, mientras que en rosados los diagramas de aguas con mayor contenido de sodio y cloro.

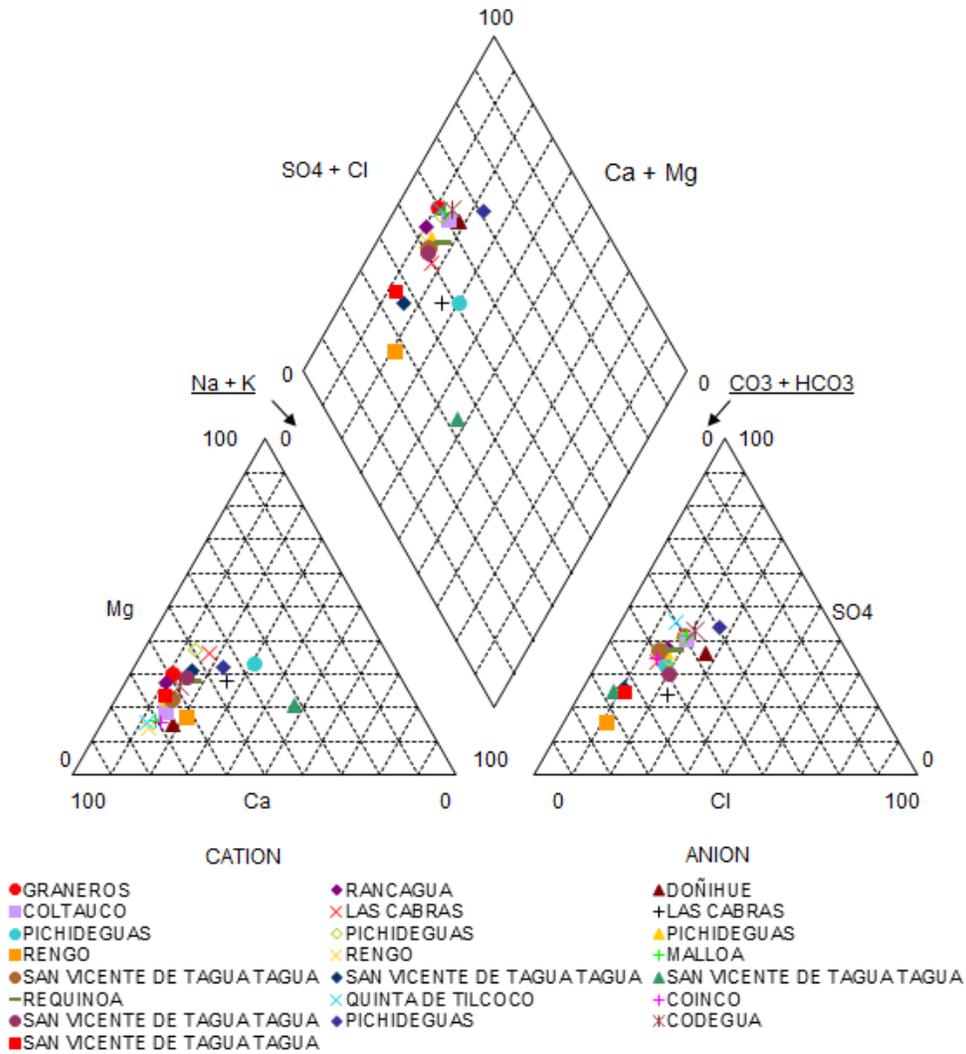


Figura 18: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el sector de la provincia de Cachapoal. Se pueden considerar como bicarbonatadas cálcicas. Geológicamente tienen relación con rocas cristalinas o rocas carbonatadas. Se logra distinguir que las comunas de San San Vicente, Pichidegua, y alrededores presentan valores relativos más altos de Sulfato.

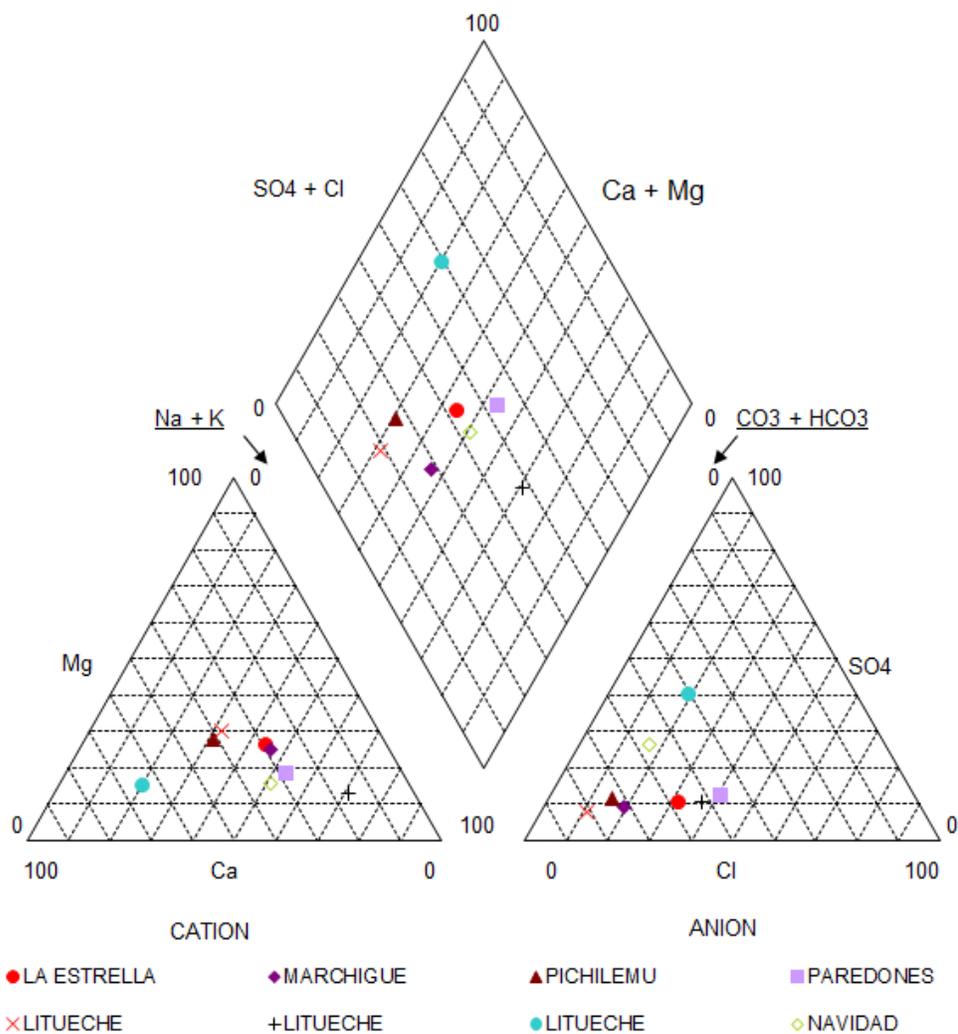


Figura 19: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el sector de la provincia de Cardenal Caro. Se pueden considerar como bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas y sulfatada y/o clorurada sódica y/o magnésica. Geológicamente tienen relación con rocas cristalinas o rocas carbonatadas y con procesos de oxidación de sulfato, salmueras, rocas sedimentarias y agua de mar.

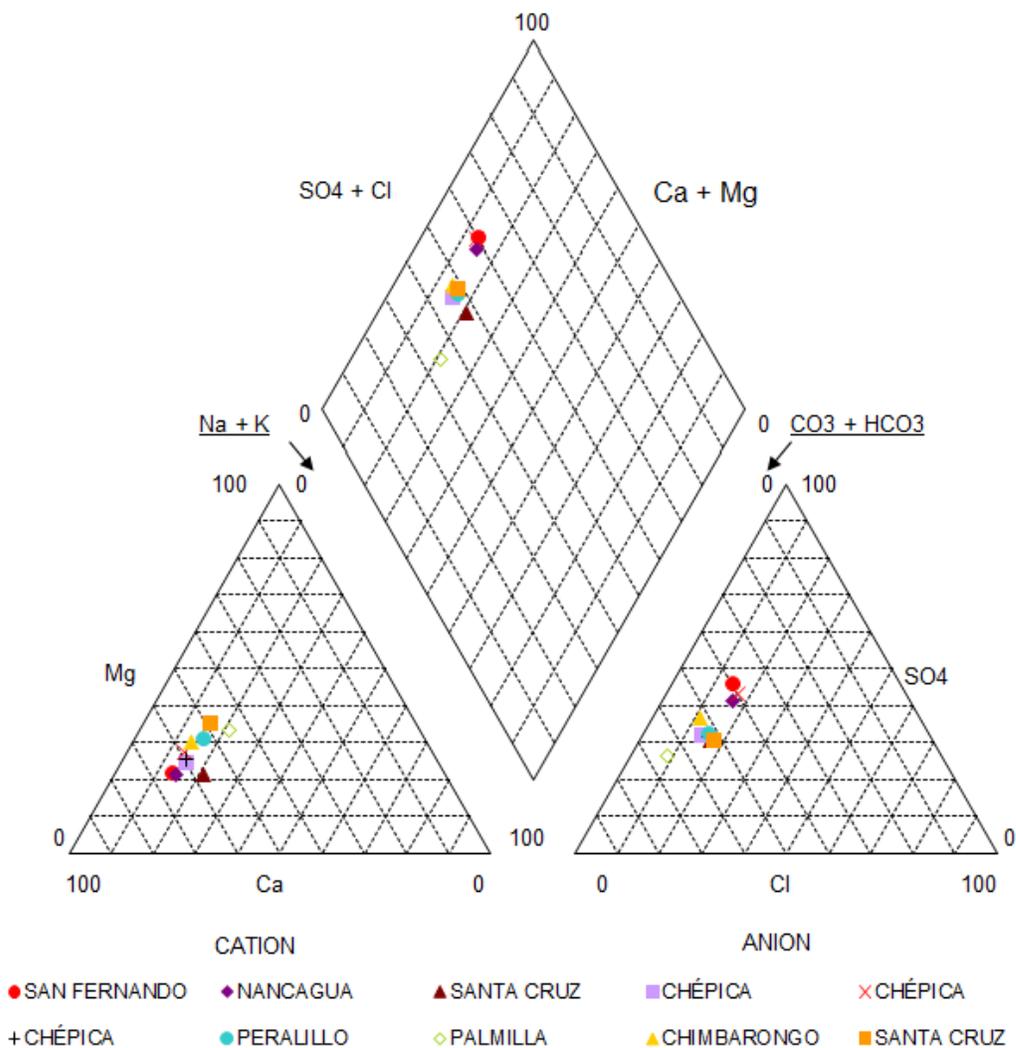


Figura 20: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el sector de la provincia de Colchagua. Se pueden considerar como bicarbonatadas cálcicas. Geológicamente tienen relación con rocas cristalinas o rocas carbonatadas.

6.6. Nitrato

Respecto al origen del nitrato, se puede señalar que una parte importante proviene de fuentes de materia orgánicas como depósitos de estiércol, alcantarillados, fosas sépticas, etc., y de productos de origen químico que se utilizan en agricultura (fertilizantes). El nitrato se puede movilizar fácilmente con el agua, infiltrarse hasta alcanzar el acuífero.

Como referencia se suelen considerar afectadas aquellas aguas que superan o puedan alcanzar la concentración indicada en la norma de agua potable (50 mg/L de NO_3).

En la **Figura 21** se representan los resultados puntuales de nitrato detectado en cada pozo, agrupado en cuatro rangos de concentraciones. A partir de esta figura se **evidencian concentraciones más elevadas en las comunas de Pichidegua, Las Cabras, Quinta de Tilcoco, Chépica, Chimbarongo y en San Fernando**. Estas zonas con altas concentraciones se repiten en

relación al año anterior, lo que indica que no ha evolucionado positivamente y debe ser tratado prioritariamente. Las mayores concentraciones se observan en el acuífero Cachapoal y Tinguiririca. Mientras que aquellos acuíferos costeros o dicho de otra forma, los incluidos en la provincia de Cardenal Caro, presentan en general concentraciones menores a 10 mg/L.

Al considerar el estándar de agua potable (NCh409/2005), se puede concluir que en cuatro pozos la concentración de Nitratos fue superior a 50 mg/L: APR Quinta de Tilcoco 50,9 (mg/lt), Los Romos (64,2 mg/lt), Auquinco (51,3 mg/lt) y San Antonio el Cuadro 59,3 (mg/lt).

Al cruzar los resultados con los mapas de vulnerabilidad (Sernageomin) se observa que los pozos que superaron la norma (NCh409/2005) Los Romos, Auquinco y San Antonio del Cuadro están ubicados en zonas del territorio donde hay una vulnerabilidad extrema, mientras que el pozo Auquinco está ubicado en una zona de vulnerabilidad alta.

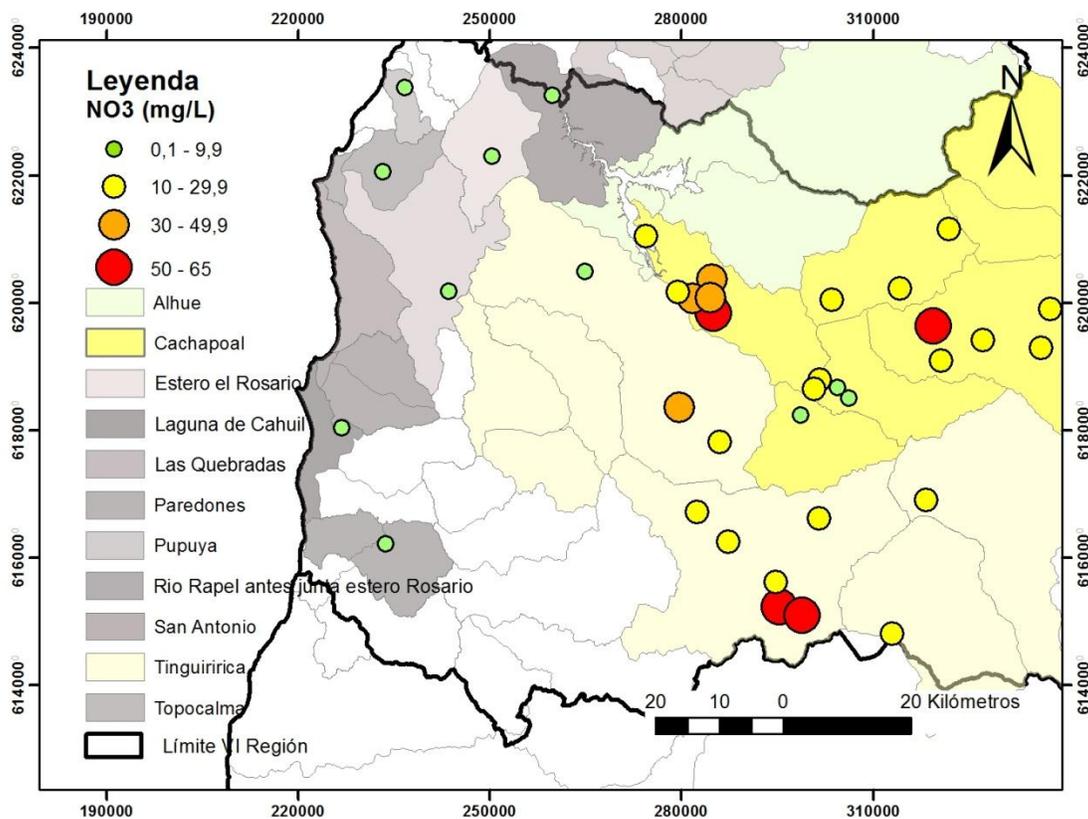


Figura 21: Representación de rangos de concentración de nitrato (NO3) detectado en los pozos muestreados en acuíferos de la VI Región.

6.7. Amonio (NH₄) y Fosfato (PO₄)

Los análisis de Amonio (NH₄) informaron que este ion fue detectado en 20 de los 40 pozos estudiados alcanzando concentraciones entre 0,015 mg/L y 0,06 mg/L.

Los análisis de fosfato (PO₄) detectaron la presencia de este ion en 2 de los 40 pozos, con concentraciones de 0,015 mg/L en el pozo Guadalao en la comuna de La Estrella y de 0,23 mg/L en la comuna de Litueche en el pozo Paso El Soldado. En términos generales, el fosfato en el agua subterránea tiene su origen en los aportes que hace la materia orgánica existente en el suelo y en los aportes de fertilizantes y sustancias de origen industrial que pueden lixiviar hasta llegar al acuífero. Los pozos donde se detectó fosfato presentaron niveles de agua subterránea en general próximos a la superficie.

Si bien Amonio y Fosfato no están incluidos en la Norma de agua potable, altas concentraciones dan cuenta de aportes por contaminación difusa. Por ejemplo, en actividades de agricultura y agropecuarias.

6.8. Microelementos

Los resultados de los análisis de microelementos se resumen en la **Tabla 7**.

Dentro de los resultados, la concentración de Arsénico supera el valor normado para el agua potable (NCh 409/2005) en dos pozos: A.P.R. Idahue San Vicente y A.P.R. Pupuya. El primer pozo tiene una profundidad de 62 m, nivel estático de 0,04 m y nivel dinámico de 15.85 m; este pozo se ubica en lo que se conoce como Laguna Tagua Tagua, Sector Acuífero Laguna San Vicente. Este pozo resultó con concentraciones de As que superan la norma, lo que ocurrió también el año anterior y tiene un grado de vulnerabilidad alta.

Respecto al pozo Pupuya este tiene una profundidad de 80 m se ubica en el Sector Acuífero de Pupuya que posee un grado de vulnerabilidad baja. (**Figura 22** y **Figura 25**)

Tabla 7: Resumen de los resultados de análisis químicos de microelementos en aguas subterráneas de la VI Región.

Analito	Símbolo	Límite de detección de laboratorio (mg/L)	Límite de agua potable (NCh 409/2005) (mg/L)	Límite de agua de riego (NCh 1333) (mg/L)	Observación
Arsénico	As	0,001	0,01	0,1	Sobrepasa norma de agua potable en 2 pozos: APR Idahue San Vicente (0,038mg/L) APR Pupuya (0,013mg/L)
Mercurio	Hg	0,002	0,002	0,001	No detectado
Selenio	Se	0,001	0,01	0,02	No detectado
Cadmio	Cd	0,01 mg/L	0,01 mg/L	0,01 mg/L	No detectado

Cobalto	Co	0,04 mg/L	-	0,050 mg/L	No detectado
Cobre	Cu	0,02 mg/L	2 mg/L	0,2 mg/L	No detectado
Hierro	Fe	0,02 mg/L	0,3 mg/L	5 mg/L	Sobrepasa norma de agua potable en 5 pozos: APR Idahue San Vicente (0,32mg/L) APR Pupuya (1,69mg/L) APR Las Arañas (0,81mg/L) APR Paredones (1,29mg/L) APR Nenquen (0,75mg/L)
Manganeso	Mn	0,02 mg/L	0,1 mg/L	0,2 mg/L	Sobrepasa norma de agua potable en 9 pozos: APR Guadalao (0,15mg/L) APR Idahue (0,33mg/L) APR Pencahue Bajo (0,31mg/L) APR El Niche (0,65mg/L) APR Idahue San Vicente (0,51mg/L) APR Maitenes Tagua Tagua (0,42mg/L) APR Pupuya (0,98mg/L) APR Juan Nuñez P2 (0,52mg/L) APR Nenquen (0,57mg/L) Sobrepasa norma de riego en 8 pozos: APR Guadalao (0,15mg/L) APR Idahue (0,33mg/L) APR Pencahue Bajo (0,31mg/L) APR El Niche (0,65mg/L) APR Idahue San Vicente (0,51mg/L) APR Maitenes Tagua Tagua (0,42mg/L) APR Pupuya (0,98mg/L) APR Juan Nuñez P2 (0,52mg/L)
Níquel	Ni	0,05 mg/L	-	0,2 mg/L	No detectado
Plomo	Pb	0,07 mg/L	0,05 mg/L	5 mg/L	No detectado
Zinc	Zn	0,01 mg/L	3 mg/L	2 mg/L	No detectado

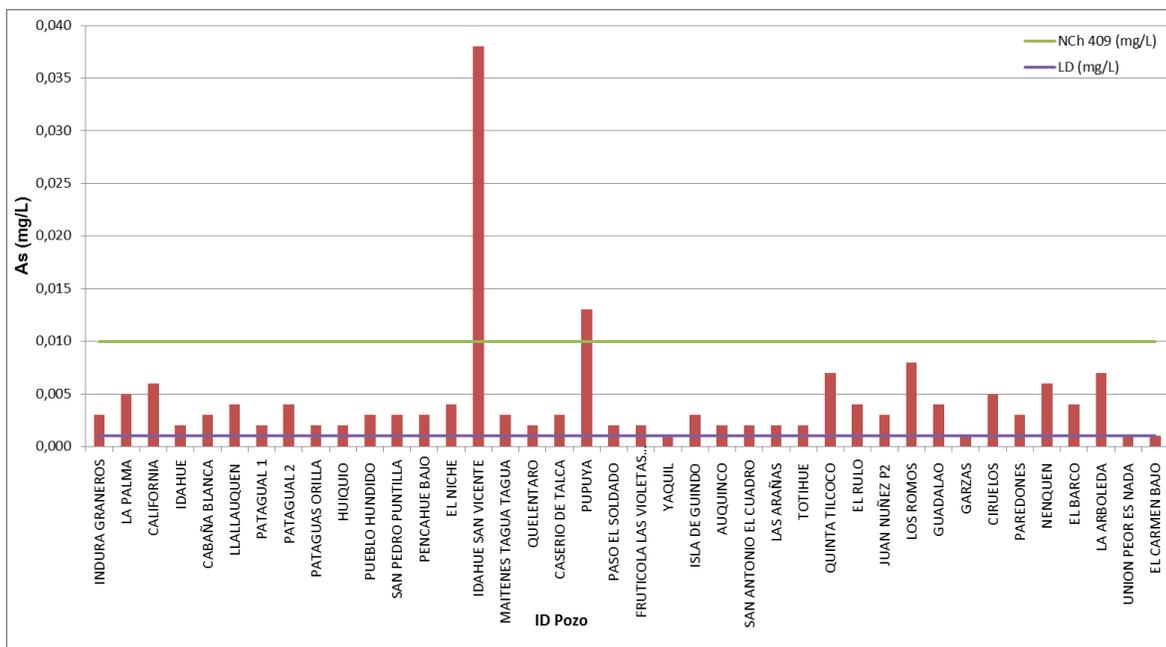


Figura 22: Concentración total de Arsénico detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409).

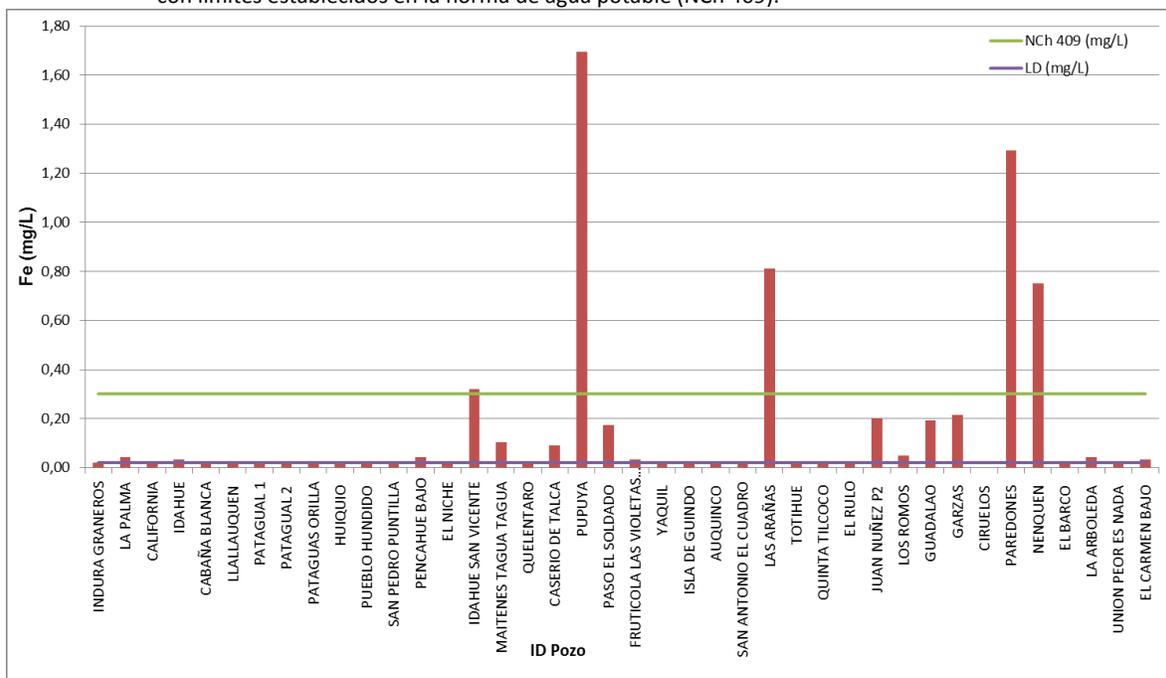


Figura 23: Concentración total de Hierro detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409).

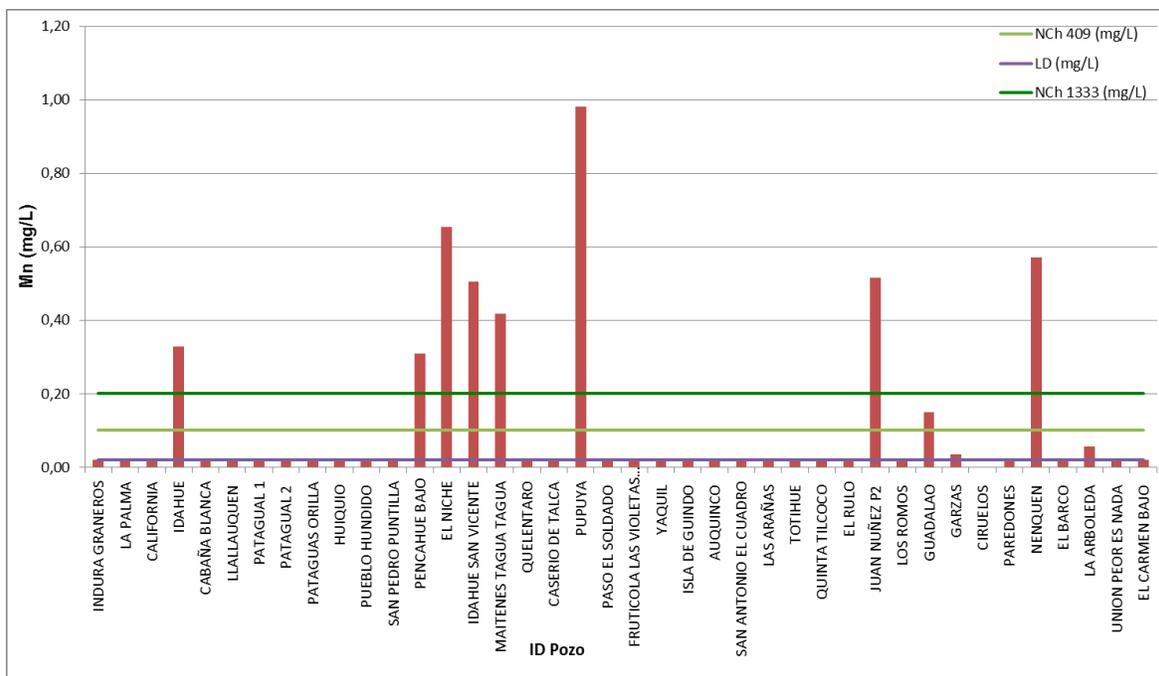


Figura 24: Concentración total de Manganeseo detectada en aguas subterráneas, comparada con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409) y norma de agua para distinto uso (NCh 1333, riego).

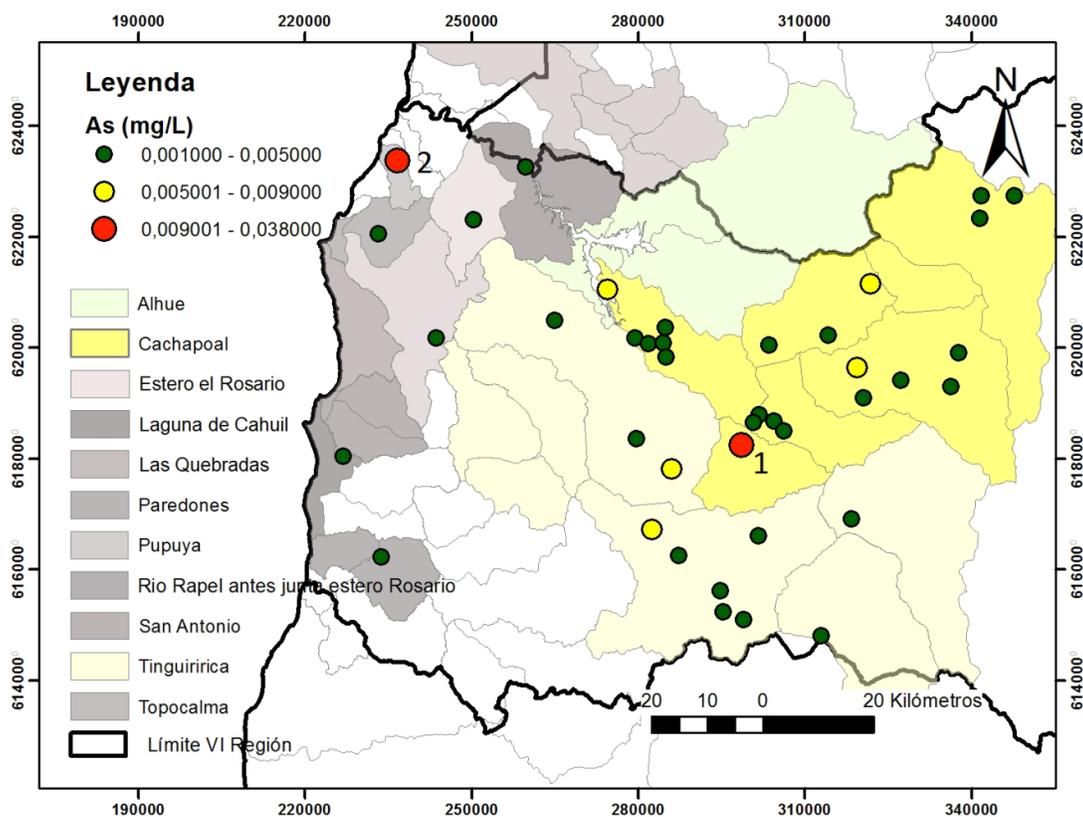


Figura 25: Concentraciones de arsénico por rango detectadas en los pozos muestreados en la VI región. El pozo 1 en rojo corresponde a APR Idahue San Vicente y el pozo 2 a Pupuya.

6.9. Pesticidas

Respecto a los 243 pesticidas analizados resulta relevante señalar que en todos los pozos muestreados el año 2015 el resultado fue “no detectado”. Cabe señalar que las metodologías utilizaron un límite de detección igual a 0,003 mg/L (3 µg/L).

Estos resultados se consideran muy positivos desde el punto de vista de la protección ambiental y de la población que se abastece de los 40 pozos monitoreados en la Región del Lib. Bernardo O’Higgins.

Así también, los resultados plantean el desafío de incrementar las exigencias en los futuros análisis químicos de estas sustancias, apuntando a la reducción de los límites de detección con el fin de descartar la presencia de estas sustancias en concentraciones aún menores (trazas), especialmente en sectores acuíferos con mayor vulnerabilidad a la contaminación.

7. Índice de calidad

Para el desarrollo de índice de calidad general se utilizan los datos medidos durante el año 2015. Se incluyen además los datos medidos durante el 2014 para realizar el análisis del Índice de calidad temporal, aplicándose la metodología basada en los índices generales para evaluar la evolución de la calidad de aguas de los 30 pozos estudiados ambos años.

7.1. Índice de calidad general

En el estudio de índice de calidad se consideraron los parámetros de Cloruro, Sulfato, Calcio, Sodio, Magnesio, Nitrato y Arsénico. Como se mencionó en metodología, el análisis se realizó pozo a pozo, por lo que no se realizó una rasterización en la zona para formar resultados continuos.

Desde el punto de vista general de cada pozo y a la vez de cada parámetro estudiado, solamente 6 pozos clasifican como regulares: Auquinco, Los Romos, Quinta de Tilco y San Antonio El Cuadro debido a clasificar regular el parámetro Nitrato; y a causa de Idahue San Vicente y Pupuya debido a clasificar regular según el parámetro Arsénico.

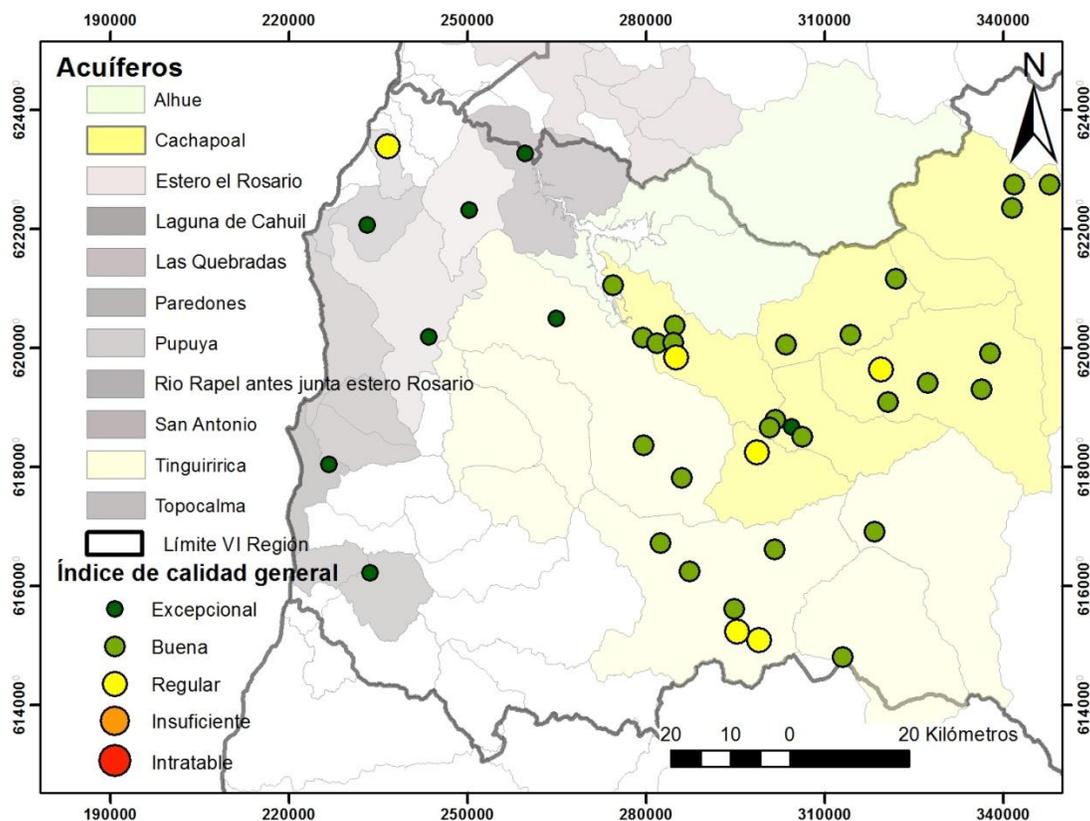


Figura 26: Resultados de Análisis de Índice de calidad de los pozos estudiados en la VI Región.

Algo positivo que se puede obtener es que los índices resultaron con valores cualitativos que permiten reconocer las aguas de los pozos hasta regulares, no resultaron insuficientes ni intratables. A su vez analizando los regulares por si solos, es destacable que esta clasificación se debe a cantidades mayores de Arsénico y Nitrato.

En general, desde el punto de vista espacial, se tiene que los acuíferos costeros presentan la mejor calidad de agua, clasificando como excepcional, lo que implica que ninguno de sus parámetros afecta la salud humana. Por otra parte, en la Depresión Central, salvo los pozos regulares previamente mencionados, las aguas del resto clasifican como buenas, por lo tanto ninguno de los parámetros afecta a la salud humana. Sin embargo, podrían tener concentración elevada que reflejen afectación antrópica o limiten su uso.

7.2. Índice de calidad temporal

Tabla 8: Índices de calidad General de Pozos APR año 2014 y 2015.

N°	NOMBRE	ICA 2014 (POR POZO)	ICA 2015 (POR POZO)
1	ARBOLEDA	Regular	Buena
2	AUQUINCO	Buena	Regular
3	CABAÑA BLANCA	Buena	Buena
4	CALIFORNIA	Buena	Buena
5	EL BARCO	Buena	Buena
6	EL NICHE	Buena	Buena
7	EL RULO	Buena	Buena
8	FRUTICOLA LAS VIOLETAS	Buena	Buena
9	HUILQUIO	Buena	Buena
10	IDAHUE	Buena	Buena
11	IDAHUE SAN VICENTE	Regular	Regular
12	INDURA GRANEROS	Buena	Buena
13	ISLA DE GUINDO	Buena	Buena
14	JUAN NUÑEZ P2	Excepcional	Excepcional
15	LA PALMA	Buena	Buena
16	LAS ARAÑAS	Buena	Buena
17	LLALLAUQUEN	Buena	Buena
18	LOS ROMOS	Regular	Regular
19	MAITENES TAGUA TAGUA	Excepcional	Buena
20	NENQUEN	Buena	Buena
21	PATAGUAL 1	Buena	Buena
22	PATAGUAL 2	Buena	Buena
23	PATAGUAS ORILLA	Buena	Buena
24	PENCAHUE BAJO	Buena	Buena
25	PEOR ES NADA (EL RINCON)	Buena	Buena
26	PUEBLO HUNDIDO	Buena	Buena
27	QUINTA TILCOCO	Buena	Regular
28	SAN ANTONIO EL CUADRO	Buena	Regular
29	SAN PEDRO PUNTILLA	Buena	Buena
30	YAQUIL	Buena	Buena

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, en la cual se exhibe la clasificación de los pozos medidos en los años 2014 y 2015⁴ de este modo se puede decir si las concentraciones de los parámetros usados en el ICA se mantuvieron constantes, disminuyeron o aumentaron.

- ✓ Auquingo empeoró pues aumentó la concentración de Nitrato desde 39,2 a 51,3 mg/L pasando de clase temporal buena a regular.

⁴ Diagnóstico de la calidad de aguas subterráneas de la VI Región, DGA 2015

- ✓ Maitenes de Tagua Tagua empeoró por aumento de concentración de Bicarbonato, Nitrato y Calcio, pasando de clase temporal excepcional a buena.
- ✓ Quinta de Tilcoco empeoró por aumento de concentración de Calcio y Sulfato, pasando de clase temporal buena a regular.
- ✓ San Antonio El Cuadro empeoró por aumento de concentración de Cloro y Nitrato, pasando de clase temporal buena a regular.

Por otra parte, sólo 1 pozo se mantuvo en calidad Excepcional, y la gran mayoría se mantuvo constante en su clasificación de ambos años.

8. Conclusiones

El presente estudio permitió conocer la condición actual de calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos Alhué, Cachapoal, Tinguiririca y los acuíferos costeros, ubicados en la Región del Lib. Gral. Bernardo O'Higgins (VI Región). A partir de los resultados químicos obtenidos se identificaron diferencias entre las aguas de los distintos sectores acuíferos estudiados, permitiendo identificar cambios paulatinos en las características de las aguas subterráneas.

Con respecto a los análisis de iones mayoritarios, se destacan diferencias en las aguas de las diferentes provincias, en el caso de las provincias de Colchagua y Cachapoal, las aguas fueron clasificadas como bicarbonatadas cálcicas, mientras que en Cardenal Caro las aguas fueron clasificadas como cloruradas cálcicas y/o sódicas además de bicarbonatadas cálcicas, lo que indica una influencia de las aguas marinas cercanas a esta provincia.

Se detectaron concentraciones de Nitrato superiores a la norma de agua potable en 4 pozos: Quinta de Tilcoco, Los Romos, Aunquinco y San Antonio el Cuadro.

Dentro de los microelementos, se encontraron concentraciones de As superiores a la norma de agua potable en dos pozos: Idahue San Vicente y Pupuya. En atención al pozo APR Idahue San Vicente, cabe señalar que al igual que el año 2014 la concentración de arsénico durante el año 2015 sobrepasó el estándar de agua potable utilizado como referencia.

Dentro de los sectores acuíferos costeros, Pupuya constituye un caso especial, pues fue el único que resultó con clase regular en el análisis del índice de calidad general.

En cuanto a los pesticidas estudiados, ninguno de ellos fue detectado en este informe, lo que por una parte resulta positivo, mientras que por otra, podría ser un indicador de que para estudiarlos es necesario usar instrumentos con menor índice de detección⁵.

Con respecto al Índice de Calidad General se puede concluir que resulta útil en la clasificación de pozos con respecto a su calidad de aguas. Sin embargo, hay que tener en cuenta los parámetros químicos a partir de los cuales se calcula. Dependiendo de los parámetros químicos utilizados, el índice resulta comparable con índices calculados en momentos anteriores y de este modo resulta efectivo realizar un análisis temporal, es por esto, que si en un periodo anterior se consideró un número restringido de parámetros, en el momento actual habrá que utilizar el mismo número de parámetros, y sólo así resultarán índices comparables.

En la siguiente tabla se presenta un resumen del número de pozos por sector acuífero que superó al menos uno de los parámetros regulados en la norma de agua potable (NCh409/2005). La tabla señala también el número de pozos por acuífero que presentó una concentración de nitrato (NO_3) dentro de un rango de precaución, por cuanto las concentraciones resultaron entre 30 y 50 mg/L de NO_3 .

⁵ Se contrataron las mejores técnicas disponibles para laboratorios que procesan aguas naturales.

Tabla 9: Resumen del número de pozos que superó alguno de los parámetros normados en la NCh409/2005, por sector acuífero. Se indica también el número de pozos que presentó concentraciones de nitrato mayor a lo esperado en aguas subterráneas (>30 mg NO₃/L), pero resultó menor al límite establecido para agua potable (50 mg NO₃/L).

Sector Acuífero	Parámetros que superan la Norma 409/2005				Riesgo de Contaminación antrópica
	As	Fe	Mn	NO ₃	30<mg/lt de NO ₃ <50
Peumo-Pichidegua-Las Cabras				1 pozo	3 pozos
Tinguirica Superior		2 pozos	1 pozo	2 pozos	
Requinoa-Rosario-Rengo-Quinta Tilcoco				1 pozo	
Tinguirica Inferior					1 pozo
Graneros Rancagua					1 pozo
Laguna San Vicente	1 pozo	1 pozo	1 pozo		
Pupuya	1 pozo	1 pozo	1 pozo		
Estero Paredones		1 pozo			
Doñihue - Coinco -Coltauco			1 pozo		
Pelequen-Malloa-San Vicente de Tagua Tagua			4 pozos		
Rio Rapel antes junta estero Rosario			1 pozo		

9. Recomendaciones

- ✓ En cuanto al análisis de microelementos se encontraron concentraciones de Arsénico (As), Hierro (Fe) y Manganeseo (Mn) por sobre la normativa de agua potable NCh 409 (7 pozos). De los pozos que superaron la normativa vigente destacan, los pozos de Pupuya e Idahue San Vicente (As-Fe-Mn), y Nenquen (Fe-Mn). En lo particular es necesario estudiar con mayor profundidad el sector acuífero Pupuya, ya que dentro de los sectores acuíferos costeros fue el único que presentó concentraciones altas en arsénico. Además presentó pH relativamente ácido y alta conductividad, por lo que podría corresponder a un caso especial dentro de esta zona y podría constituir algún problema para el abastecimiento de agua potable en el futuro.
- ✓ En cuanto al índice de calidad de agua aplicado los pozos, aquellos que clasificaron en la categoría “Buena” y “Regular” ver punto 7.2, es recomendable seguir monitoreándolos para evaluar su evolución en el tiempo.
- ✓ Profundizar el análisis en el mediano plazo (próximos 2 años) de los resultados, especialmente en cuanto a la detección de posibles relaciones entre el origen de los contaminantes y la calidad del agua subterránea. En esta línea, resulta relevante considerar antecedentes de los usos de suelo, tipología de cultivos agrícolas, existencia de redes de canales de riego, antecedentes de prácticas de riego, tipología y ubicación de industrias y la cartografía de vulnerabilidad de acuíferos.
- ✓ Para la red de monitoreo de la calidad de las aguas subterráneas en la región, se recomienda enfocar el muestreo en zonas relativamente homogéneas, por ejemplo, zonas con un determinado uso de suelo dominante (urbano, bosque, agrícola, etc.), lo cual posibilitará caracterizar y detectar variaciones espaciales o temporales entre dichas zonas. En este sentido se recomienda agregar a la Red de Monitoreo los pozos que presentaron algún parámetro sobre la normativa de agua potable y aquellos pozos que presentaron riesgo de contaminación antrópica por Nitratos.

Tabla 10: Resumen pozos a incorporar en el seguimiento por parte de la DGA.

Pozo APR	Sector Acuífero	Vulnerabilidad	Frecuencia
Idahue de San Vicente	Laguna San Vicente	Baja	2 veces por año
Los Romos	Peumos-Pichidegua-Las cabras	Extrema	2 veces por año
Pupuya	Pupuya	Baja	2 veces por año
Aunquinco	Tingiririca Superior	Extrema	2 veces por año
Las Arañas	Tingiririca Superior	Extrema	2 veces por año
Paredones	Estero Paredones	Alta	2 veces por año
Nenquen	Tingiririca Superior	Alta	2 veces por año
Quinta del Tilcoco	Requinoa-Rosario-Rengo-Quinta Tilcoco	Alta	2 veces por año
San Antonio el Cuadro	Tingiririca Superior	Extrema	2 veces por año
Juan Nuñez	Pelequen-Malloa-San Vicente de Tagua Tagua	Alta	2 veces por año
Pencahue bajo	Pelequen-Malloa-San Vicente de Tagua Tagua	Alta	2 veces por año
Cabaña Blanca	Peumos-Pichidegua-Las cabras	Extrema	1 vez por año
Patagual 2	Peumos-Pichidegua-Las cabras	Alta	1 vez por año
Pataguas orilla	Peumos-Pichidegua-Las cabras	Extrema	1 vez por año

El Carmen bajo	Graneros Rancagua	Moderada	1 vez por año
El Barco	Tinguiririca Inferior	Moderada	1 vez por año

Los parámetros mínimos a medir son *in-situ*: Cond Eléctrica, pH, Temp, ORP, Metales: As, Fe, Mn, Cu, Zn, Hg. Nutrientes: Nitrato, Amonio y Fosfato. Macroelementos: Sulfato, Cloruro, Calcio, Magnesio, sodio, Potasio, Bicarbonato

- ✓ Para asegurar la calidad de los datos generados, se recomienda seguir llevando a cabo los muestreos de acuerdo con los estándares de la Norma chilena NCh 411/11 (Guía para el muestreo de aguas subterráneas) y realizar los análisis en un laboratorio acreditado bajo la norma chilena NCh-ISO 17.025. Esto permite reducir la incertidumbre de los resultados y contar con datos representativos de la condición del acuífero.
- ✓ Para mejorar la capacidad de detectar la presencia de sustancias contaminantes de origen agrícola, se recomienda evaluar la factibilidad técnica y económica de minimizar los límites de detección en los análisis químicos de pesticidas en las aguas subterráneas.
- ✓ Igualmente, se recomienda revisar la lista de pesticidas a incluir en futuros análisis, ello en atención a enfocar esfuerzos en la detección de sustancias que resultan más probables de encontrarse en las aguas subterráneas. Para tales efectos, puede considerarse el índice GUS u otro similar.
- ✓ Como un criterio general, se recomienda enfocar los muestreos en pozos con la menor profundidad posible y que se encuentren ubicado en sectores que tengan una vulnerabilidad media, alta o extrema de acuerdo a mapa Sernageomin, por ser éstos más sensibles a modificaciones por fuentes de contaminación puntual o difusa existentes en la zona.
- ✓ En cuanto a los parámetros, se recomienda llevar a cabo análisis químicos diferenciados según la ubicación de los pozos, es decir, definir un conjunto de parámetros comunes para toda la red de pozos y realizar análisis específicos (por ejemplo: pesticidas, nitratos o determinados metales) en aquellas zonas con mayor riesgo de alteración por efectos antrópicos.
- ✓ En cuanto a la frecuencia de monitoreo, se debe evaluar la factibilidad de realizar un seguimiento periódico que permita comprender los cambios en la calidad del agua en los acuíferos. En este sentido, resulta esperable que los mayores cambios ocurran en zonas con mayor vulnerabilidad a la contaminación. En principio, los monitoreos podrían realizarse con una periodicidad anual y evaluarse el incremento de esta frecuencia (por ejemplo, estacional) según las necesidades de información y las capacidades técnicas y económicas existentes.
- ✓ Evaluar la factibilidad técnica y económica de extender los muestreos de aguas subterráneas a pozos situados en sectores acuíferos no incluidos en el presente estudio. Para efectos de priorización, se puede incluir sectores acuíferos que presenten una mayor vulnerabilidad a la contaminación o sectores acuíferos con limitación de explotación, por ejemplo Sectores Acuíferos: Estero Lolol, Boyeruca, el Monte, Cardenas Marchigue, y Chimbarongo.

10. Bibliografía

1. Acuña, A. 2005. Presencia de Pesticidas en Fuentes de Agua Potable en Chile. Tesis Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Civil.
2. Charrier, Farías, Maksae. Evolución tectónica, paleogeográfica y metalogénica durante el Cenozoico en los Andes de Chile norte y central e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia e implicaciones para las regiones adyacentes de Bolivia y Argentina. 2005
3. Custodio, E., Llamas, R. 1996. Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Segunda Edición Corregida. Barcelona.
4. Dirección General de Aguas (DGA). 1998. Diagnóstico potencial hídrico acuíferos costeros provincia Cardenal Caro Sexta región. SIT N°49.
5. Dirección General de Aguas (DGA). 2005. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la VIª Región. SDT N°209.
6. Dirección General de Aguas (DGA). 2007. Actualización de la oferta del recurso hídrico subterráneo en el sector acuífero de Codegua, VI Región. SDT N° 245, Agosto 2007.
7. Dirección General de Aguas (DGA). 2009. Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos. Geohidrología Consultores Ltda.
8. Dirección General de Aguas (DGA). 2011. Diagnóstico de Aguas Subterráneas VI Región.
9. Dirección General de Aguas (DGA). 2012. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos.
10. Dirección General de Aguas (DGA). 2013. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos. Ministerio de Obras Públicas.
11. Dirección General de Aguas (DGA). 2013. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Minuta Técnica DCPRH N° 26/2013, "Definición preliminar de una red de monitoreo de contaminación difusa y plaguicidas a monitorear".
12. Godoy, E. et al. 2009. Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, N°118, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Sernageomin. Escala 1:100.000.
13. González, S. 2007. Contaminación Difusa de las Aguas. Publicado en: Revista IniaTierra Adentro, Ed. Noviembre – Diciembre 2007.
14. Hauser, A. 1990. Carta Hidrogeológica de Chile, Hoja Rancagua, VI Región. Sernageomin. Escala 1:250.000.
15. INIA, 2007. Caracterización del Manejo de Herbicidas en Aguas Subterráneas. Boletín N°167, cap. 9, pág. 101-110. Centro Regional de Investigación La Platina.
16. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). 2003. MAPA Geológico de Chile [versión digital]. Subdirección Nacional de Geología. Escala 1:1.000.000.
17. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). 2007. Informe de venta de plaguicidas de uso agrícola en Chile.
18. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). 2006. Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos y sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad: Identificación de zonas críticas.
19. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). 1990. CARTA Hidrogeológica de Chile, Hoja Rancagua VI Región. Hauser, A. Escala 1:250.000.