

**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° 368

SANTIAGO, MAYO 2015

**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**

Profesionales colaboradores

**Dpto. de Conservación y Protección de Recursos Hídricos
Sr. José Ortiz Pozo**

Dirección Regional de Aguas, Región del Lib. B. O'Higgins
Director Regional, Sr. Rodrigo Sanhueza Bravo
Jefe Hidrología, Srta. Carolina Calderón Riquelme

**Ministerio del Medio Ambiente
Dpto. de Recursos Hídricos y Ecosistemas Acuáticos**
Srta. Karin Bardowicks

Estudiantes colaboradores

Camila Lizana, Alumna de Geología, Universidad de Chile.
Joseph Munzenmayer, Alumno de Geografía, Universidad Academia de Humanismo Cristiano.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	3
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
1. RESUMEN	7
2. INTRODUCCIÓN	8
3. OBJETIVO	8
4. ANTECEDENTES	8
4.1. GEOLOGÍA DE LA VI REGIÓN.....	9
4.2. HIDROGEOLOGÍA DE LA VI REGIÓN	11
4.3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SECTORES ACUÍFEROS DE LA VI REGIÓN	13
4.4. VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DE LOS ACUÍFEROS	15
4.5. SITUACIÓN DE EXPLOTACIÓN DE LOS SECTORES ACUÍFEROS	17
5. METODOLOGÍA	18
5.1. SELECCIÓN DE POZOS PARA EL MUESTREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	18
5.2. SELECCIÓN DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUAS	20
5.3. USO DE EQUIPOS Y MATERIALES	21
5.4. SELECCIÓN DEL PERÍODO Y FRECUENCIA DE MUESTREO.....	22
5.5. PREPARACIÓN DEL TRABAJO EN TERRENO	22
5.6. ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS QUÍMICOS.....	23
6. RESULTADOS	24
6.1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS ACTIVIDADES EN TERRENO	24
6.2. DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	26
6.3. DATOS REGISTRADOS EN TERRENO.....	27
6.4. CÁLCULO DE BALANCE IÓNICO.....	29
6.5. CONCENTRACIÓN DE IONES	29
6.6. MICROELEMENTOS.....	37
6.7. PESTICIDAS	42
7. CONCLUSIONES	43
8. RECOMENDACIONES	46
9. BIBLIOGRAFÍA	49
ANEXOS (DIGITALES)	50
ANEXO 1: LISTADO DE LOS POZOS INCLUIDOS EN EL ESTUDIO.	50
ANEXO 2: LISTADO DE PARÁMETROS QUÍMICOS ANALIZADOS EN LABORATORIO.	50
ANEXO 3: INSTRUCTIVO DGA PARA EL MUESTREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.	50
ANEXO 4: FICHAS DE POZOS CON DATOS REGISTRADOS EN TERRENO.....	50
ANEXO 5: RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS.....	50

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: Mapa hidrogeológico de la VI Región. (Basado en Geología Escala 1:1.000.000, Sernageomin (tomado de: DGA, 2011).	12
Figura 3: Localización de acuíferos Alhué, Cachapoal, Maipo-Codegua y Tinguiririca en la VI región.	14
Figura 4: Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en la VI Región (Sernageomin, 2006; escala del estudio: 1:500.000).	16
Figura 5: Etapas de selección de los pozos de muestreo de aguas subterráneas	18
Figura 6: Localización de los 70 puntos de muestreo de aguas subterráneas seleccionados dentro de los acuíferos Alhué, Cachapoal, Maipo-Codegua y Tinguiririca.	20
Figura 7: Equipos y materiales utilizados en terreno para el estudio de la calidad de las aguas subterráneas de la VI Región.	22
Figura 8: Clasificación de los diversos tipos de agua según diagrama de Piper.	23
Figura 9: Número de pozos visitados por día y total acumulado.	24
Figura 10: Actividades desarrolladas en terreno durante el muestreo de aguas subterráneas llevado a cabo durante octubre de 2014 en pozos de la VI Región.	25
Figura 11: Distribución de puntos de muestreo por comuna; (Izquierda) comunas de la Provincia de Cachapoal; (derecha) comunas de la Provincia de Colchagua.	26
Figura 12: Número de pozos de muestreo por sector acuífero.	26
Figura 13: Distribución por número y porcentaje de pozos muestreados. (Izquierda) clasificación según rango de profundidad de los pozos; (derecha) clasificación según uso: APR (Agua Potable Rural), AP (Agua Potable) y DGA – nivel (múltiples usos).	27
Figura 14: Profundidades de los pozos y sus respectivos registros de profundidad del agua medida en terreno (niveles estáticos o dinámicos).	27
Figura 15: Parámetros físico-químicos registrados in situ en aguas de 70 pozos de la VI Región. Arriba-izquierda: datos de pH; Arriba-derecha: datos de temperatura; Abajo: datos de conductividad eléctrica del agua. Las flechas representan la dirección preferencial del escurrimiento subterráneo reportadas por Hauser (2010).	28
Figura 16: Distribución porcentual del error del balance iónico de las muestras de agua subterránea.	29
Figura 17: Diagramas de Stiff-modificado para las 70 muestras de aguas subterráneas tomadas en octubre de 2014 en la VI Región.	30
Figura 18: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el sector acuífero Maipo-Codegua (pozos n°3, n°5 y n°8) y acuífero Alhué (pozos n°16 y n°17). Las aguas del acuífero Alhué se pueden clasificar como bicarbonatadas-cálcicas al igual que las aguas del pozo 3 y 88 del acuífero Maipo-Codegua, clasificándose el pozo n°17 como aguas Bicarbonatadas-Cálcicas-sulfatadas.	31
Figura 19: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas del total de muestras (41) de aguas subterráneas tomadas en el acuífero Cachapoal (números y símbolos representan cada pozo).	32
Figura 20: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el acuífero Cachapoal. Siguiendo una línea de flujo del agua subterránea, la gráfica refleja el cambio de las aguas pasantes del sector Pelequén-Malloa-San	

Vicente de Tagua Tagua (pozos n°41, n°24, n°72, n°71 y n°22) al sector Peumo-Pichudegua-Las Cabras (pozos n°91, n°25, n°74 y n°27).....	33
Figura 21: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el acuífero Tinguiririca (Aguas Sulfatadas-Cálcicas-Bicarbonatadas). Con los resultados obtenidos no fue posible distinguir una evolución química en la dirección del flujo del agua subterránea, lo cual podría deberse, por ejemplo, a mezclas de aguas del mismo acuífero con aportes superficiales del río Tinguiririca, estero Chimbarongo y la red de canales de riego.	34
Figura 22: Representación de rangos de concentración de nitrato (NO ₃) detectado en los pozos muestreados en acuíferos de la VI Región.	35
Figura 23: Comparación de concentraciones máximas, mínimas y promedios de Nitrato (NO ₃) detectadas por sector acuífero monitoreado en la VI Región. (M) acuífero Maipo-Codegua; (A) acuífero Alhué; (C) acuífero Cachapoal; (T) acuífero Tinguiririca.	36
Figura 24: Concentraciones de fósforo (PO ₄) detectadas en aguas subterráneas de 9 de 70 pozos muestreados en la VI Región. Los resultados se comparan con el límite de detección (LD) del laboratorio.....	37
Figura 25: Concentraciones totales de Arsénico, Hierro, Manganeso y Zinc detectadas en aguas subterráneas, comparadas con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409) y norma para agua de riego (NCh 1333).	40
Figura 26: (Arriba) concentraciones de arsénico (por rango) detectadas en los pozos muestreados en la VI Región. (Abajo) pozo 1 corresponde a APR Idahue de San Vicente situado en acuífero Laguna San Vicente y el pozo 2 corresponde a A.P.R. La Arboleda Valle Hermoso en acuífero Tinguiririca Inferior; los colores de fondo representan las distintas unidades hidrogeológicas descritas por Hauser (2010), siendo en ambas formaciones conformadas por materiales no consolidados.	41
Figura 27: Resultados de análisis de 54 pesticidas en aguas subterráneas de la VI Región. Todos los análisis concluyeron la NO DETECCIÓN de las sustancias analizadas. Límite detección = 0.005 mg/L; Límite de cuantificación = 0.010 mg/L.	42
Figura 28: Clasificación de los 70 pozos muestreados según su condición de cumplimiento del estándar de calidad de agua potable (NCh409/2005); los puntos verdes indican cumplimiento en todos los parámetros analizados; los puntos rojos indican que al menos 1 parámetro superó la norma; los puntos amarillos indican cumplimiento de la norma pero presentaron concentraciones de nitrato en un rango considerado de atención (entre 30 y 50 mg NO ₃ /L).....	45
Figura 29: Categorización de los 12 sectores acuíferos de acuerdo a propuesta de continuidad del monitoreo de calidad de agua subterránea. Para sectores acuíferos 1, 2 y 3, se propone pozos de observación (al menos 1 pozo por sector); En sectores acuíferos 4, 5 y 6, se propone seguimiento en pozos donde se detectó nitrato (NO ₃) entre 30 y 50 mg/L. En sectores acuíferos 7, 8, 9, 10, 11 y 12, se propone monitoreo en pozos que superaron la norma de agua potable en al menos 1 de los parámetros normados.....	46

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Sectores acuíferos delimitados por DGA (2014) y su categoría según situación de explotación (datos publicados en www.dga.cl).	17
Tabla 2: Listado de parámetros controlados en las aguas subterráneas de la VI Región.....	20
Tabla 3: Concentraciones de arsénico (As), manganeso (Mn), hierro (Fe) y zinc (Zn) detectadas en muestras de cuatro pozos APR. Comparación entre análisis químicos realizados en noviembre de 2014 y abril de 2015. Entre paréntesis se indica si supera o no supera los umbrales establecidos en la norma de agua potable (NCh409/2005); para los parámetros en cuestión, los umbrales que fija la norma son los siguientes: As < 0,01 mg/L; Mn < 0,1 mg/L; Fe < 0,3 mg/L; Zn < 3 mg/L.....	38
Tabla 4: Resumen de los resultados de análisis de químicos de microelementos en aguas subterráneas de la VI Región (análisis de concentraciones totales).	39
Tabla 5: Resumen de superación de parámetros microelementos en pozos muestreados en la VI Región.....	43
Tabla 6: 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). Para cada “sector acuífero” se indica el acuífero del que forma parte, de acuerdo a la siguiente simbología: (M) acuífero Maipo-Codegua, (A) acuífero Alhué, (C) acuífero Cachapoal y (T) acuífero Tinguiririca.	44

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 difusa 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 Codegua, incluyendo en total 12 sectores (subdivisiones de acuíferos), todos con limitación de explotación vigente decretada por la DGA (áreas de restricción). Para estos fines, se llevó a cabo la visita y toma de muestras de agua en 70 pozos, siendo seleccionados mediante criterios objetivos, donde el 89% de ellos son pozos utilizados para el abastecimiento de agua potable para población rural. Dentro de la metodología de trabajo se incluyó el registro de parámetros en terreno (T, pH y Conductividad) y el análisis de 81 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, hierro, manganeso y zinc; un aspecto positivo es que ningún pozo registró concentraciones superiores a la norma de agua potable para los parámetros plata, aluminio, boro, cadmio, cobalto, cromo, cobre, mercurio, molibdeno, níquel, plomo y selenio. 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. 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.

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 hoyo hidrográfica. La Dirección General de Aguas 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. Además, como objetivos específicos pueden ser citados los siguientes: Identificar la presencia de sustancias químicas atribuibles a fuentes de contaminación difusa y proponer una recomendación de programa de monitoreo futuro.

4. Antecedentes

La región del Libertador General Bernardo O'Higgins (VI Región) reúne características que la hacen elegible para iniciar el mejoramiento de las redes de monitoreo de calidad de aguas subterráneas de la DGA. Entre estos factores se pueden mencionar:

- Usos de suelo: la VI Región es la cuarta a nivel nacional en superficie destinada al uso agrícola y, en relación a su propia superficie, es la que mayor porcentaje destina a este uso de suelo (26%).
- Además de la agricultura, la VI región tiene múltiples usuarios de las aguas superficiales y subterráneas e importantes fuentes de contaminación difusa, como pueden ser los residuos líquidos y/o de aguas de contacto generadas en las ciudades, faenas mineras u otras industrias presentes en la región.
- Prácticas de riego en agricultura: De acuerdo con los últimos datos del Censo Agrícola (2007), de la superficie total destinada a agricultura, la mitad se encuentra bajo riego y, de ésta, un 72% utiliza riego gravitacional. Al respecto, 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: considerando el factor anterior, antecedentes del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG, 2008) indican que la VI Región tuvo el primer lugar en ventas de plaguicidas (40% del total nacional) y prácticamente duplicó a la región que le sigue en cuanto al total de ventas durante el mismo año (Región Metropolitana, 23%).
- 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.

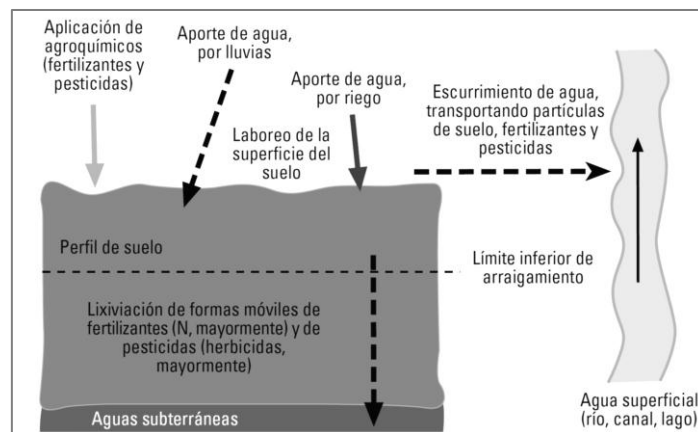


Figura 1: Esquema simplificado del proceso de contaminación difusa de aguas continentales (tomado de: González S., en revista Inia Tierra Adentro, Nov-Dic 2007).

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. Sin embargo, en esta latitud la altura de la Cordillera de la Costa se vuelve considerablemente menor hasta fundirse con la Depresión Intermedia, y esta tiende a ensancharse. 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.

En cuanto a las estructuras presentes, comprenden en su mayoría fallas normales en la zona de la Cordillera de los Andes y pliegues, también en la cordillera y precordillera. No se observan mayores estructuras que las mencionadas.

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. Del más antiguo al más joven, se tiene primero

la Formación Lo Prado (Titaniano-Hauteriviano), encontrada al SW de Rancagua cerca de la localidad de San Vicente de Tagua Tagua.

La siguiente formación es la Formación Las Chilcas (Barremiano-Albiano), cuyos principales afloramientos se ubican al oeste de Rancagua.

La siguiente formación se produce un hiato, que abarcaría de forma aproximada el Paleoceno. Entre el Eoceno superior y el Mioceno medio se tiene la Formación Abanico, que pertenece a la Cordillera Principal, por lo que presenta los puntos más altos de toda la región. Es atravesada por un set de fallas normales de orientación NW-SE de menor tamaño y otras fallas aisladas inversas de orientación NS.

Finalmente se tiene que las últimas litologías corresponden a depósitos desde el Pleistoceno hasta el Holoceno. Estos corresponden a los puntos topográficos más bajos (Depresión Intermedia) disminuyendo gradualmente su altura de norte a sur. Los depósitos más cercanos a los afluentes principales corresponden a Depósitos fluviales (los más recientes, pertenecientes al Holoceno), compuestos por bolones y gravas no consolidados, redondeados a bien redondeados, de baja esfericidad, clastosoportados, polimícticos y con intercalaciones esporádicas de arenas y limos. Luego le siguen los Depósitos fluviales antiguos (Pleistoceno superior-Holoceno, que corresponden, como su nombre lo dice, a los más antiguos del grupo), estos se encuentran en las terrazas fluviales por sobre el lecho actual del río o paleocanales que se observan en los abanicos aluviales y depósitos aluviales del valle.

Bordeando estos depósitos se encuentran los Depósitos aluviales de valle (Pleistoceno-Holoceno) compuestos por sedimentos no consolidados estratificados (gravas, arenas, limos y arcillas) acumulados al fondo del valle. Los últimos depósitos importantes corresponden a los Depósitos aluviales (Pleistoceno-Holoceno), los que comprenden gravas clastosoportadas no consolidadas y en partes arenosas, que forman abanicos en las salidas de los cursos fluviales mayores. Las llanuras de inundación están compuestas por arenas, limos y arcillas. Estos depósitos abarcan el área más cercana a la Cordillera Principal, y son sobre los que se encuentra la ciudad de Rancagua, dejan de ser tan extensos llegando a la localidad de Rengo.

La región está caracterizada por tres acuíferos principales: Alhué, Cachapoal y Tinguiririca, siendo los últimos dos los de mayor envergadura.

La litología predominante en el acuífero del Cachapoal consiste en depósitos aluviales, coluviales y de remoción en masa, y en una menor proporción depósitos fluvioglaciales, deltaicos, litorales o indiferenciados.

Abarcando un área menor se encuentran secuencias y complejos volcánicos continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas de composición andesítica a riolítica, con escasas intercalaciones sedimentarias. Y rocas ígneas de composición diorítica y monzodiorítica de piroxeno y hornblenda, además de granodioritas y monzogranitos de hornblenda y biotita.

De la composición de las rocas ígneas se puede extraer que estas presentan en su mayoría una composición mucho más rica en plagioclasas que en feldespatos alcalinos, como es el caso de las dioritas (compuesta por cerca de dos tercios de plagioclasas) o las monzodioritas, que a diferencia de las dioritas contienen más cuarzo. Químicamente hablando, los feldespatos alcalinos incorporan K en

su estructura, mientras que las plagioclasas incorporan Ca en vez de K. De esta forma se puede resumir que las rocas ígneas presentes son más ricas en plagioclasas, cuarzo y minerales ferromagnesianos (biotita, piroxeno y hornblenda).

En el caso del acuífero Tinguiririca, se pueden distinguir tres unidades principales. La primera es la que abarca un área mayor y corresponde a depósitos, tanto aluviales, coluviales y de remoción en masa, siendo la litología más joven (Holoceno). Hay otra unidad de rocas volcánicas y sedimentarias, con edades inferiores a los 10 Ma, compuesta por rocas piroclásticas riolíticas y lavas andesíticas y basálticas (entre 45-63% de sílice en su estructura) con intercalaciones de rocas sedimentarias (conglomerados, areniscas, limolitas y arcillolitas).

Finalmente, la última unidad está compuesta por rocas ígneas. En su mayoría, granitos, granodioritas, tonalitas y dioritas, además de monzodioritas, monzogranitos y monzonitas. Tanto los granitos, granodioritas como tonalitas tienen en su estructura un porcentaje entre 20-60% de cuarzo, siendo el granito más rico en feldespatos alcalinos y la tonalita más rica en plagioclasas. Las monzodioritas y monzogranitos cuentan con entre 5-20% de cuarzo, mientras que las dioritas poseen un 5% de cuarzo y 10% de feldespatos alcalinos, estando compuesta así principalmente por plagioclasas y minerales ferromagnesianos, siendo los principales de estos los mismo mencionados con anterioridad (piroxenos, hornblendas y biotitas).

4.2. Hidrogeología de la VI Región

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

Hidrogeológicamente, las unidades de rocas (tanto ígneas como sedimentarias) presentes en la zona de estudio carecen de importancia hidrogeológica debido a la ausencia en ellas de porosidad primaria y por su baja permeabilidad. Además, en el caso de las rocas ígneas, estas resultan especialmente resistentes a la meteorización, que es la que puede provocar porosidad de tipo secundario. El fracturamiento favorece la infiltración y acumulación de reducidos caudales, concentrados en torno a las quebradas con escurrimiento efímero.

Por otro lado, 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 2** 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.

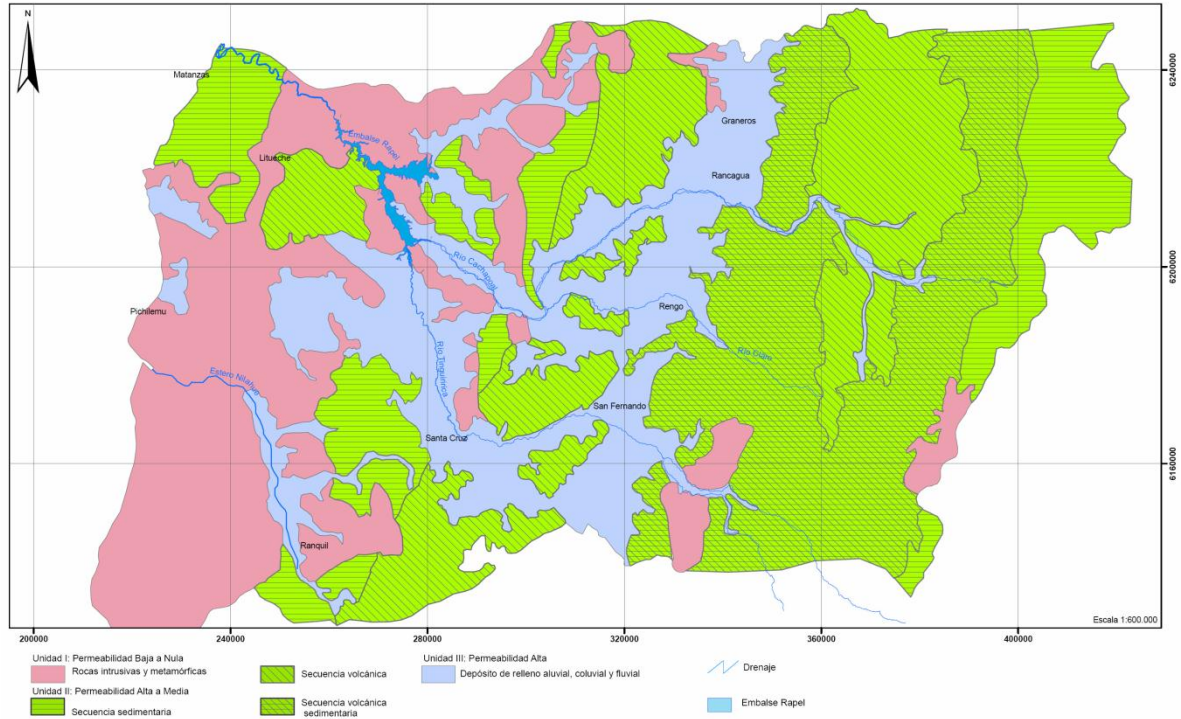


Figura 2: Mapa hidrogeológico de la VI Región. (Basado en Geología Escala 1:1.000.000, Sernageomin (tomado de: DGA, 2011).

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. Las rocas presentan permeabilidad escasa o nula, lo que impide que el agua se infiltre en sus capas y se movilice al interior del perfil del suelo (DGA, 2011).

La totalidad de las rocas ígneas y metamórficas están altamente meteorizadas, por lo que su dureza disminuye y su superficie se vuelve friable. La acción hídrica libera granos de cuarzo, ortoclasa y plagioclasas, y pasan a ser material suelto con gradación uniforme, de tipo arena gruesa a gravilla. La erosión de este material, por acción del escurrimiento de aguas de lluvia, en laderas empinadas, desarrolla profunda incisiones que degradan el terreno (Hauser, 1990).

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.

Estas rocas presentan una permeabilidad mayor que las rocas de la Unidad I. Se clasifican como permeabilidad media a alta debido a las litologías presentes, donde lo más dominante son las

secuencias de sedimentos volcánicos, caracterizados por ser escasamente estratificados, compactos y resistentes (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. (Hauser, 1990).

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).

Hauser (1990) en la Carta Hidrogeológica de la VI Región relacionó con más detalle el tipo de sedimento con su importancia. Para los Depósitos fluviales a fluvio-aluviales se tiene que los acuíferos de esta subunidad corresponden al tipo semiconfinado, gradando a confinado en los niveles más profundos. Como subunidad litológica, estos depósitos presentan una gran complejidad, debido a que cada nivel clástico constituye un acuífero distinto, a veces conectado con otro. Los horizontes finos actúan como niveles de confinamiento. La capacidad de la subunidad para almacenar y transmitir el agua subterránea se concentra en las capas arenosas, que son de buena selección y alta permeabilidad. En sectores adyacentes a esteros y ríos, el predominio de sedimentos arenosos con alta permeabilidad se traduce en la presencia de acuíferos libres.

La subunidad de los Depósitos aluviales está conformada por una secuencia alternada, muy heterogénea en granulometría y continuidad lateral y vertical. Presenta pobre gradación, lo que se traduce en acuíferos de escaso atractivo, difíciles de detectar y habilitar. La mala selección de los depósitos, debido a los sedimentos originados por flujos heterogéneos, torrenciales, que recorren cortas trayectorias, determina su baja permeabilidad y bajo rendimiento. Estos depósitos tienen escasa continuidad lateral y gran lenticularidad, lo que limita la interconexión hidráulica entre acuíferos adyacentes.

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 3 muestra la localización de los acuíferos Alhué, Cachapoal, Tinguiririca y Maipo-Codegua.

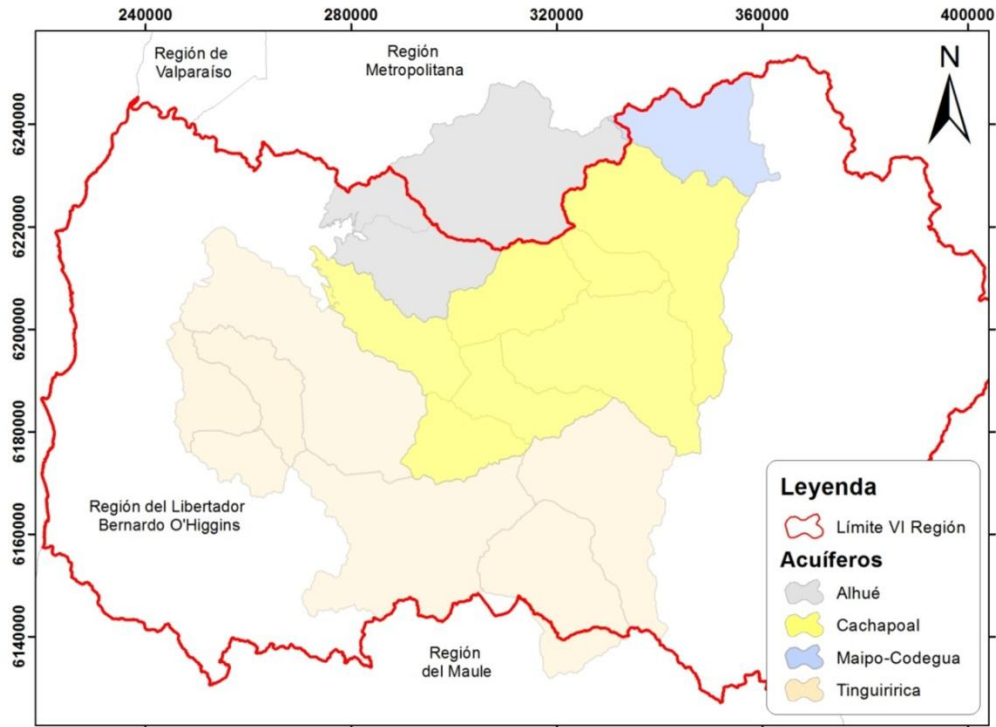


Figura 3: Localización de acuíferos Alhué, Cachapoal, Maipo-Codegua y Tinguiririca en la VI región.

- 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) **Acuífero Maipo-Codegua:** el sector acuífero de Codegua se ubica al norte de la cuenca del río Cachapoal. Comprende la cuenca del río Angostura, el cual tiene su origen en el estero Codegua. El volumen de agua del acuífero Codegua se estimó en 337 millones de m³ (DGA, 2005) y alimenta subterráneamente al acuífero Maipo (DGA, 2007).

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.

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 4 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).

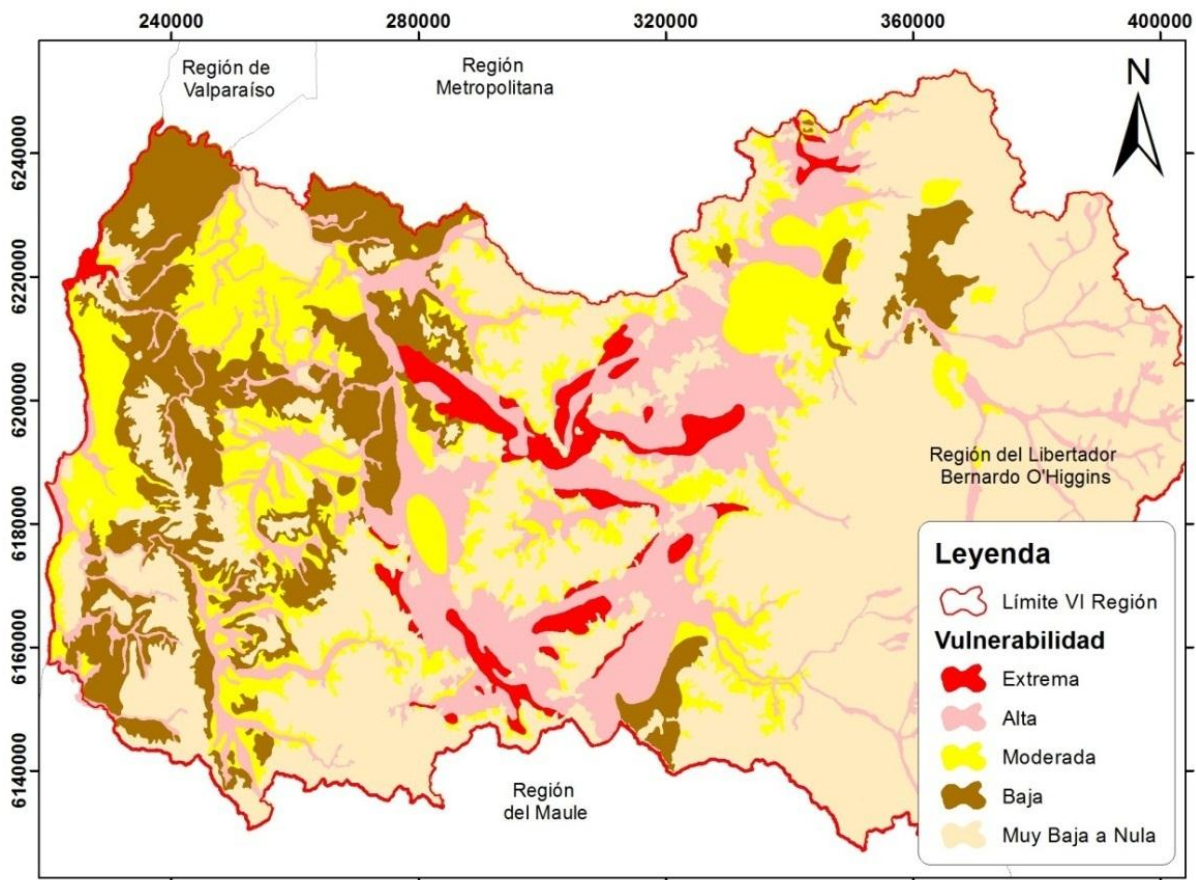


Figura 4: Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos en la VI Región (Sernageomin, 2006; escala del estudio: 1:500.000).

4.5. Situación de explotación de los sectores acuíferos

En la **Tabla 1** se listan los acuíferos delimitados por la DGA en la VI Región, encontrándose 25 de ellos con restricción de explotación (Área de Restricción).

Tabla 1: Sectores acuíferos delimitados por DGA (2014) y su categoría según situación de explotación (datos publicados en www.dga.cl).

N°	Nombre del Sector acuífero	Situación de explotación
1	El Monte	Área de restricción
2	Estero Las Cadenas-Marchigue	Área de restricción
3	Las Cadenas-Yerbas Buenas	Área de restricción
4	Olivar	Área de restricción
5	Pelequén-Malloa-San Vicente de Tagua Tagua	Área de restricción
6	Peumo-Pichudegua-Las Cabras	Área de restricción
7	Requinoa-Rosario-Rengo-Quinta Tilcoco	Área de restricción
8	Tinguiririca Inferior	Área de restricción
9	Tinguiririca Superior	Área de restricción
10	Estero Alhue	Área de restricción
11	Nilahue en Santa Teresa	Área de restricción
12	Estero Pumanque	Área de restricción
13	Estero Lolol	Área de restricción
14	Nilahue antes de Quiahue	Área de restricción
15	Estero Quiahue	Área de restricción
16	Codegua	Área de restricción
17	Graneros-Rancagua	Área de restricción
18	Estero el Rosario	Área de restricción
19	Río Rapel antes junta estero Rosario	Área de restricción
20	Río Rapel bajo junta estero Rosario	Área de restricción
21	Sector San Antonio subsector Estero San Antonio	Área de restricción
22	Doñihue-Coinco-Coltauco	Área de restricción
23	Laguna San Vicente	Área de restricción
24	San Fernando	Área de restricción
25	Chimbarongo	Área de restricción
26	Estero Pupuya	Sin restricciones para aprovechamiento
27	Estero San Miguel	Sin restricciones para aprovechamiento
28	Estero Navidad	Sin restricciones para aprovechamiento
29	Sector Altos de Rapel	Sin restricciones para aprovechamiento
30	Sector Caleta Matanzas	Sin restricciones para aprovechamiento
31	Sector Las Quebradas	Sin restricciones para aprovechamiento
32	Sector Nilahue subsector Estero Quillay	Sin restricciones para aprovechamiento
33	Sector Nilahue subsector Laguna de Cahuil	Sin restricciones para aprovechamiento
34	Sector Nilahue subsector Nilahue bajo	Sin restricciones para aprovechamiento
35	Sector Paredones subsector Estero Paredones	Sin restricciones para aprovechamiento
36	Sector Paredones subsector Laguna Bucalemu	Sin restricciones para aprovechamiento
37	Sector Polcura	Sin restricciones para aprovechamiento

N°	Nombre del Sector acuífero	Situación de explotación
38	Sector Punta Tumón	Sin restricciones para aprovechamiento
39	Sector San Antonio subsector Pichilemu	Sin restricciones para aprovechamiento
40	Sector San Antonio subsector Quebrada Honda	Sin restricciones para aprovechamiento
41	Sector San Pedro subsector estero San Pedro	Sin restricciones para aprovechamiento
42	Sector San Pedro subsector Laguna Boyeruca	Sin restricciones para aprovechamiento
43	Sector Topopalma subsector Estero Topocalma	Sin restricciones para aprovechamiento
44	Sector Topocalma subsector Caleta Topocalma	Sin restricciones para aprovechamiento
45	Sector Topocalma subsector Estero Hidango	Sin restricciones para aprovechamiento
46	Borde del Embalse Rapel	Sin restricciones para aprovechamiento
47	Estero Las Palmas	Sin restricciones para aprovechamiento
48	Estero El Parrón	Sin restricciones para aprovechamiento

5. Metodología

5.1. Selección de pozos para el muestreo de aguas subterráneas

Para la selección de los puntos de muestreo de aguas subterráneas se consideraron los pozos construidos en la zona y la disponibilidad de antecedentes mínimos de éstos, ello a partir de la revisión de dos bases de datos: 1) la red de monitoreo de calidad y niveles de la DGA VI Región; y 2) los pozos construidos por la Dirección de Obras Hidráulicas del MOP como parte del programa de abastecimiento de Agua Potable Rural (APR). El proceso de selección se realizó en tres etapas de acuerdo al diagrama que se presenta en la **Figura 5**.

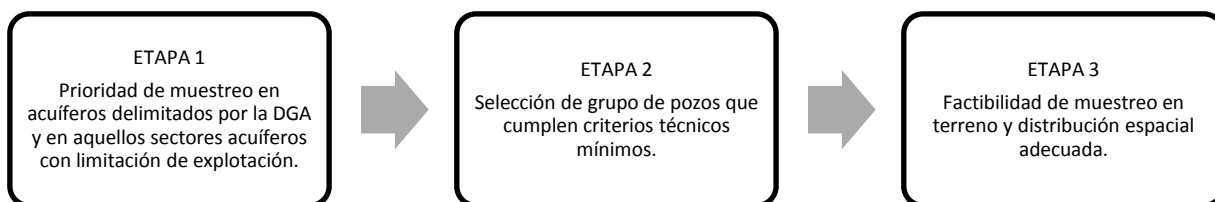


Figura 5: Etapas de selección de los pozos de muestreo de aguas subterráneas

En la Etapa 1 se consideró prioritario seleccionar aquellos pozos ubicados en acuíferos delimitados oficialmente por la DGA y, especialmente, aquellos ubicados en sectores que mantienen alguna limitación de explotación. Este criterio responde a la necesidad de aumentar el conocimiento del estado cualitativo del recurso en aquellas zonas donde resulta escaso. En esta etapa se seleccionaron 158 pozos de un total de 302 considerados (242 pozos APR y 60 pozos de la red de niveles de la DGA).

El listado de pozos que forman parte del programa de Agua Potable Rural (APR) fue proporcionado por Unidad de APR de la Dirección de Obras Hidráulicas de la VI Región, a quienes se les agradece la colaboración en la entrega de antecedentes constructivos y datos de contacto de las organizaciones de usuarios.

En la Etapa 2 se seleccionaron 125 de 158 pozos que cumplieron con los siguientes criterios técnicos mínimos:

1. Disponibilidad de equipo de bombeo en el pozo para aplicar el procedimiento de muestreo de agua subterránea. Esto posibilita la ejecución adecuada y expedita del procedimiento de muestreo (ver Anexo 3).
2. Profundidad máxima del pozo igual a 40 metros. Considerando el conocimiento hidrogeológico de la zona, este criterio permitió incluir aquellos pozos que capturan aguas subterráneas del acuífero libre y, además, que presentan mayor factibilidad de contener sustancias de origen antrópico infiltradas desde la superficie del terreno (contaminantes difusos).

Finalmente, en la Etapa 3 se llevó a cabo una selección práctica de 70 pozos, basada en la factibilidad de ejecutar el muestreo en terreno de forma expedita, cumpliendo con los estándares técnicos requeridos para disponer de muestras representativas del acuífero:

1. Disponibilidad de los datos de contacto del responsable del acceso al pozo y coordinación previa para acceder al pozo.
2. Ubicación en terreno del pozo y constatación de condiciones adecuadas para la toma de muestras.
3. Adecuada distribución espacial de los puntos en el área de estudio.

Considerando las tres etapas descritas anteriormente, además del presupuesto disponible para los análisis químicos, se procedió a muestrear 70 pozos (ver listado en Anexo 1) cuya distribución espacial se representa en la Figura 6. El número de pozos por acuífero fue el siguiente: acuífero Alhué (2), acuífero Cachapoal (41), acuífero Maipo-Codegua (3) y acuífero Tinguiririca (24).

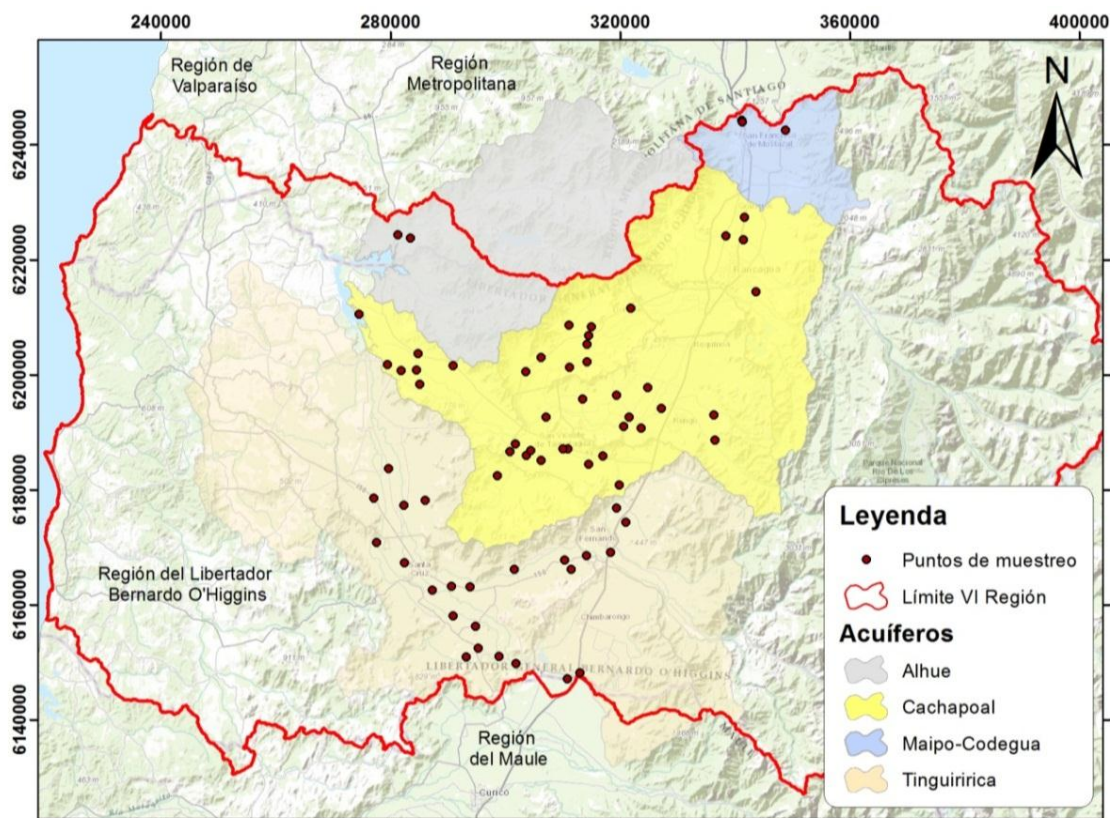


Figura 6: Localización de los 70 puntos de muestreo de aguas subterráneas seleccionados dentro de los acuíferos Alhué, Cachapoal, Maipo-Codegua y Tinguiririca.

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, e identificar la presencia de sustancias químicas atribuibles a fuentes de contaminación difusa, se seleccionó un conjunto de 84 parámetros que permitiese caracterizarlas adecuadamente (Ver Tabla). En el Anexo 2 se indican los métodos analíticos utilizados y los límites de detección de éstos para aquellos parámetros analizados en laboratorio.

Tabla 2: Listado de parámetros controlados en las aguas subterráneas de la VI Región.

Categoría	Total de parámetros	Parámetro
Físico-químico (medición en terreno)	3	Temperatura, pH, conductividad eléctrica.
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) y Fosfato (PO ₄)
Microelementos (análisis en laboratorio)	17	Aluminio (Al), Arsénico (As), Boro (B), Cadmio (Cd), Cobalto (Co), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Mercurio (Hg), Manganeso (Mn), Molibdeno (Mo), Niquel (Ni), Plomo (Pb), Plata (Ag), Selenio (Se), Zinc (Zn) y Sílice (Si)
Pesticidas (análisis en laboratorio)	54	2,4D, Aldrin, Atrazina, DDT, Diazinon, Diuron, Ampa, Glifosato, etc. (ver listado en Anexo 2)

Respecto a la selección de pesticidas, cabe señalar que se tuvo en cuenta la factibilidad de que éstos sean detectados en las aguas subterráneas. Esta factibilidad aumenta para aquellas sustancias que cumplen las siguientes condiciones:

- 1) Mayor solubilidad en agua y por lo tanto aumenta la posibilidad de que un pesticida se infiltre en superficie y llegue hasta el acuífero.
- 2) Menor coeficiente de adsorción, lo que significa que una fracción menor del pesticida pueda ser retenido en el suelo y el resto entre en contacto con el acuífero.
- 3) Mayor vida media (Half-life time, DT50), lo cual indica el tiempo en el que un pesticida es degradado a la mitad y, por lo tanto, una mayor vida media implica una mayor factibilidad de que este llegue al acuífero y pueda ser detectado en los análisis químicos.

Además, se consideró la revisión de bibliografía (INIA, 2007; Acuña, 2005; Minuta Técnica DGA - DCPRH 26/2013) y recomendaciones entregadas por profesionales del Ministerio de Medio Ambiente que orientaron la selección de aquellas sustancias que, dado el uso más masivo de agroquímicos en la región, podrían ser factibles de encontrarse en el agua subterránea. En el Anexo 2 se incluye una tabla con los pesticidas incluidos en los análisis del presente estudio.

Los análisis químicos de microelementos señalados en la Tabla 2 fueron llevados a cabo por el Laboratorio Ambiental de la Dirección General de Aguas. En cuanto a los análisis de iones y pesticidas, éstos fueron analizados por un laboratorio externo (ANALAB) contratado mediante licitación pública ID N°1019-97-LE14. El trabajo contratado para este estudio incluyó la visita a terreno de 70 pozos, 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 \$12.000.000 (doce millones de pesos).

5.3. Uso de equipos y materiales

Durante el trabajo en terreno se utilizaron los siguientes equipos:

- Sonda o pozómetro para la medición del nivel de agua en los pozos; marca Solinst modelo 102, de 100 metros de longitud.
- Sonda de medición automática multiparámetro (conductividad eléctrica, pH y Temperatura), marca Hanna modelo HI 9828.
- Equipo GPS marca Garmin modelo 62S.

Para la toma de muestras se utilizaron los siguientes materiales:

- Botellas plásticas de 250 ml, tapas y etiquetas autoadhesivas.
- Contenedor cooler, ice-pack para mantener las muestras refrigeradas en terreno.
- Soluciones estándar para la calibración de los sensores de la sonda multiparámetro.
- Agua destilada, papel absorbente, guantes.
- Fichas para el registro de datos en terreno (Anexo 4).

La **Figura 7** muestra los equipos y materiales preparados para las actividades en terreno.



Figura 7: Equipos y materiales utilizados en terreno para el estudio de la calidad de las aguas subterráneas de la VI Región.

5.4. Selección del período y frecuencia de muestreo

La fecha de muestreo de aguas subterráneas se definió tomando en consideración el periodo en que se aplican la mayoría de los pesticidas en la región. En este sentido, las condiciones climáticas resultan más favorables para esta práctica agronómica entre los meses de marzo – abril y agosto – noviembre. Considerando este antecedente, se estableció el periodo de muestreo durante el mes de octubre de 2014, ejecutándose el muestreo de 67 de los 70 pozos entre los días lunes 13 y jueves 23 de octubre, y los 3 pozos faltantes fueron muestreados el día martes 11 de noviembre de 2014. Por razones presupuestarias, sólo se consideró 1 muestreo (frecuencia anual).

5.5. 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 registrados en terreno.
- Preparar materiales necesarios para la toma de muestras y mantenimiento 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:

- Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos, DGA – MOP.
- Dirección Regional de Aguas, Región de O'Higgins – MOP.
- Laboratorio ANALAB.

5.6. 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 admisible errores cercanos al 10% (Custodio y Llamas, 1996).

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

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 se realizó acorde con la siguiente clasificación de las aguas que considera la distribución porcentual de cationes y aniones.

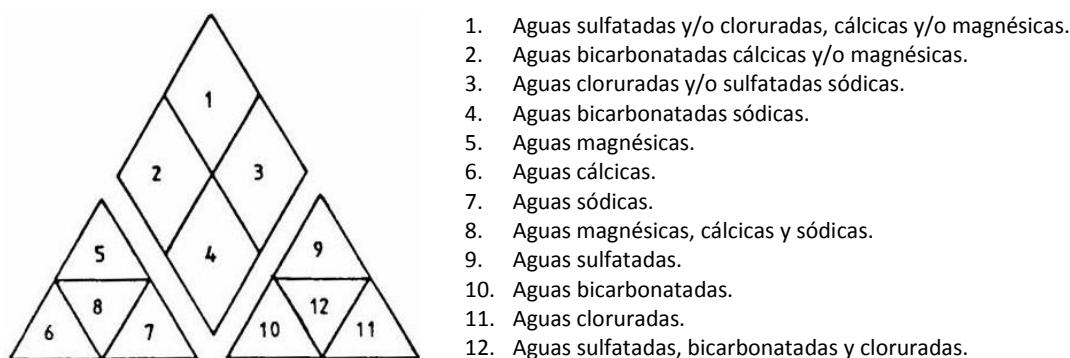


Figura 8: Clasificación de los diversos tipos de agua según diagrama de Piper.

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.

6. Resultados

6.1. Descripción general de las actividades en terreno

Como parte del presente estudio se llevó a cabo el muestreo de aguas subterráneas de la VI Región en 70 pozos. Esta actividad tuvo una duración de 9 días, ejecutándose entre el lunes 13 y el jueves 23 de octubre de 2014 y se finalizó el día martes 11 de noviembre del mismo año.

Los muestreos fueron llevados a cabo por funcionarios de la Dirección General de Aguas y un profesional del laboratorio químico ANALAB, cuyos servicios fueron contratados para el apoyo de muestreo en terreno y el posterior análisis de pesticidas. El promedio de los 8 primeros días de muestreo fue 8,4 pozos/día, y el promedio general fue 7,7 pozos/día. En la **Figura 9** se presenta gráficamente el número de pozos muestreados por día y el total acumulado de pozos visitados.

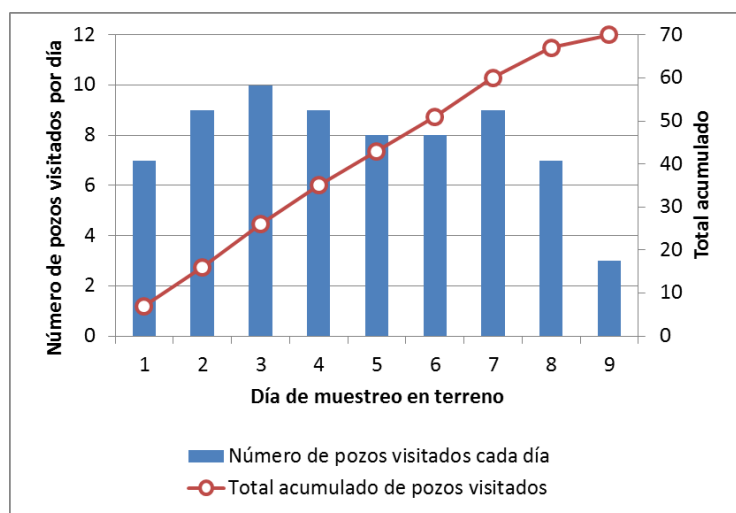


Figura 9: Número de pozos visitados por día y total acumulado.

En atención a las cifras antes comentadas, cabe señalar que hubo tres factores condicionantes: 1) la salida a terreno se realizó cada día desde Santiago, saliendo a las 8:30 am y se retornó a las 7 pm., aproximadamente, para entregar las muestras de agua al laboratorio; 2) se coordinó la visita a cada pozo con una semana de anticipación, contactándose nuevamente con el responsable del acceso al pozo durante el trayecto a éstos; y 3) durante los días en terreno las condiciones del tiempo fueron favorables, sin ocurrencia de eventos de precipitación que retardaran las labores planificadas. A modo de ejemplo, en la **Figura 10** se incluyen algunas fotografías captadas durante el desarrollo de las actividades realizadas en terreno.



Figura 10: Actividades desarrolladas en terreno durante el muestreo de aguas subterráneas llevado a cabo durante octubre de 2014 en pozos de la VI Región.

6.2. Distribución de los puntos de muestreo

Los pozos muestreados se distribuyeron entre las provincias de Cachapoal (46) y Colchagua (24), abarcando 22 comunas en total (Figura 11).

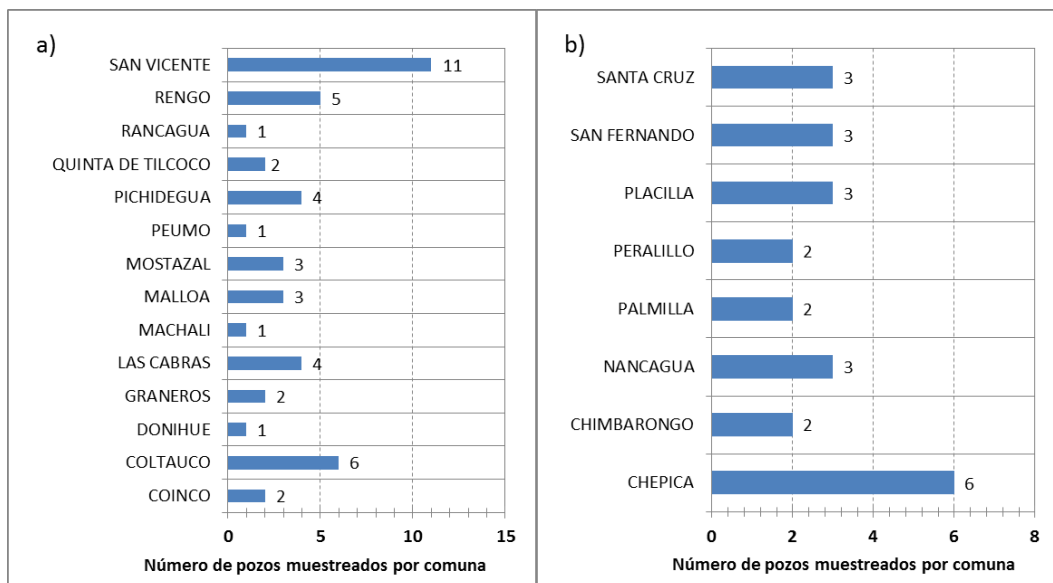


Figura 11: Distribución de puntos de muestreo por comuna; (Izquierda) comunas de la Provincia de Cachapoal; (derecha) comunas de la Provincia de Colchagua.

En cuanto al número de puntos por acuífero, el estudio incluyó 2 pozos en el acuífero Alhué (A), 41 pozos en el acuífero Cachapoal (C), 24 pozos en el acuífero Tinguiririca (T) y 3 pozos en el acuífero Maipo –Codegua (M). En la siguiente figura se muestra el número de pozos incluidos en los 12 sectores acuíferos abarcados por este estudio, cada uno de los cuales se encuentra actualmente con limitación de explotación establecida por la DGA (Áreas de Restricción).

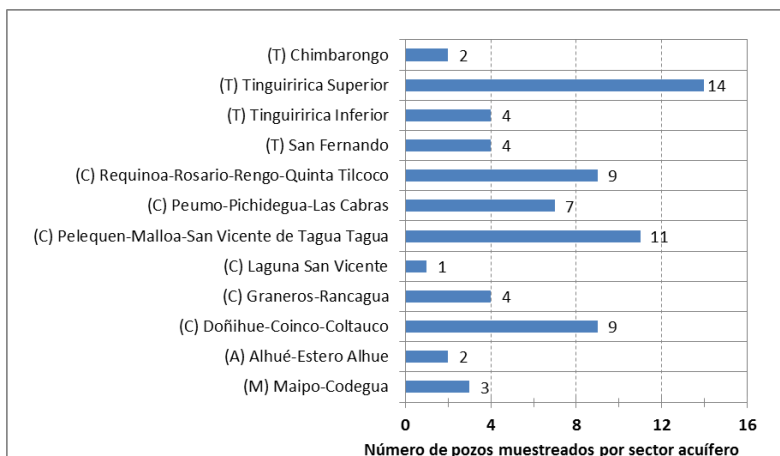


Figura 12: Número de pozos de muestreo por sector acuífero.

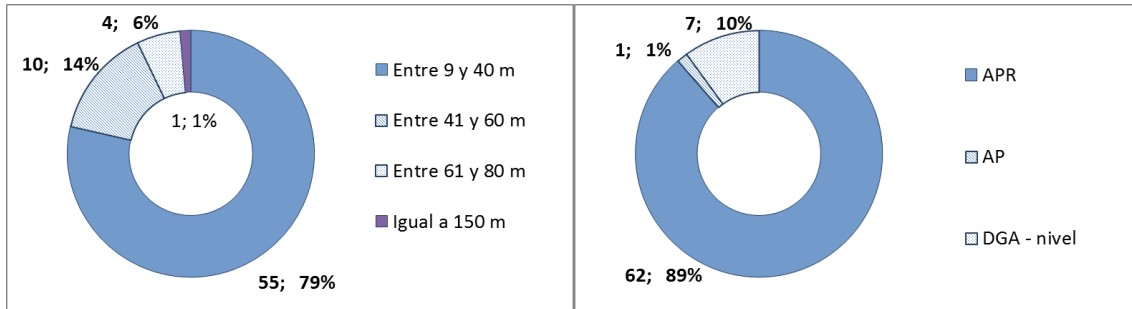


Figura 13: Distribución por número y porcentaje de pozos muestreados. (Izquierda) clasificación según rango de profundidad de los pozos; (derecha) clasificación según uso: APR (Agua Potable Rural), AP (Agua Potable) y DGA – nivel (múltiples usos).

6.3. Datos registrados en terreno

En la **Figura 14** se presenta una comparación entre el registro de la profundidad del agua medida en terreno y su respectiva profundidad constructiva. En total se midieron 54 niveles estáticos y 13 niveles dinámicos, con un promedio de 7 m y 9 m, respectivamente. La correspondencia entre el número del pozo y su ubicación, puede ser consultada en el Anexo 1.

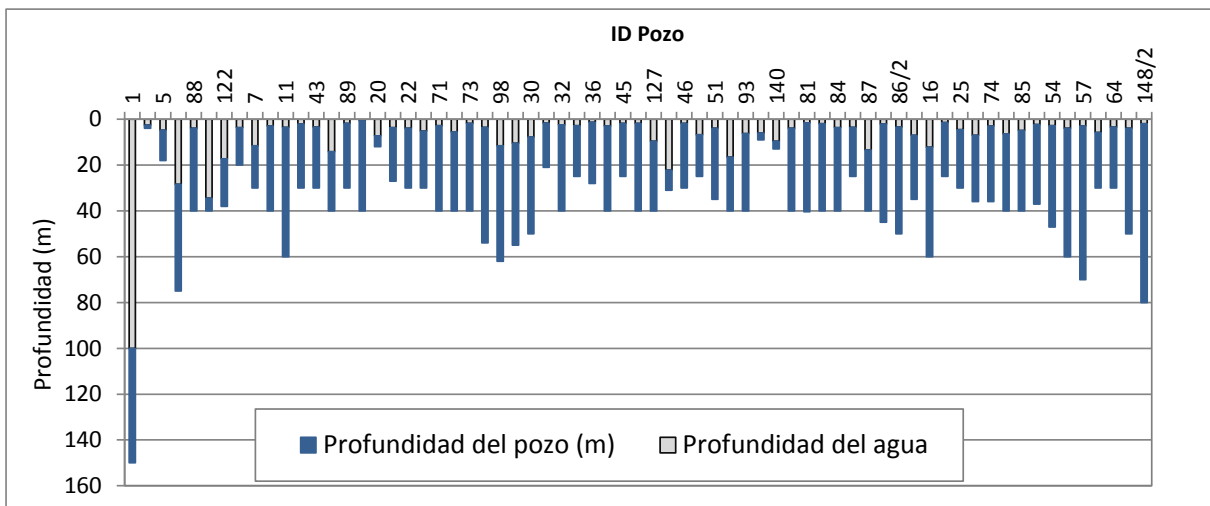


Figura 14: Profundidades de los pozos y sus respectivos registros de profundidad del agua medida en terreno (niveles estáticos o dinámicos).

Los parámetros físico-químicos medidos en terreno (temperatura, pH y conductividad eléctrica) se detectaron, en general, dentro de rangos típicos esperables para aguas subterráneas. Sólo se presentaron valores inusuales de temperatura en los siguientes pozos: Cooperativa La Finca Isla de Yaquil Ltda. (23.1°C) y Comité de A.P.R. San José del Huique (10,6°C). A escala regional (ver **Figura 15**), se detectó que la temperatura y la conductividad eléctrica tienden a incrementarse paulatinamente en el mismo sentido del flujo de las aguas subterráneas (de Este – Oeste).

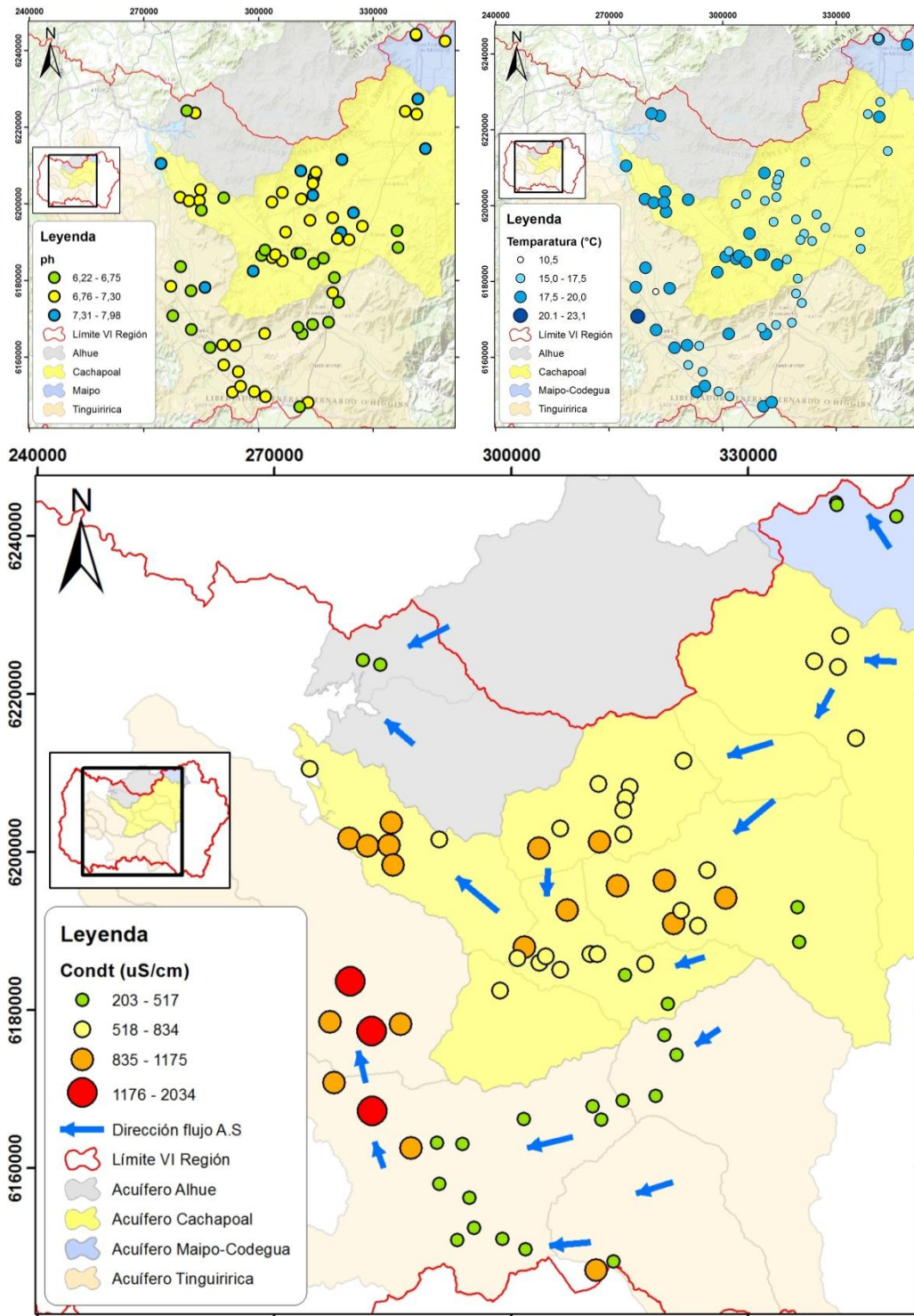


Figura 15: Parámetros físico-químicos registrados in situ en aguas de 70 pozos de la VI Región. Arriba-izquierda: datos de pH; Arriba-derecha: datos de temperatura; Abajo: datos de conductividad eléctrica del agua. Las flechas representan la dirección preferencial del escurrimiento subterráneo reportadas por Hauser (2010).

6.4. Cálculo de balance iónico

El error del balance iónico fue cuantificado en base a los resultados de análisis químicos informados por el laboratorio ANALAB para cada una de las 70 muestras de agua subterránea. Al respecto, se detectó 53 casos (76%) con un error menor al 10%, 11 casos (16%) con un error entre 10,1% y 15%, y 6 casos (8%) con un error entre 15,1% a 20%. En vista de estos resultados, se consideró adecuado utilizar el total de los datos de análisis químicos de las muestras de agua tomadas en los 70 pozos para analizar la situación de contaminación difusa en la región.

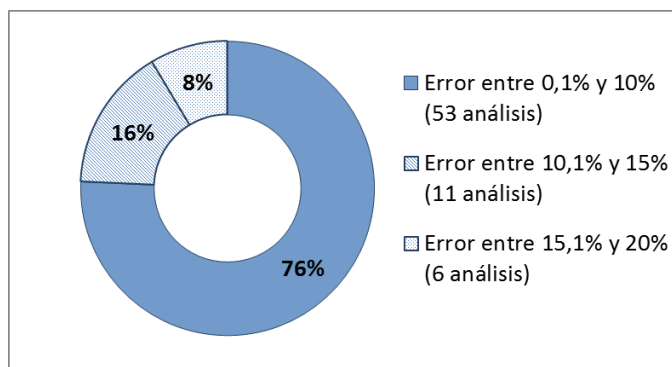


Figura 16: Distribución porcentual del error del balance iónico de las muestras de agua subterránea.

6.5. Concentración de iones

El análisis de iones mayoritarios y sus resultados son presentados mediante diagramas de Stiff-modificado (Figura 17) y diagramas de Piper (Figura 18, Figura 19, Figura 20 y Figura 21).

Una primera interpretación de los diagramas de Stiff-modificado, permite destacar 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.

Se evidencia también las diferencias entre las aguas del acuífero Maipo-Codegua, que fluyen hacia el acuífero del Maipo (aguas Cálcicas-Bicarbonatadas), de las aguas del acuífero Alhué (Bicarbonatadas-Cálcicas-Sódica) y del acuífero Cachapoal (sector Graneros-Rancagua), cuyas aguas pueden clasificarse como Bicarbonatadas-Cálcicas. La diferencia entre las aguas del sector acuífero Codegua y el acuífero Alhué se grafica mediante diagrama de Piper en la Figura 18.

En el trayecto de las aguas por el sector medio del acuífero Cachapoal (sectores Doñihue-Coinco-Coltauco), se evidencia un incrementado en la concentración de los aniones sulfato y cloruro, tendencia que se ve reforzada y complementada con el aumento de Magnesio y Sodio con el paso de las aguas en el sector Peumo-Pichidegua-Las Cabras (Ver Figura 17). El global de resultados de análisis químicos realizados en el acuífero Cachapoal se presenta en el diagrama de Piper de la Figura 19, donde es posible clasificar sus aguas entre Sulfatadas-Cálcicas y Bicarbonatadas-Cálcicas. Para este mismo acuífero, se muestra en la Figura 20 una selección de pozos que siguen una misma línea de flujo del agua subterránea; esta gráfica refleja el cambio de las aguas pasantes del sector Pelequén-Malloa-San Vicente de Tagua Tagua (pozos n°41, n°24, n°72, n°71 y n°22) al sector Peumo-Pichidegua-Las Cabras (pozos n°91, n°25, n°74 y n°27), viéndose modificadas las aguas desde Bicarbonatadas-Cálcicas a Sulfatadas-Cálcicas.

Las aguas del acuífero Tinguiririca presentan diferencias con las del acuífero Cachapoal, principalmente en cuanto a la concentración total de iones (resulta mayor en este último). A partir de los diagramas de Stiff-modificado (**Figura 17**), se distinguen diferencias entre las aguas subterráneas en la zona del valle del río Tinguiririca y las aguas subterráneas que fluyen más al sur, por el valle del estero Chimbarongo (aguas abajo del embalse Convento Viejo). En general las aguas del acuífero Tinguiririca se clasifican como Sulfatadas-Cálcicas a Sulfatadas-Cálcicas-Bicarbonatadas (**Figura 21**). Con los resultados químicos disponibles no fue posible distinguir una evolución química clara en la dirección del flujo del agua subterránea que permitiera su clasificación. Sin embargo, los diagramas de Stif-modificado reflejan el incremento en la concentración total de iones y una mayor concentración de sulfato en el sector Tinguiririca Inferior respecto del sector Tinguiririca Superior (posiblemente atribuibles a procesos de disolución y/o contaminación agrícola/industrial).

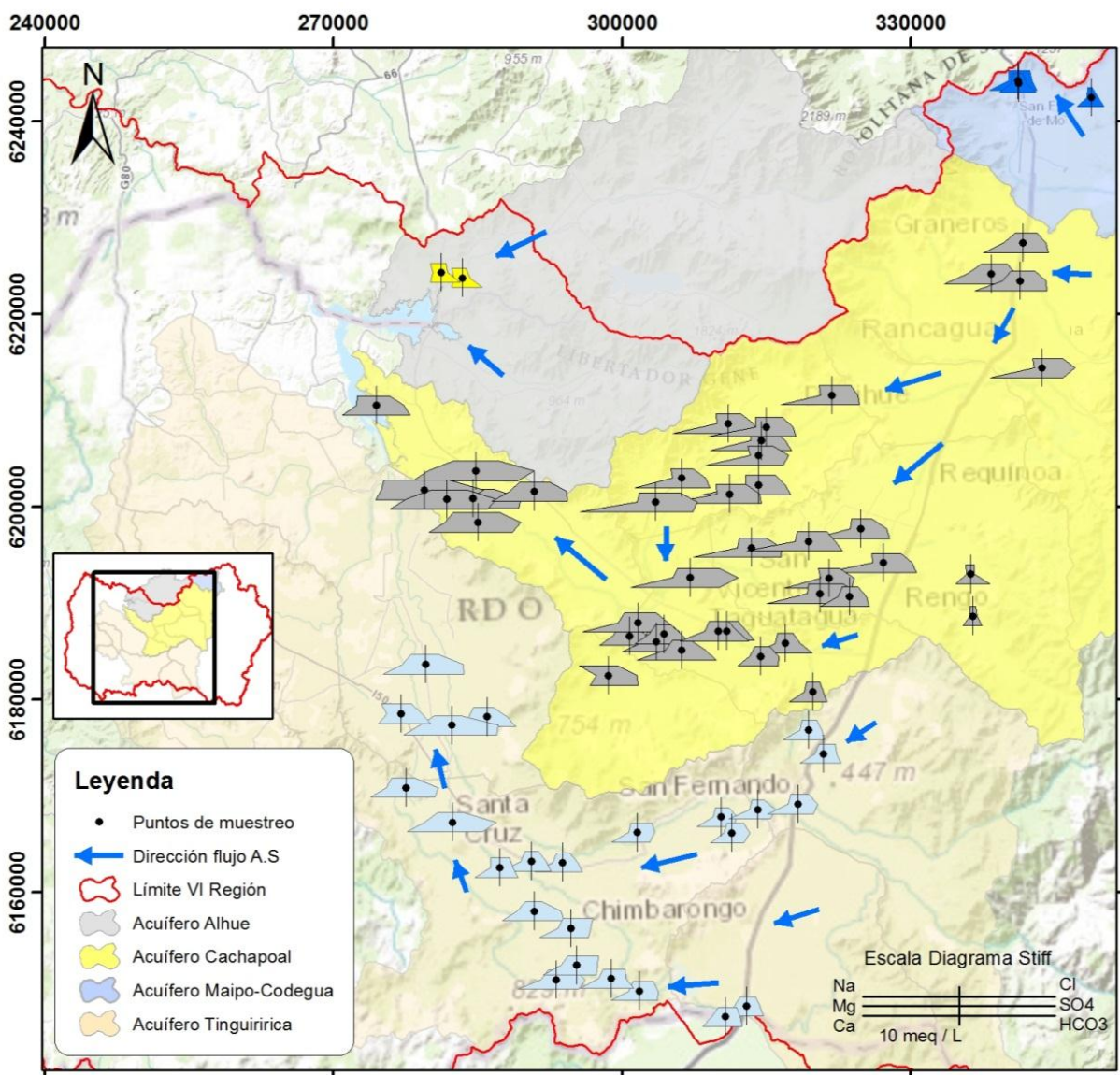


Figura 17: Diagramas de Stiff-modificado para las 70 muestras de aguas subterráneas tomadas en octubre de 2014 en la VI Región.

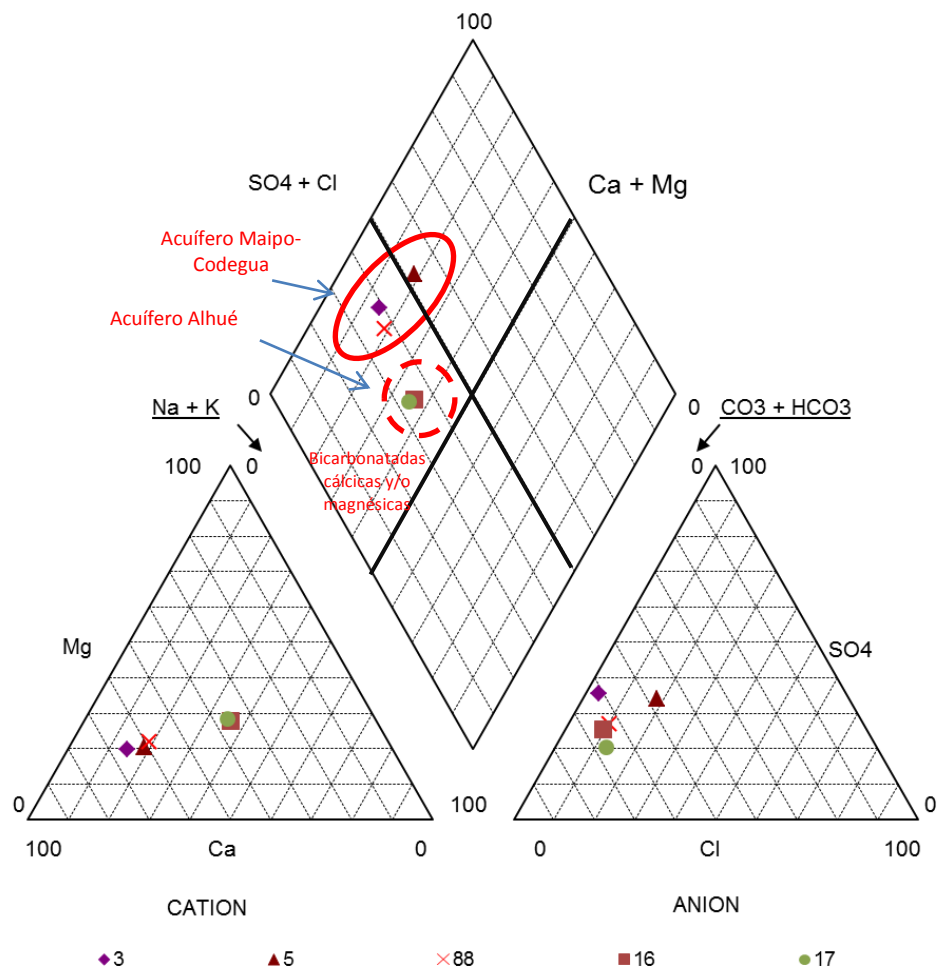
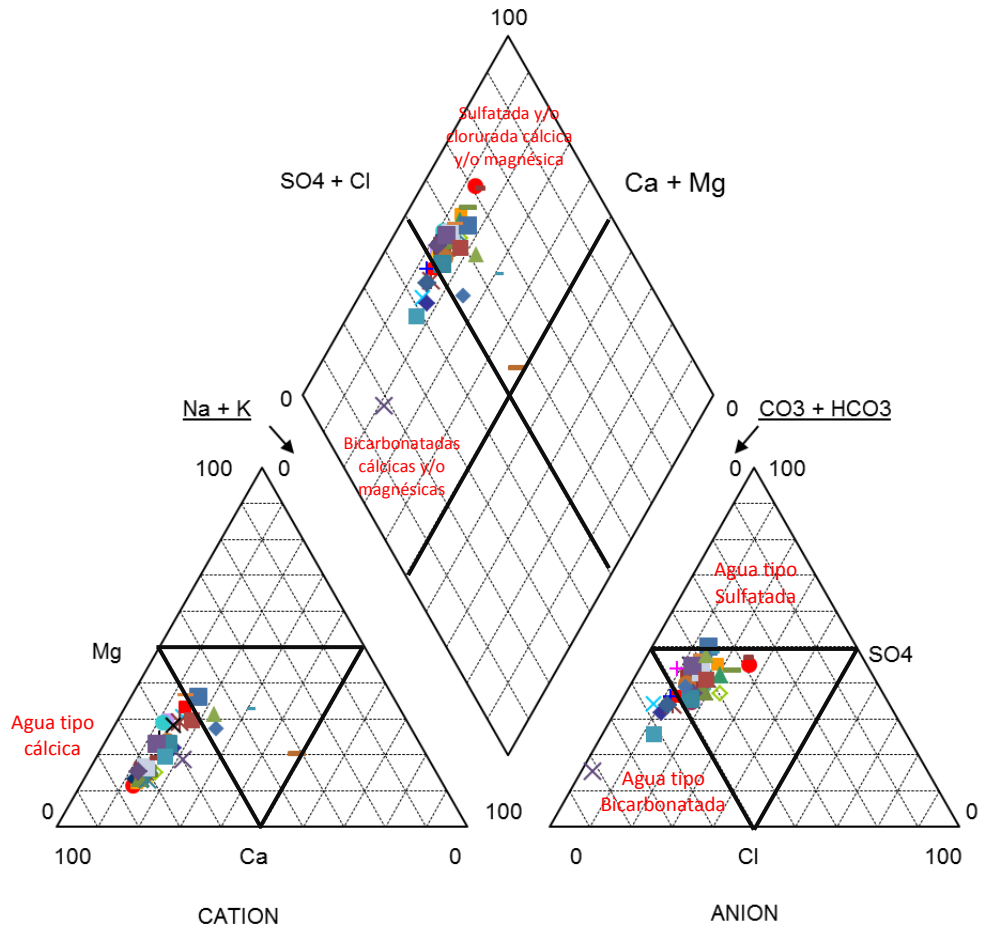


Figura 18: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el sector acuífero Maipo-Codegua (pozos n°3, n°5 y n°8) y acuífero Alhué (pozos n°16 y n°17). Las aguas del acuífero Alhué se pueden clasificar como bicarbonatadas-cálcicas al igual que las aguas del pozo 3 y 88 del acuífero Maipo-Codegua, clasificándose el pozo n°17 como aguas Bicarbonatadas-Cálcicas-sulfatadas.



- 1 ■ 76 + 90 ● 122 ◇ 6 ▲ 7 ■ 9 × 11 + 42 ● 43 ◆ 78 ▲ 89 - 89/2 × 20
- + 21 ● 22 ◆ 24 × 71 ■ 72 × 73 + 95 - 98 ◆ 113 ■ 30 ▲ 31 × 32 × 33 - 36
- 38 ■ 45 - 77 ◆ 127 ■ 41 ■ 15 ■ 25 - 27 - 74 ◆ 75 ■ 85 ▲ 91 ■ 34

Figura 19: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas del total de muestras (41) de aguas subterráneas tomadas en el acuífero Cachapoal (números y símbolos representan cada pozo).

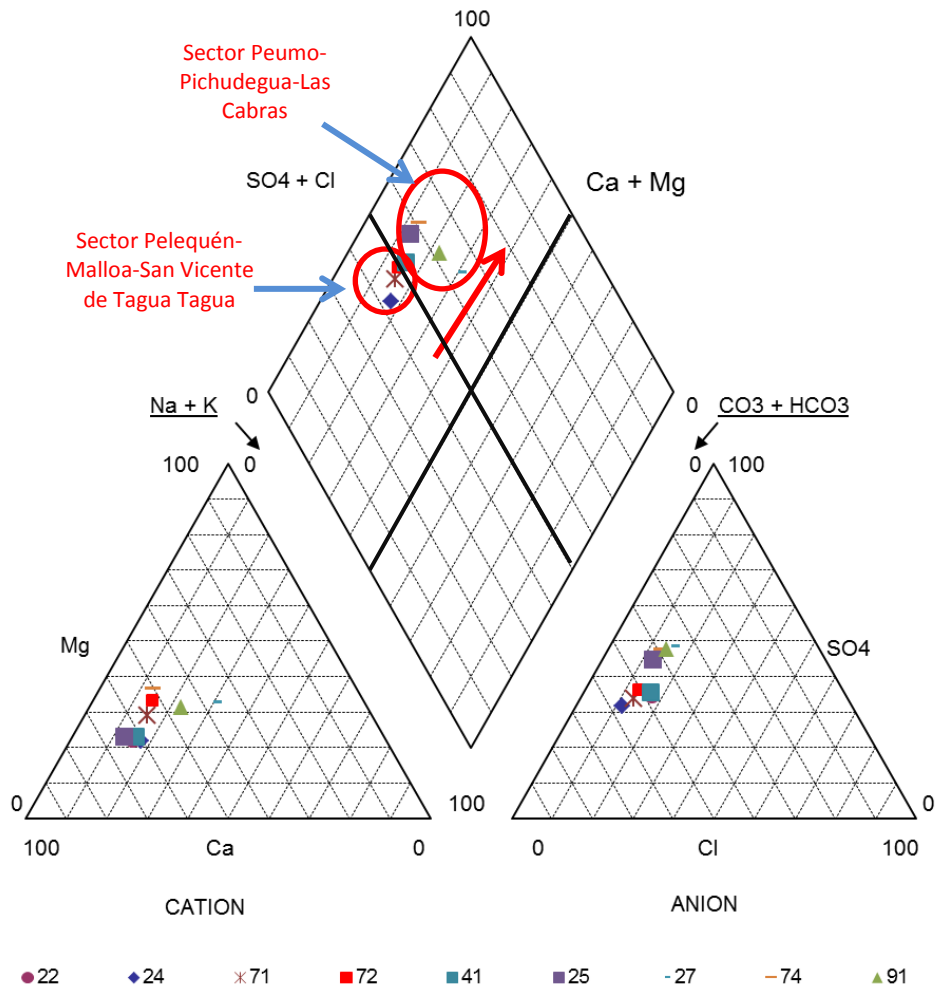


Figura 20: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el acuífero Cachapoal. Siguiendo una línea de flujo del agua subterránea, la gráfica refleja el cambio de las aguas pasantes del sector Pelequén-Malloa-San Vicente de Tagua Tagua (pozos n°41, n°24, n°72, n°71 y n°22) al sector Peumo-Pichudegua-Las Cabras (pozos n°91, n°25, n°74 y n°27).

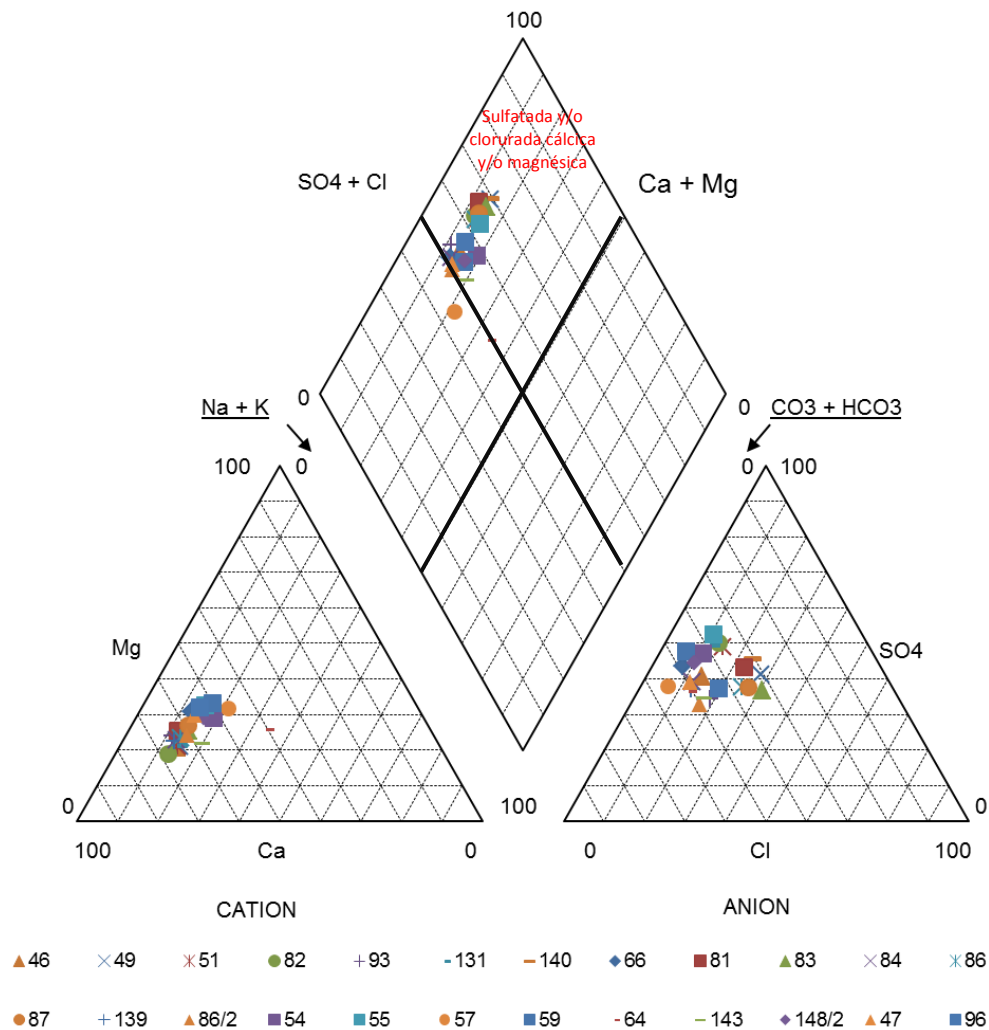


Figura 21: Representación mediante diagrama de Piper de las características químicas de las aguas subterráneas muestreadas en el acuífero Tinguiririca (Aguas Sulfatadas-Cálcicas-Bicarbonatadas). Con los resultados obtenidos no fue posible distinguir una evolución química en la dirección del flujo del agua subterránea, lo cual podría deberse, por ejemplo, a mezclas de aguas del mismo acuífero con aportes superficiales del río Tinguiririca, estero Chimbarongo y la red de canales de riego.

Nitrato (NO₃⁻)

Respecto al origen del nitrato, se puede señalar que una parte importante proviene de fuentes de materia orgánica 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 NO₃).

En la Figura 22 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 Peumo, Las Cabras, Quinta de Tilcoco, Chépica, Chimbarongo y en San

Fernando. Al considerar el estándar de agua potable (NCh409/2005), se puede concluir que en un pozo (Comité de A.P.R. Los Romos La Pedrina) la concentración de Nitratos fue superior a 50 mg/L.

En términos promedio, el acuífero de Alhué presentó la menor concentración de Nitrato (3 mg/L de NO₃), seguido por el acuífero Maipo-Codegua (13 mg/L de NO₃), el acuífero Cachapoal (21 mg/L de NO₃) y finalmente el acuífero Tinguiririca presentó el promedio más elevado (22 mg/L de NO₃). Una comparación por sector acuífero (**Figura 23**) permite evidenciar que el sector Peumo-Pichidegua-Las Cabras presentó, en promedio, la mayor concentración de Nitratos (37.8 mg/L de NO₃), seguido por el sector acuífero Chimbarongo (25,8 mg/L de NO₃) y San Fernando (25,3 mg/L de NO₃). Si bien estos promedios no sobrepasan ninguna norma de referencia de calidad de agua, las cifras dan cuenta de efectos antrópicos sobre la calidad del recurso, más aun considerando que la mayoría de las muestras que presentan cifras elevadas de nitrato corresponden a pozos ubicados en sitios con vulnerabilidad alta.

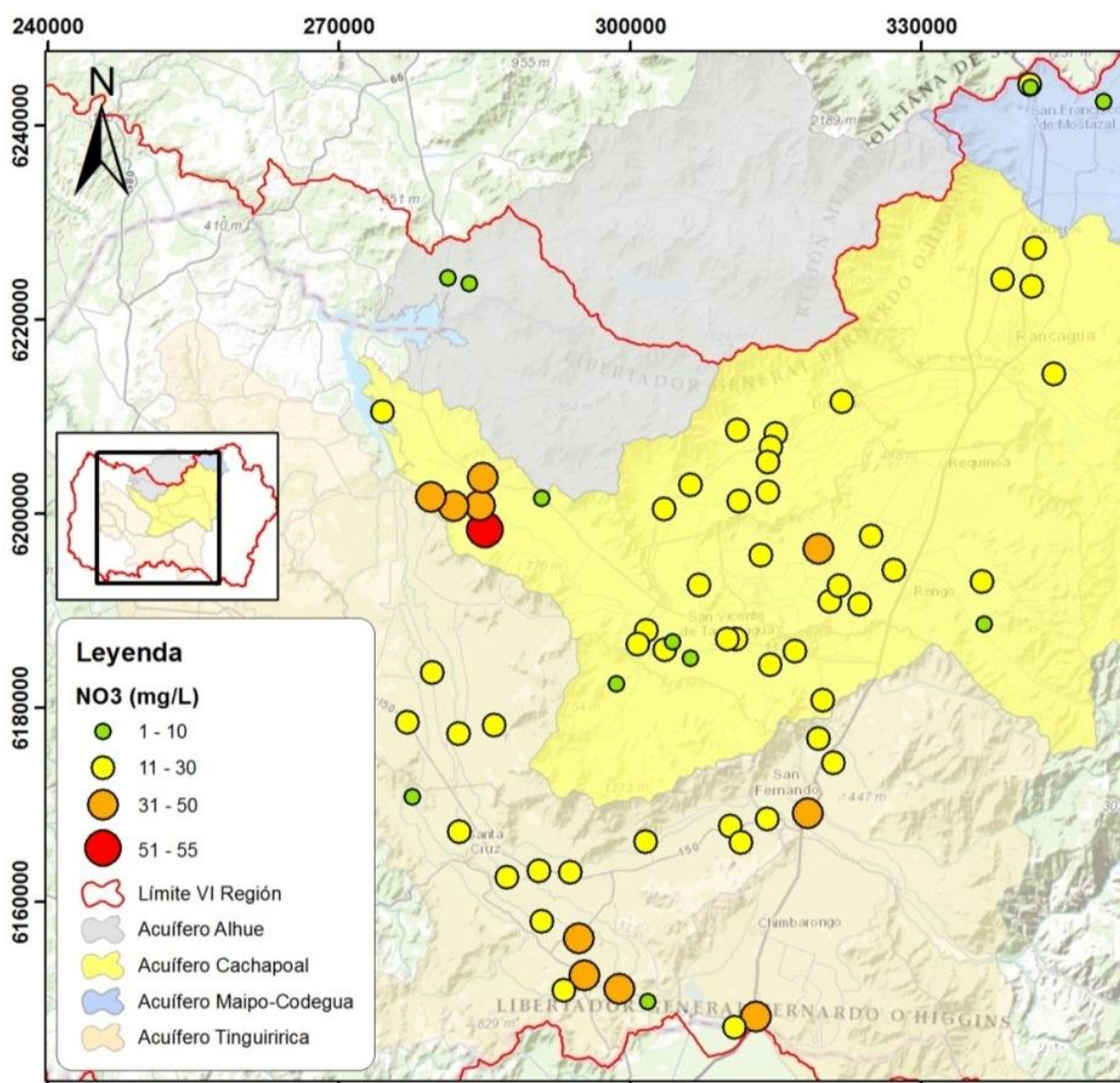


Figura 22: Representación de rangos de concentración de nitrato (NO₃) detectado en los pozos muestreados en acuíferos de la VI Región.

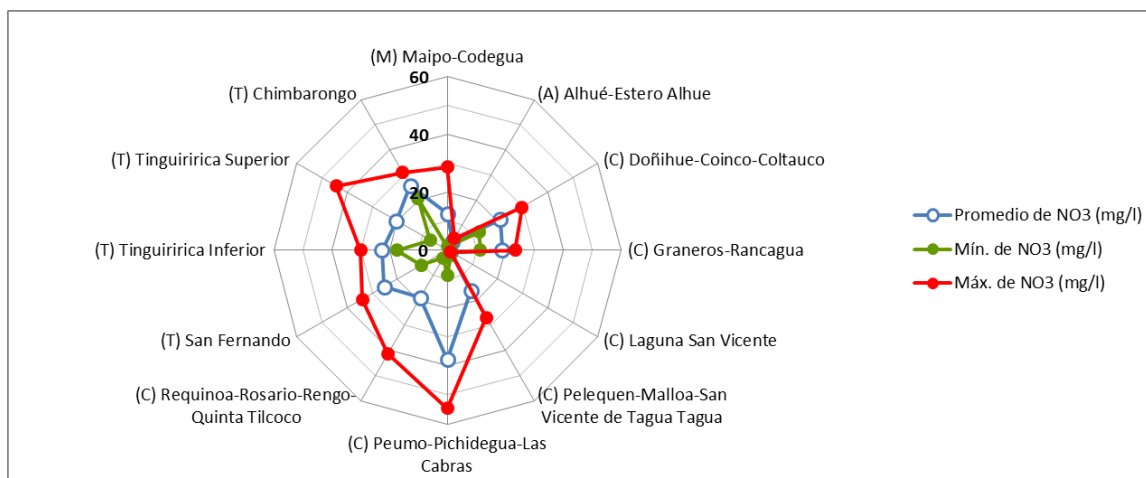


Figura 23: Comparación de concentraciones máximas, mínimas y promedios de Nitrato (NO_3) detectadas por sector acuífero monitoreado en la VI Región. (M) acuífero Maipo-Codegua; (A) acuífero Alhué; (C) acuífero Cachapoal; (T) acuífero Tinguiririca.

Amonio (NH_4) y Fosfato (PO_4)

Los análisis de Amonio (NH_4) informaron que este ion no fue detectado en las aguas subterráneas, debido a que las concentraciones resultaron mínimas, menores al límite de detección del laboratorio ($< 0,01$ mg/L de NH_4).

Los análisis de fosfato (PO_4) detectaron la presencia de este ion en 9 de los 70 pozos, con concentraciones que van en el rango 0,3 mg/L a 0,9 mg/L. Para este parámetro no se dispone de una concentración máxima de referencia pues no está regulado para agua potable o para agua de riego. En términos generales, el fosfato en el agua subterránea tiene su origen en los aportes que hace la materia orgánica existente en el suelo, además de 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, con profundidades que van entre 1,5 y 11,5 metros. Los pozos donde se detectó presencia de fosfato son: Comité de A.P.R. Idahue de San Vicente (0,9 mg/L), Comité de A.P.R. Santa Inés Santa Clarisa (0,5 mg/L), Coop. El Patagual 1 (0,4 mg/L), Comité de A.P.R. La Esperanza (0,3 mg/L), Comité de A.P.R. Los Romos La Pedrina (0,35 mg/L), Comité de A.P.R. La Arboleda Valle Hermoso (0,49 mg/L), Comité de A.P.R. San José del Huique (0,37 mg/L), Comité de A.P.R. Lihueimo (0,34 mg/L) y APR El Barco (0,31 mg/L). En la siguiente figura se comparan las concentraciones detectadas y se informan los sectores acuíferos a los que pertenecen los pozos.

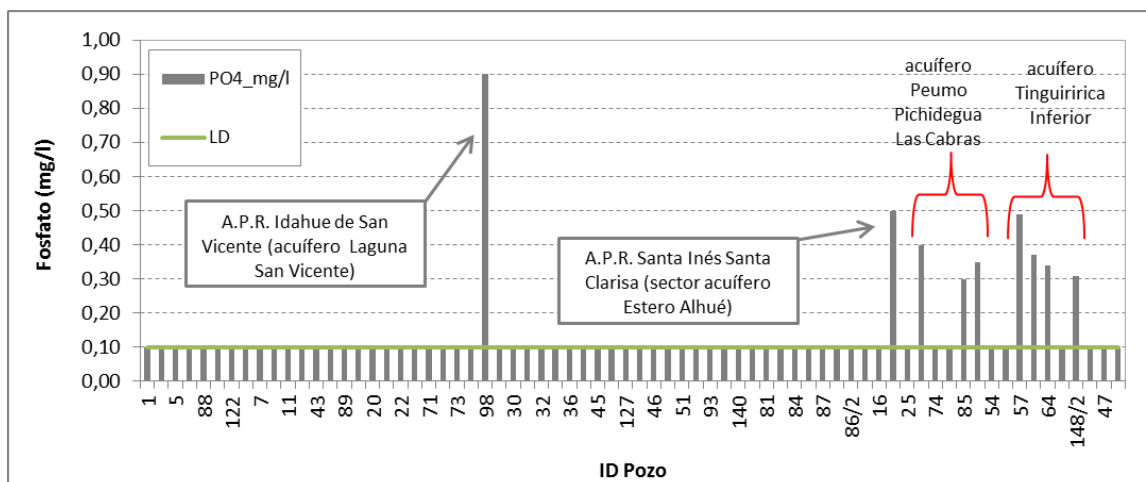


Figura 24: Concentraciones de fósforo (PO_4) detectadas en aguas subterráneas de 9 de 70 pozos muestreados en la VI Región. Los resultados se comparan con el límite de detección (LD) del laboratorio.

6.6. Microelementos

Los resultados de los análisis de microelementos se resumen en la Tabla 3 y Tabla 4. En el Anexo 5 se encuentran en extenso los resultados de los análisis químicos (Planilla Excel en formato digital). Un aspecto positivo a destacar es que ningún pozo registró concentraciones superiores a la norma de agua potable (NCh 409/2005) para los parámetros plata, aluminio, boro, cadmio, cobalto, cromo, cobre, mercurio, molibdeno, níquel, plomo y selenio.

Dentro de los resultados la concentración de arsénico que supera el valor normado para agua potable (NCh 409/2005) en dos pozos de la región: A.P.R. Idahue de San Vicente y A.P.R. La Arboleda Valle Hermoso. El primer pozo tiene una profundidad de 62 m y el nivel freático se midió a 11, 5 m (dinámico); este pozo se ubica en una zona conocida como *Laguna de Taguatagua*, donde se han identificado depósitos lacustres principalmente limos y arcillas con frecuentes horizontes con alto contenido orgánico (Hauser, 2010), lo que podría explicar una condición natural de mayor concentración de arsénico en el agua en comparación a pozos de igual profundidad muestreados en otros sectores acuíferos de la región. Respecto al segundo caso, A.P.R. La Arboleda Valle Hermoso, el pozo tiene una profundidad de 70 m y el nivel freático se midió a 3 m (nivel estático); se ubica en el sector acuífero Tinguiririca Inferior, que según el mapa hidrogeológico en su Hoja Rancagua (Hauser, 2010), señala la existencia de depósitos alternados de bolones, ripios y gravas, con frecuentes niveles lenticulares de arenas; en este caso, la concentración de arsénico (0,013 mg/L) resultó levemente superior a la norma de agua potable (0.010 mg/L de As) siendo, además, consistente en su magnitud con las concentraciones detectadas en los pozos más próximos (ver **Figura 25** y **Figura 26**), donde se detectaron concentraciones levemente superiores a las detectadas en pozos situados en otros sectores acuíferos. Los antecedentes disponibles llevan a considerar que la mayor concentración de arsénico en estos pozos se explicaría más por una condición natural del acuífero, que al efecto de fuentes de contaminación puntuales o difusas.

Por otro lado, los pozos Coop. Juan Nuñez Valenzuela Ltda. PLANTA N2 y Pozo Isla del Guindo presentaron concentraciones de hierro superiores a la norma para agua potable (NCh 409/2005). A su vez, 7 pozos superaron esta norma para el parámetro manganeso: A.P.R. Idahue, A.P.R. El Niche,

A.P.R. Pencahue Bajo, Coop. Juan Nuñez Valenzuela Ltda. PLANTA N2, A.P.R. Los Maitenes Tagua Tagua, A.P.R. Idahue de San Vicente y A.P.R. Nenquén El Tambo La Puerta. Por último, el pozo A.P. Cooperativa Auquinco fue el único que superó la norma NCh 409/2005 en lo que se refiere al parámetro zinc.

En atención a estos resultados, la DGA llevó a cabo un segundo procedimiento de toma de nuevas muestras de aguas subterráneas en cuatro de los pozos antes mencionados. El objetivo fue disponer de nuevos antecedentes que permitiesen conocer la situación actual de la calidad de las aguas subterráneas en cuanto a los parámetros arsénico (As), hierro (Fe), manganeso (Mn) y zinc (Zn). De esta forma, el día jueves 9 de abril de 2015 la Dirección Regional de Aguas realizó la visita, muestreo y posterior envío de las muestras al Laboratorio Ambiental de la DGA en Santiago, donde se procedió a analizar los parámetros antes señalados. Los resultados de este nuevo muestreo se coparan en la tabla a continuación, donde se identifican menores concentraciones de manganeso, hierro y zinc en dos de los cuatro pozos.

Tabla 3: Concentraciones de arsénico (As), manganeso (Mn), hierro (Fe) y zinc (Zn) detectadas en muestras de cuatro pozos APR. Comparación entre análisis químicos realizados en noviembre de 2014 y abril de 2015. Entre paréntesis se indica si supera o no supera los umbrales establecidos en la norma de agua potable (NCh409/2005); para los parámetros en cuestión, los umbrales que fija la norma son los siguientes: As < 0,01 mg/L; Mn < 0,1 mg/L; Fe < 0,3 mg/L; Zn < 3 mg/L.

Pozo	Análisis de Noviembre 2014 (mg/L)	Análisis de abril 2015 (mg/L)	Observación
A.P.R. Idahue de San Vicente	As = 0,034 (supera norma) Mn = 0,52 (supera norma) Fe = 0,29 (NO supera norma) Zn = <0,01 (NO supera norma)	As = 0,042 (supera norma) Mn = 0,51 (supera norma) Fe = 0,40 (supera norma) Zn = 0,41 (NO supera norma)	Nuevo análisis confirma la superación de la norma de agua potable en los parámetros arsénico y manganeso; a esta condición se agrega el parámetro hierro.
A.P.R. la Arboleda Valle Hermoso	As = 0,013 (supera norma) Mn = 0,05 (NO supera norma) Fe = <0,02 (NO supera norma) Zn = <0,01 (NO supera norma)	As = 0,011 (supera norma) Mn = <0,02 (NO supera norma) Fe = 0,03 (NO supera norma) Zn = 0,02 (NO supera norma)	Nuevo análisis confirma la superación de la norma de agua potable en el parámetro arsénico.
A. P. Coop. Auquinco	As = <0,001 (NO supera norma) Mn = <0,02 (NO supera norma) Fe = 0,04 (NO supera norma) Zn = 7,55 (supera norma)	As = <0,001 (NO supera norma) Mn = <0,02 (NO supera norma) Fe = 0,04 (NO supera norma) Zn = 0,06 (NO supera norma)	Nuevo análisis descarta la superación de la norma de agua potable en el parámetro zinc.
Coop. Juan Nuñez Valenzuela Ltda. Planta N° 2	As = <0,001 (NO supera norma) Mn = 0,55 (supera norma) Fe = 0,34 (supera norma) Zn = 0,02 (NO supera norma)	As = <0,001 (NO supera norma) Mn = <0,02 (NO supera norma) Fe = <0,02 (NO supera norma) Zn = 0,01 (NO supera norma)	Nuevo análisis descarta la superación de la norma de agua potable en los parámetros hierro y manganeso.

Tabla 4: Resumen de los resultados de análisis de químicos de microelementos en aguas subterráneas de la VI Región (análisis de concentraciones totales).

Analito	Símbolo	Límite de detección de laboratorio DGA	Límite agua potable (NCh 409/2005)	Límite agua de riego (NCh 1333)	Observación
Plata	Ag	0,01 mg/L	-	0,2 mg/L	No detectado
Aluminio	Al	0,5 mg/L	-	5 mg/L	No sobrepasa normas
Arsénico	As	0,001 mg/L	0,01 mg/L	0,1 mg/L	Sobrepasa norma de agua potable en 2 pozos: A.P.R. Idahue de San Vicente (acuífero Laguna San Vicente) y A.P.R. La Arboleda Valle Hermoso (acuífero Tinguiririca Inferior)
Boro	B	1 mg/L	-	0,75 mg/L	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
Cromo	Cr	0,05 mg/L	0,05 mg/L	0,1 mg/L	No detectado
Cobre	Cu	0,02 mg/L	2 mg/L	0,2 mg/L	No sobrepasa normas
Hierro	Fe	0,02 mg/L	0,3 mg/L	5 mg/L	Sobrepasa norma de agua potable en 2 pozos: Coop. Juan Nuñez Valenzuela Ltda. PLANTA N2 (acuífero Pelequén-Malloa-San Vicente de Tagua Tagua) y Pozo Isla del Guindo (acuífero Tinguiririca Superior)
Mercurio	Hg	0,002 mg/L	0,001 mg/L	0,001 mg/L	No detectado
Manganeso	Mn	0,02 mg/L	0,1 mg/L	0,2 mg/L	Sobrepasa norma de agua potable en 7 pozos: A.P.R. Idahue (acuífero Doñihue-Coinco-Coltauco), A.P.R. El Niche, A.P.R. Pencahue Bajo, Coop. Juan Nuñez Valenzuela Ltda. PLANTA N2, A.P.R. Los Maitenes Tagua Tagua (todos en acuífero Pelequen-Malloa-San Vicente de Tagua Tagua), A.P.R. Idahue de San Vicente (Laguna San Vicente) y A.P.R. Nenquén El Tambo La Puerta (acuífero Tinguiririca Superior)
Molibdeno	Mo	0,05 mg/L	-	0,010 mg/L	No detectado
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
Selenio	Se	0,001 mg/L	0,01 mg/L	0,02 mg/L	No detectado
Zinc	Zn	0,01 mg/L	3 mg/L	2 mg/L	Sobrepasa norma de agua potable en 1 pozo: A.P. Cooperativa Auquenco

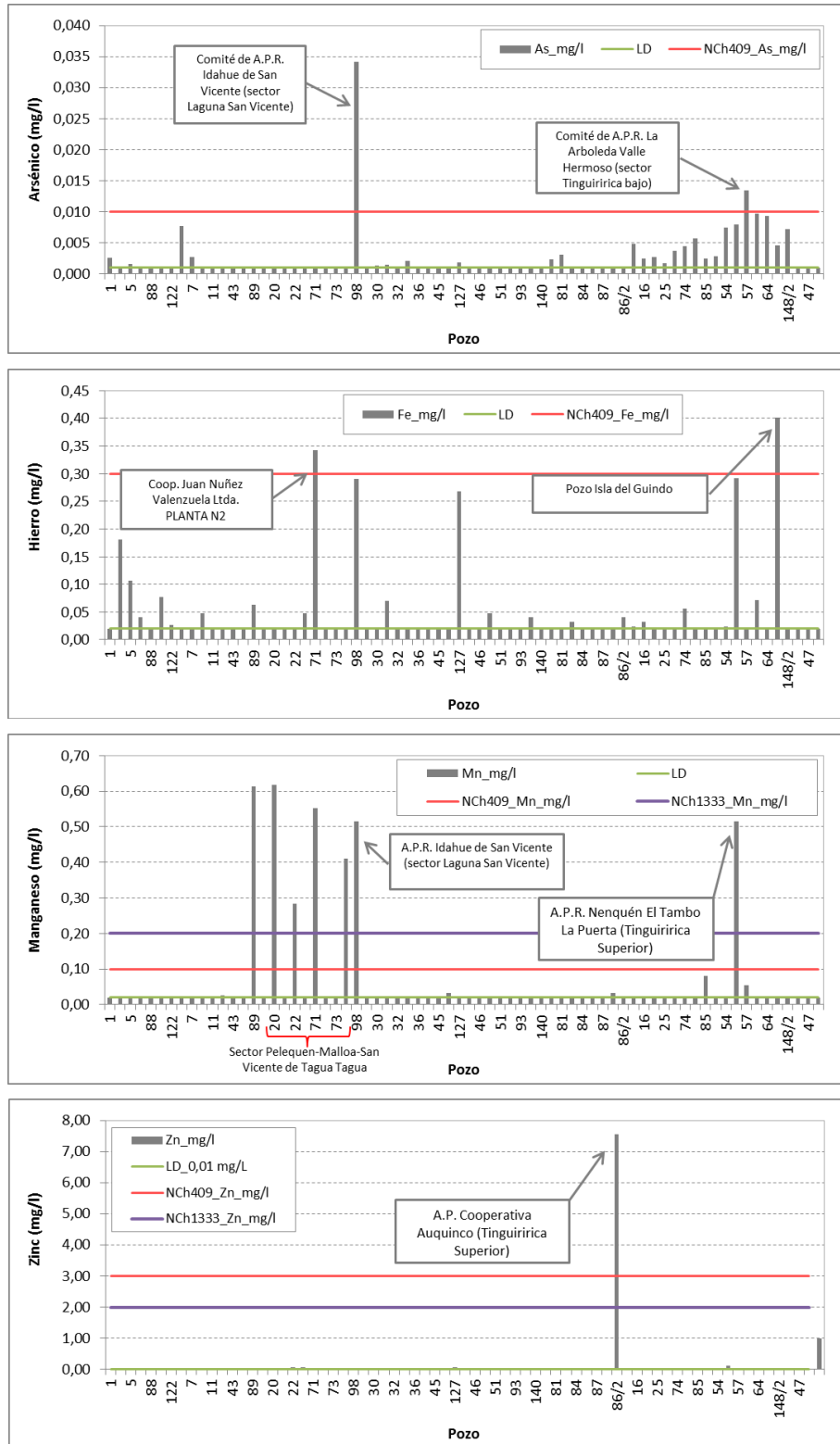


Figura 25: Concentraciones totales de Arsénico, Hierro, Manganeso y Zinc detectadas en aguas subterráneas, comparadas con límites establecidos en la norma de agua potable (NCh 409) y norma para agua de riego (NCh 1333).

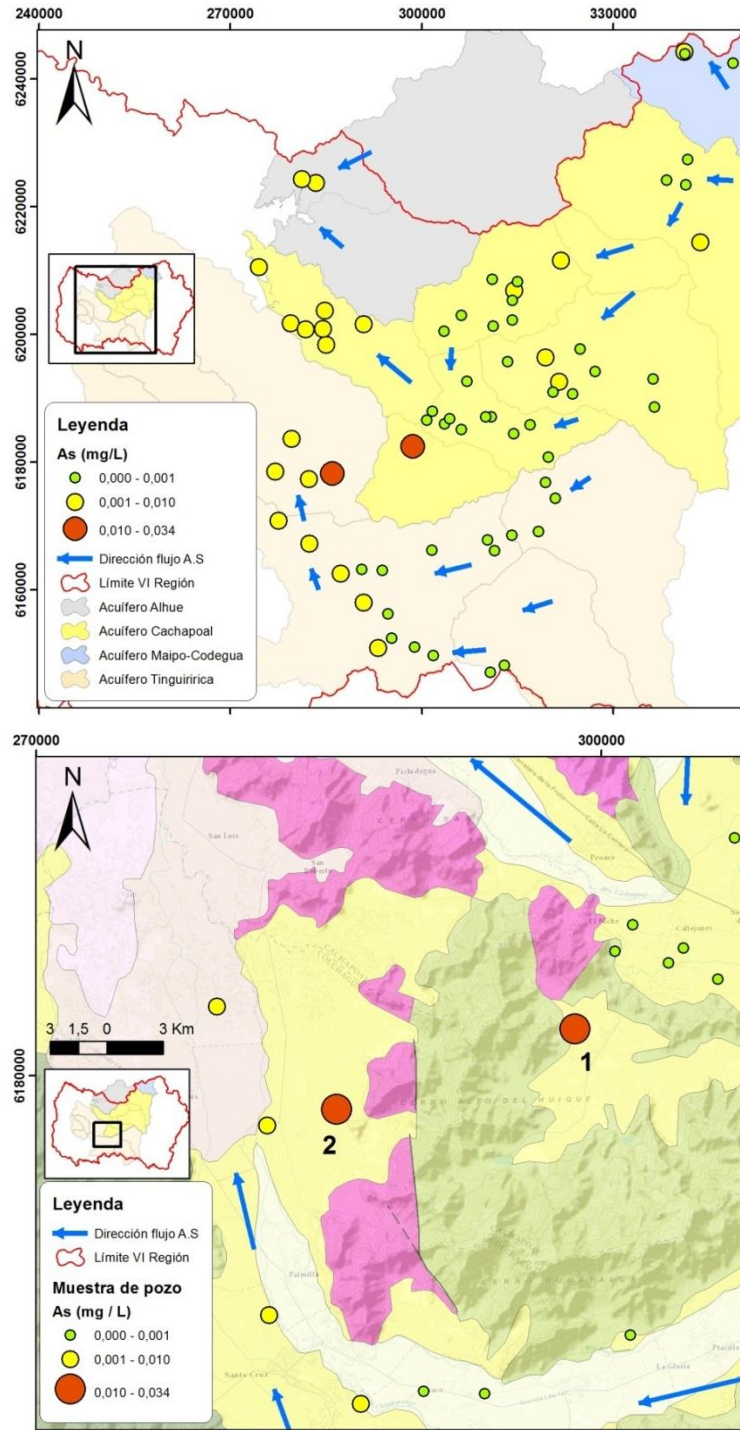


Figura 26: (Arriba) concentraciones de arsénico (por rango) detectadas en los pozos muestreados en la VI Región. (Abajo) pozo 1 corresponde a APR Idahue de San Vicente situado en acuífero Laguna San Vicente y el pozo 2 corresponde a A.P.R. La Arboleda Valle Hermoso en acuífero Tinguiririca Inferior; los colores de fondo representan las distintas unidades hidrogeológicas descritas por Hauser (2010), siendo en ambos formaciones conformadas por materiales no consolidados.

6.7. Pesticidas

La **Figura 27** presenta los resultados de análisis de 54 pesticidas realizados a las muestras de aguas subterráneas tomadas en la región. Basados en las técnicas analíticas utilizadas (cromatografía gaseosa y líquida) y los límites de detección informados por el laboratorio externo contratado (ANALAB), se informa la NO DETECCIÓN de pesticidas.

Estos resultados se consideran muy positivos desde el punto de vista de la protección ambiental y de la población que se abastece de los pozos monitoreados. En esta línea, los resultados también plantean el desafío de incrementar la exigencia 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, especialmente en sectores acuíferos con mayor vulnerabilidad a la contaminación.

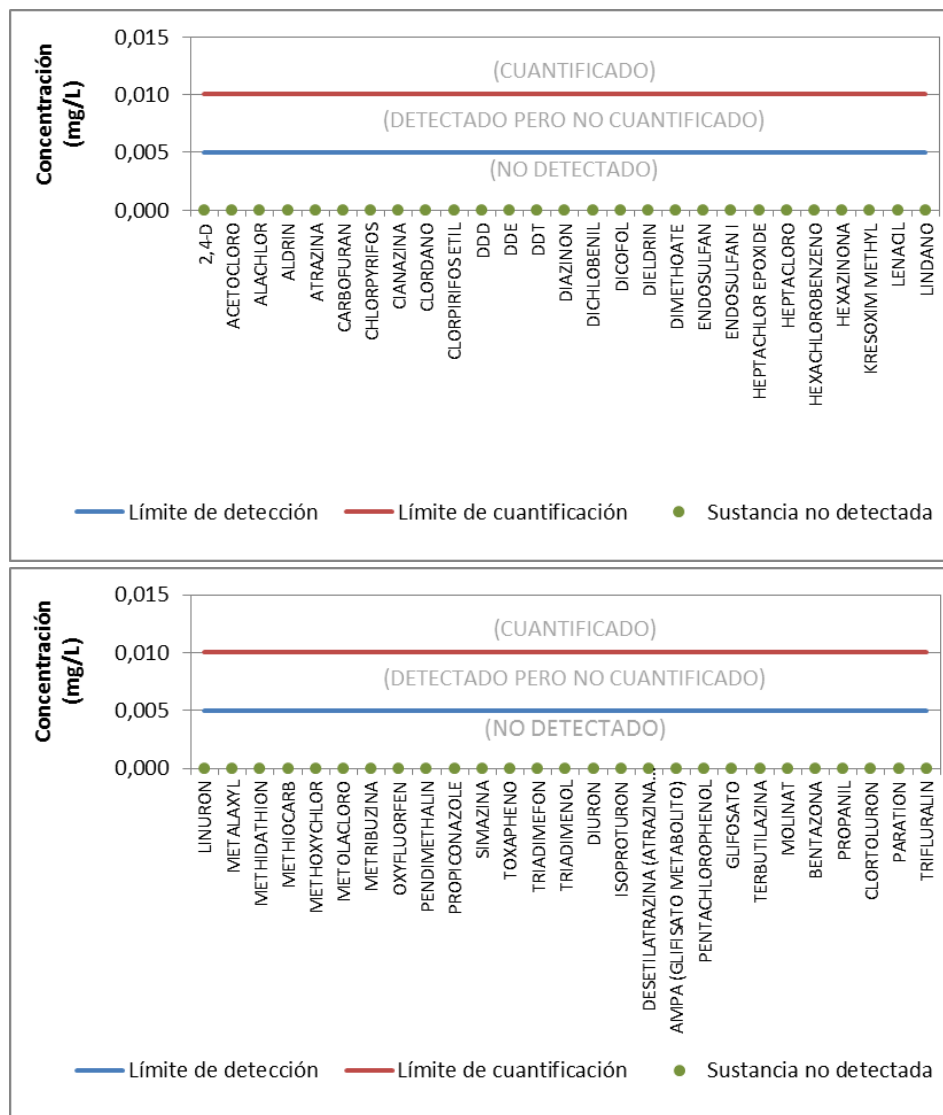


Figura 27: Resultados de análisis de 54 pesticidas en aguas subterráneas de la VI Región. Todos los análisis concluyeron la NO DETECCIÓN de las sustancias analizadas. Límite detección = 0.005 mg/L; Límite de cuantificación = 0.010 mg/L.

7. Conclusiones

El presente estudio permitió conocer la condición actual de calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos Alhué, Codegua, Cachapoal y Tinguiririca, 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.

En atención a los análisis de las concentraciones de iones mayoritarios, se puede destacar que éstas resultaron, en general, dentro de los rangos típicos esperables en aguas subterráneas. Específicamente, las aguas del acuífero Alhué y Codegua fueron clasificadas como bicarbonatadas-cálcicas y las aguas del acuífero Cachapoal y Tinguiririca mostraron mayor variación espacial en su composición, clasificándose en su mayoría como aguas sulfatadas-cálcicas. Puntualmente, para el parámetro Nitrato, se detectó la superación del límite establecido para agua potable en un único pozo (54 mg/L de NO_3 en el pozo A.P.R. Los Romos La Pedrina, en Acuífero Cachapoal, sector acuífero Peumo-Pichidegua-Las Cabras). Adicionalmente, se puede destacar un conjunto de 11 pozos que presentaron concentraciones más elevadas de nitrato, pero sin superar la norma NCh 409/2005: 5 pozos entre 40 y 50 mg/L de NO_3 y 6 pozos entre 30 y 40 mg/L de NO_3 . Los pozos se ubican en los siguientes sectores acuíferos: Peumo-Pichidegua-Las Cabras (4 pozos), Requinoa-Rosario-Rengo-Quinta Tilcoco (1 pozo), San Fernando (1 pozo), Tinguiririca Superior (3 pozos), Tinguiririca Inferior (1 pozo) y Chimbarongo (1 pozo). Estas magnitudes, si bien no sobrepasaron la norma de agua potable (NCh 409/2005), pueden ser consideradas mayores a lo esperable en aguas subterráneas, lo cual podría explicarse por efectos de sustancias orgánicas de origen antrópico (fertilizantes, desechos, etc.) que se infiltran y llegan al acuífero. En este sentido, se debe señalar que la mayoría de los pozos que presentaron concentraciones más elevadas de nitrato se ubican en zonas catalogadas por Sernageomin con ALTA o EXTREMA vulnerabilidad a la contaminación.

En cuanto a los análisis de microelementos, en 10 pozos se detectó al menos un parámetro con concentración mayor al límite de la norma de agua potable: 7 pozos superaron Manganeso, 1 pozo superó Hierro y 1 pozo superó Manganeso y Hierro a la vez, 1 pozo superó el parámetro Arsénico y 1 pozo superó el parámetro Zinc. Los pozos se ubican en los siguientes sectores acuíferos: Doñihue-Coinco-Coltauco (1 pozo), Pelequen-Malloa-San Vicente de TaguaTagua (4 pozos), Laguna San Vicente (1 pozo) y Tinguiririca Superior (3 pozos) y Tinguiririca Inferior (1). Los pozos que se encuentran en estas categorías se indican en la siguiente tabla.

Tabla 5: Resumen de superación de parámetros microelementos en pozos muestreados en la VI Región.

Analito	Límite agua potable (NCh 409/2005)	Observación
Arsénico	0,01 mg/L	Sobrepasa norma de agua potable en 2 pozos: A.P.R. Idahue de San Vicente y A.P.R. La Arboleda Valle Hermoso.
Hierro	0,3 mg/L	Sobrepasa norma de agua potable en 2 pozos: Coop. Juan Nuñez Valenzuela Ltda. PLANTA N2 y Pozo Isla del Guindo.
Manganeso	0,1 mg/L	Sobrepasa norma de agua potable en 7 pozos: A.P.R. Idahue, A.P.R. El Niche, A.P.R. Pencahue Bajo, Coop. Juan Nuñez Valenzuela Ltda. PLANTA N2, A.P.R. Los Maitenes Tagua Tagua, A.P.R. Idahue de San Vicente y A.P.R. Nenquén El Tambo La Puerta.
Zinc	3 mg/L	Sobrepasa norma de agua potable en 1 pozo: A.P. Cooperativa Auquincó.

En relación con la presencia de pesticidas, el estudio incluyó los parámetros normados en la Norma Chilena de Agua Potable (7 pesticidas individualizados) más otros 47 pesticidas diferentes. Los resultados permitieron descartar la presencia de estas sustancias en las aguas de los acuíferos controlados. En el siguiente apartado se incluyen algunas recomendaciones al respecto para futuros estudios de este tipo.

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 (NO₃) dentro de un rango de precaución, por cuanto las concentraciones resultaron entre 30 y 50 mg/L de NO₃; en la **Figura 28** se presenta una comparación espacial de estos mismos resultados.

Tabla 6: 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). Para cada “sector acuífero” se indica el acuífero del que forma parte, de acuerdo a la siguiente simbología: (M) acuífero Maipo-Codegua, (A) acuífero Alhué, (C) acuífero Cachapoal y (T) acuífero Tinguiririca.

N°	Sector acuífero	Parámetros que superan norma NCh 409/2005					Parámetro
		Arsénico	Hierro	Manganeso	Zinc	Nitrato	Nitrato >30 mg/L
1	(M) Maipo-Codegua						
2	(A) Alhué-Estero Alhue						
3	(C) Graneros-Rancagua						
4	(C) Requinoa-Rosario-Rengo-Quinta Tilcoco						1 pozo
5	(T) Chimbarongo						1 pozo
6	(T) San Fernando						1 pozo
7	(C) Doñihue-Coinco-Coltauco			1 pozo			
8	(C) Pelequen-Malloa-San Vicente de Tagua Tagua		1 pozo	4 pozos			
9	(C) Laguna San Vicente	1 pozo					
10	(C) Peumo-Pichidegua-Las Cabras					1 pozo	4 pozos
11	(T) Tinguiririca Superior		1 pozo		1 pozo		3 pozos
12	(T) Tinguiririca Inferior	1 pozo					1 pozo

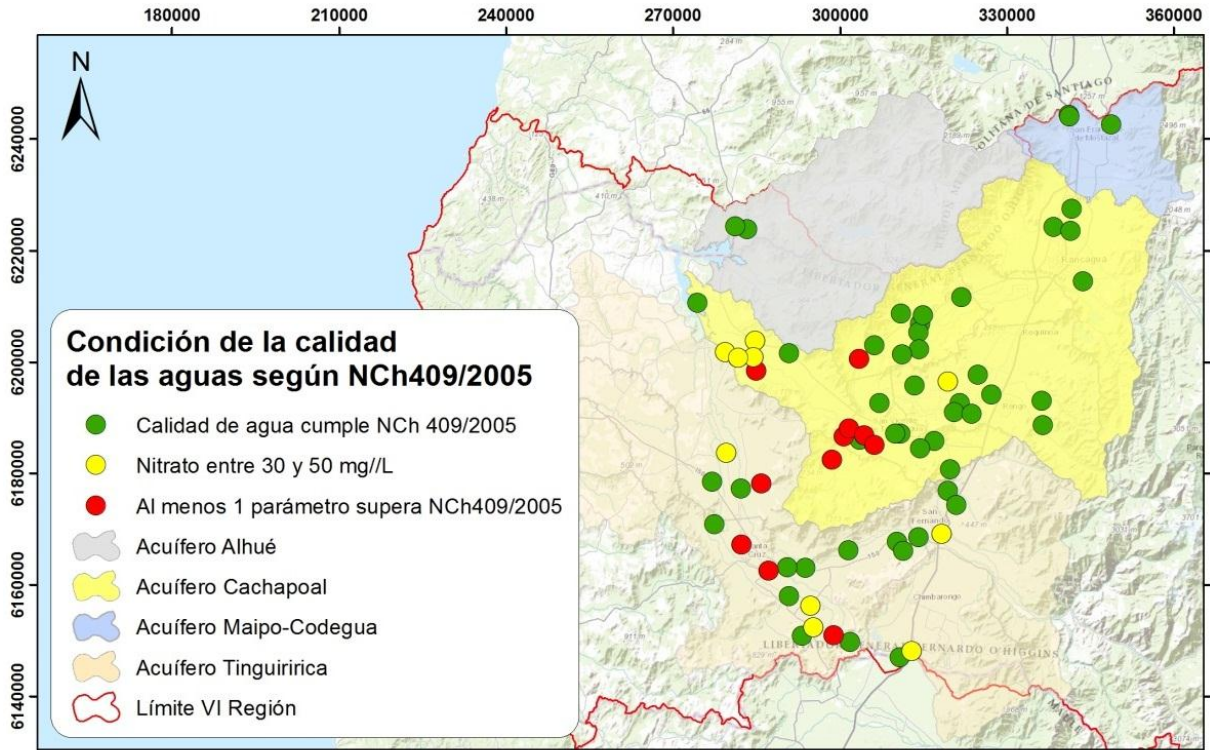


Figura 28: Clasificación de los 70 pozos muestreados según su condición de cumplimiento del estándar de calidad de agua potable (NCh409/2005); los puntos verdes indican cumplimiento en todos los parámetros analizados; los puntos rojos indican que al menos 1 parámetro superó la norma; los puntos amarillos indican cumplimiento de la norma pero presentaron concentraciones de nitrato en un rango considerado de atención (entre 30 y 50 mg NO₃/L).

8. Recomendaciones

En atención a los resultados obtenidos en el presente estudio, se proponen las siguientes recomendaciones en orden de prelación:

1. Implementar un seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas en los seis (6) sectores acuíferos donde se detectaron pozos cuyas aguas sobrepasaron al menos en un parámetro la norma de agua potable (NCh409/2005), dando prioridad a los pozos que superaron el máximo permitido para el parámetro Arsénico (2 pozos) y Nitrato (1 pozo). Con el objeto de mantener las condiciones de entorno y constructivos de los pozos, se debe priorizar la inclusión de los mismos puntos de muestreo, lo cual permitirá disponer de datos que den cuenta de los cambios temporales de las aguas subterráneas. Los sectores acuíferos que se encuentran en esta categoría se representan gráficamente en la **Figura 29**.
2. Implementar un monitoreo de observación de las aguas subterráneas en los otros cinco (5) sectores incluidos en el presente estudio donde se detectaron concentraciones de nitrato en un rango próximo al máximo permitido para agua potable (entre 30 y 50 mg/L de NO_3). Los sectores acuíferos que se encuentran en esta categoría se muestran en la **Figura 29**.
3. En el resto de los sectores acuíferos se recomienda mantener al menos un (1) pozo para la observación de la mantención en el tiempo de la calidad de las aguas subterráneas. Los sectores acuíferos que se encuentran en esta condición se muestran en la **Figura 29**.

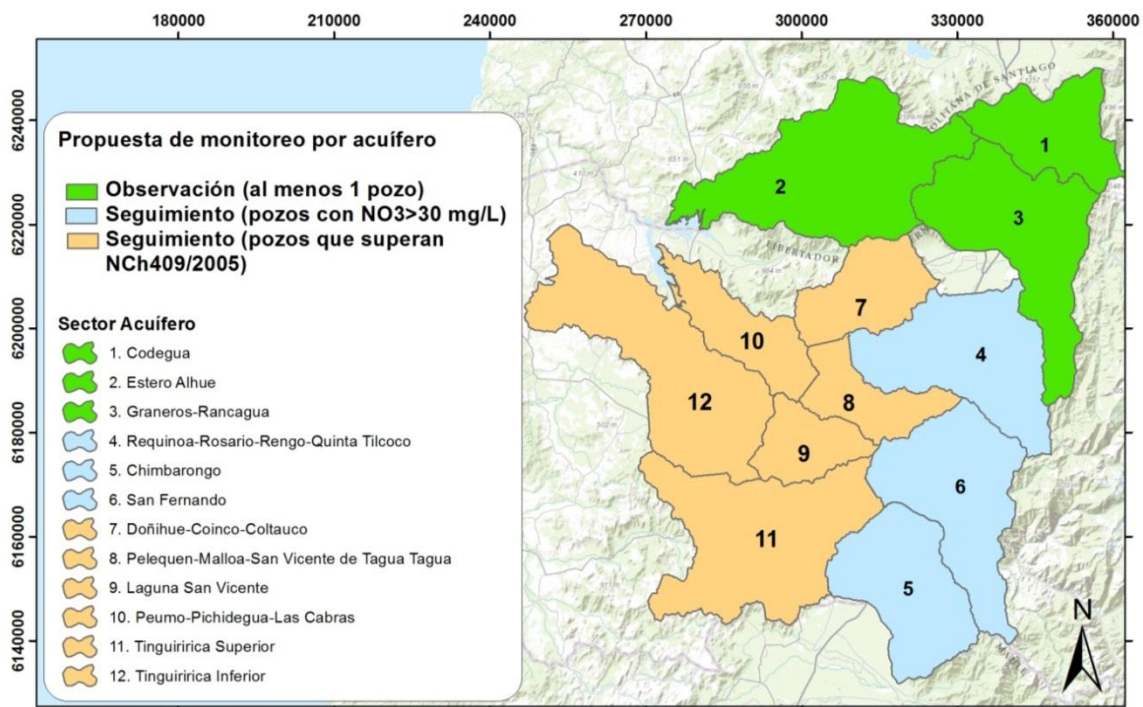


Figura 29: Categorización de los 12 sectores acuíferos de acuerdo a propuesta de continuidad del monitoreo de calidad de agua subterránea. Para sectores acuíferos 1, 2 y 3, se propone pozos de observación (al menos 1 pozo por sector); En sectores acuíferos 4, 5 y 6, se propone seguimiento en pozos donde se detectó nitrato (NO_3) entre 30 y 50 mg/L. En sectores acuíferos 7, 8, 9, 10, 11 y 12, se propone monitoreo en pozos que superaron la norma de agua potable en al menos 1 de los parámetros normados.

4. Otras recomendaciones a considerar:

- a. Profundizar el análisis 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.
- b. 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.
- c. 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.
- d. 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.
- e. 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.
- f. Como un criterio general, se recomienda enfocar los muestreos en pozos con la menor profundidad posible, por ser éstos más sensibles a modificaciones por fuentes de contaminación puntual o difusa existentes en la zona.
- g. 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.
- h. Evaluar la factibilidad técnica y económica de incluir parámetros complementarios a los análisis de aguas subterráneas, entre otros se puede considerar: sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto, potencial óxido-reducción, DQO, DBO y alcalinidad.
- i. 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.
- j. 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. De acuerdo con lo expuesto en la Tabla 1 al inicio del informe, en la VI Región los 13 sectores

acuíferos que se indican a continuación, no se incluyeron en el presente estudio y se encuentran actualmente en categoría de área de restricción: Sector San Antonio subsector Estero San Antonio, Estero el Rosario, Río Rapel antes junta estero Rosario, Río Rapel bajo junta estero Rosario, Nilahue en Santa Teresa, Estero Pumanque, Estero Lolol, Nilahue antes de Quiahue, Estero Quiahue, El Monte, Estero Las Cadenas-Marchigue, Las Cadenas-Yerbas Buenas y sector Olivar.

5. Recomendaciones asociadas a la Gestión de los Recursos Hídricos.

El conocimiento y protección de la calidad de las aguas subterráneas requiere integrar esfuerzos de las distintas instituciones gubernamentales, los usuarios y la sociedad civil en general. En esta línea, se plantean las siguientes recomendaciones:

- a. Continuar con el modelo colaborativo utilizado para el logro de este trabajo. A saber, apoyo entre el nivel central y regional de la DGA para la selección de pozos y toma de muestras, y a su vez apoyo en con la DOH (Dirección de Obras Hidráulicas) regional para acceder a los pozos administrados por las comunidades locales. Además, apoyo de especialistas del Ministerio del Medio Ambiente para la selección de parámetros, especialmente pesticidas.
- b. Considerando que un costo importante corresponde a la toma de muestras de agua en terreno, se recomienda evaluar estrategias para optimizar el mecanismo de obtención de muestras representativas de los acuíferos. Una alternativa a considerar se orienta a integrar de un modo más activo a los Comités de Agua Potable Rural, de modo que sean éstos los que recojan las muestras y las despachen a la oficina regional de la DGA. En una línea de acción complementaria, se debe avanzar en identificar a otros actores claves que se interesen en colaborar con la generación de conocimiento de los recursos hídricos de la región, ya sea poniendo a disposición su infraestructura (pozos construidos), colaborando con los muestreos en terreno o con el análisis de los datos que se generen (Universidades, Centros de Investigación, Organizaciones de Usuarios, etc.).
- c. Se recomienda entregar y difundir los resultados a las autoridades regionales y a la comunidad, con el fin de promover una mayor conciencia de la calidad de las aguas subterráneas y la importancia de mantenerla.
- d. Para facilitar la lectura e interpretación de los resultados, se recomienda generar, por ejemplo, índices de calidad por acuífero o sector acuífero. Para estos efectos, se puede aplicar la metodología y los criterios propuestos en el estudio de Geohidrología para DGA (2009), lo cual fue aplicado con éxito en los acuíferos Loa, Los Choros y Aconcagua.
- e. Almacenar la información colectada en una base de datos que perdure en el tiempo.
- f. Disponer de una plataforma en línea con los resultados generados en los monitoreos de aguas subterráneas, para efecto de conocimiento ciudadano.
- g. Con el objetivo de avanzar en la gestión sustentable del agua, donde la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos (DGA, 2012) señala como un objetivo prioritario el prevenir la contaminación difusa de las aguas superficiales y subterráneas, se recomienda identificar los canales de acción y definir medidas en el caso que un acuífero o un sector acuífero se vea afectado en su calidad del agua por efecto de fuentes de contaminación puntuales o difusas.
- h. Finalmente, se recomienda propender hacia un monitoreo del estado de los acuíferos que integre la evolución espacial y temporal de aspectos tanto cuantitativos (niveles) como cualitativos (calidad de agua). Esto permitiría identificar oportunamente los cambios en una o ambas variables de estado de los acuíferos y orientar las medidas de gestión que amerite cada caso.

9. Bibliografía

1. Acuña, A. 2005. Presencia de Pesticidas en Fuentes de Agua Potable en Chile. Tesis Universidad de Chile. Departamento de Ingeniería Civil.
2. Custodio, E., Llamas, R. 1996. Hidrología Subterránea. Ed. Omega, Segunda Edición Corregida. Barcelona.
3. Dirección General de Aguas (DGA). 2005. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la VIª Región. SDT N°209.
4. 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.
5. Dirección General de Aguas (DGA). 2009. Diagnóstico y Clasificación de Sectores Acuíferos. Geohidrología Consultores Ltda.
6. Dirección General de Aguas (DGA). 2011. Diagnóstico de Aguas Subterráneas VI Región.
7. Dirección General de Aguas (DGA). 2012. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos.
8. Dirección General de Aguas (DGA). 2013. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos. Ministerio de Obras Públicas.
9. 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”.
10. 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.
11. González, S. 2007. Contaminación Difusa de las Aguas. Publicado en: Revista IniaTierra Adentro, Ed. Noviembre – Diciembre 2007.
12. Hauser, A. 1990. Carta Hidrogeológica de Chile, Hoja Rancagua, VI Región. Sernageomin. Escala 1:250.000.
13. INIA, 2007. Caracterización del Manejo de Herbicidas en Aguas Subterráneas. Boletín N°167, cap. 9, pág. 101-110. Centro Regional de Investigación La Platina.
14. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). 2003. MAPA Geológico de Chile [versión digital]. Subdirección Nacional de Geología. Escala 1:1.000.000.
15. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). 2007. Informe de venta de plaguicidas de uso agrícola en Chile.
16. 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.
17. Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin). 1990. CARTA Hidrogeológica de Chile, Hoja Rancagua VI Región. Hauser, A. Escala 1:250.000.

ANEXOS (Digitales)

Anexo 1: Listado de los pozos incluidos en el estudio.

Anexo 2: Listado de parámetros químicos analizados en laboratorio.

Anexo 3: Instructivo DGA para el muestreo de aguas subterráneas.

Anexo 4: Fichas de pozos con datos registrados en terreno.

Anexo 5: Resultados de análisis químicos.