



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN GEOGRAFÍA

Área Geografía Ambiental

**LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA Y SU RELACIÓN  
CON EL MODELO DE GESTIÓN DEL AGUA EN LA PARTE MEDIA-ALTA  
DE LA CUENCA DEL RÍO PETORCA, REGIÓN DE VALPARAÍSO, CHILE**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

DENISSE ALEJANDRA DE LA FUENTE VIVANCO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ J. CARRILLO RIVERA, Instituto de Geografía – Depto. Geografía Física, Universidad Nacional Autónoma de México.

JURADO:

DR. GONZALO HATCH KURI, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México. Colegio de Geografía.

DRA. ELISABET VERÓNICA WEHNCKE, Centro de Investigación en Biodiversidad y Conservación, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

DRA. NAXHELLI RUIZ RIVERA, Instituto de Geografía – Depto. Geografía Social, Universidad Nacional Autónoma de México.

MTRO. VLADIMIR E. VICENCIO RIVEROS, Oficina de Asuntos Hídricos y Medio Ambiente, I. Municipalidad de Petorca, Chile.

Ciudad de México, octubre de 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de Contenidos .....	0
Índice de Tablas.....	1
Índice de Figuras .....	2
Agradecimientos .....	4
Resumen .....	5
Glosario .....	6
Abreviaciones .....	11
1. Introducción.....	12
1.1. Ubicación del Área de Estudio.....	15
1.2. Antecedentes .....	16
1.3. Planteamiento del problema.....	17
1.4. Justificación.....	18
2. Diseño de Investigación.....	19
2.1. Objetivos.....	19
2.2. Preguntas de Investigación.....	20
2.3. Hipótesis.....	20
2.4. Metodología General del Estudio .....	21
3. Caracterización Hidrosocial de la comuna de Petorca.....	23
3.1. Antecedentes Sociales y demográficos de la comuna de Petorca .....	24
3.2. Metodología .....	26
3.2.1. Técnicas de recolección.....	27
3.3. Resultados .....	28
3.3.1. Uso, Administración y Gestión del Agua Subterránea en la comuna de Petorca .....	36
3.3.2. Identificación de factores de afectación al agua subterránea percibidas por la comunidad	
46	
3.4. Construcción de la vulnerabilidad hídrica en Petorca.....	51
3.4.1. Vulnerabilidad Hídrica y Conceptos Relacionados .....	52
3.4.2. Vulnerabilidad Hídrica en Petorca .....	55
3.5. Conclusiones Preliminares.....	66
4. Modelo Hidrogeológico Conceptual .....	70
4.1. Marco Teórico .....	70
4.2. Metodología .....	74
4.3. Características Hidrográficas .....	75
4.4. Referente Geológico .....	76
4.5. Referente Geomorfológico .....	82
4.6. Clima, Vegetación y Suelo .....	85
4.7. Antecedentes Hidrogeológicos.....	91

4.8. Identificación de zonas de recarga y descarga .....	95
4.9. Identificación de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea .....	98
4.9.1. Parámetros fisicoquímicos medidos en campo .....	99
4.9.2. Caracterización hidrogeoquímica.....	106
4.9.4. Caracterización isotópica de $^2\text{H} - ^{18}\text{O}$ .....	131
4.10. Modelo conceptual de los sistemas de flujo de agua subterránea en la parte media y alta de la cuenca de Petorca .....	136
5. Calidad del Agua Subterránea para riego y consumo humano .....	146
5.1. Fuentes de $\text{NO}_3$ , $\text{SO}_4$ , Mn y Mo en el agua subterránea .....	146
5.2. Riesgos para la salud de la población .....	148
6. Discusión.....	150
6.1. Respuesta a las Preguntas de Investigación.....	150
6.2. Falencias en el actual modelo de administración y gestión del agua, desde un punto de vista hidrogeológico.....	155
6.2.1. Desconocimiento sobre el agua subterránea y su relación con el ambiente.....	155
6.2.2. Acuífero: unidad de estudio y de administración del agua subterránea.....	156
6.2.3. Balance Hidrológico: es la aproximación adecuada para estudiar y administrar el agua subterránea?.....	159
6.3. Fuentes potenciales de contaminación y manejo de residuos .....	162
6.4. Consideraciones para una gestión integral y sustentable del Agua Subterránea en Petorca .....	164
7. Conclusiones.....	168
Referencias .....	173
Bibliografía .....	181
ANEXO 1.....	182
ANEXO 2.....	186
ANEXO 3.....	188
ANEXO 4.....	191
ANEXO 5.....	192
ANEXO 6.....	194



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Temas y observables abarcados en las entrevistas y cartografía participativa realizadas en el trabajo de Campo I (enero de 2020). .....	27
Tabla 3.2. Titulares efectivos de derechos de agua en la Cuenca del Río Petorca. ....	36
Tabla 3.3. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) que conforman el Acuífero del Río Petorca, definidos por la Dirección General de Aguas (DGA).....	37
Tabla 3.4. Derechos de agua subterránea inscritos por las CASUB en el Acuífero Río Petorca.....	38
Tabla 3.5. Organizaciones de Agua Potable Rural (APR) de la Comuna de Petorca, indicando si reciben (“MOP”) o no (“No MOP”) apoyo del MOP (Ministerio de Obras Públicas).....	40
Tabla 3.6. Estado de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea. ....	42
Tabla 3.7. Organismos estatales vinculados directamente con la gestión del agua en Chile. ....	60
Tabla 4.1. Clases de capacidades de usos de suelo.....	89
Tabla 4.2. Indicadores para diferenciar zonas de recarga y descarga de agua subterránea.....	96
Tabla 4.3. Identificación de los puntos de muestreo y coordenadas UTM.....	98
Tabla 4.4. Parámetros fisicoquímicos medidos en campo.....	100
Tabla 4.5. Agrupación de muestras según rangos de temperatura. ....	101
Tabla 4.6. Valores de alcalinidad obtenidos en campo, calculados a partir del método de Gran. ..	104
Tabla 4.7. Concentración de aniones y cationes presentes en las muestras estudiadas. ....	108
Tabla 4.8. Cálculo del porcentaje de error con base en el balance iónico.....	109
Tabla 4.9. Valores de aniones y cationes normalizados (meq/l).....	109
Tabla 4.10. Facies hidroquímicas y contenido de Li.....	111
Tabla 4.11. Proveniencia de los iones mayoritarios y minoritarios presentes en el agua subterránea y su posible vinculación con las unidades geológicas del área de estudio.....	116
Tabla 4.12. Minerales asociados a los eventos de alteración hidrotermal. ....	120
Tabla 4.13. Contenido de algunos elementos traza, destacando los pozos que presentan condiciones más reductoras. ....	122
Tabla 4.14. Cálculo de $pE = (Eh * F) / (Cte * R * T)$ . ....	127
Tabla 4.15. Algunos polimorfos de SiO <sub>2</sub> y sus propiedades cristalinas.....	128
Tabla 4.16. Índices de saturación (IS) obtenidos en PHREEQC.....	130
Tabla 4.17. Composición isotópica de las muestras analizadas. ....	134
Tabla 4.18. Líneas Meteóricas publicadas para algunas zonas de Chile. ....	135
Tabla 5.1. Puntos de muestreo que presentan una calidad de agua inapropiada para riego y/o consumo humano, según la Norma Chilena Oficial. ....	146
Tabla 6.1. Resumen de valores hidroquímicos, isotópicos y de parámetros fisicoquímicos obtenidos en este trabajo.....	154
Tabla 6.2. Variables que intervienen en el Balance Hidrológico de un “acuífero”, con sus respectivos datos requeridos para el cálculo de la variable. ....	160

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Ubicación de la Comuna de Petorca, Región de Valparaíso, Chile. ....	15
Fig. 2. Ubicación de la red de comités y cooperativas de APR en la parte media y alta de la Cuenca del Río Petorca.....	29
Fig. 3. Fotografías: A) Estanques de acumulación de agua. B) Lecho del Río Petorca.....	30
Fig. 4. Manifestaciones del conflicto por el acceso al agua.....	30
Fig. 5. Fotografías de pozos y acumuladores de APRs visitados para entrevista.....	32
Fig. 6. Sesión de Cartografía Participativa.....	33
Fig. 7. Resultado de la sesión de Cartografía participativa.....	35
Fig. 8. Digitalización de la cartografía participativa.....	35
Fig. 9. A) Acuíferos definidos por la DGA. B) Áreas de Restricción y Zonas de Prohibición. C) Sectorización del Acuífero Río Petorca.....	38
Fig. 10. Estado de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea.....	41
Fig. 11. Sistema de Aducción que abastece de agua subterránea a 10 APR.....	43
Fig. 12. Mapa de actores del sistema hidrosocial de la Comuna de Petorca.....	45
Fig. 13. Distribución de los derechos de agua de empresas agrícolas, junto a drenes y pozos ilegales catastrados por la DGA en el 2011, en los valles del Río Petorca y Río La Ligua.....	48
Fig. 14. Desecho de aguas negras al Río Petorca. Publicado por el medio El Choclo.....	48
Fig. 15. Imagen satelital indicando la ubicación del vertedero de Chicolco.....	49
Fig. 16. Ubicación de relaves (jales) mineros en la Comuna de Petorca.....	50
Fig. 17. Relave (jale) de la mina abandonada Dulcinea, próxima a las plantaciones de paltos (aguacate) en el valle del Río Pedernal.....	50
Fig. 18. Elementos sociales que construyen un espacio de vulnerabilidad y de no vulnerabilidad, en la dimensión social del agua.....	55
Fig. 19. Esquema de los componentes sociales de la Vulnerabilidad Hídrica en Petorca.....	58
Fig. 20. Página web de la DGA mostrando el Mercado del Agua” y “Remate de Derechos de Agua”.....	59
Fig. 21. Derechos de agua y caudales en la Región de Valparaíso, y los 4 grupos familiares que concentran la mayoría de estos derechos.....	62
Fig. 22. Esquema de la interacción entre el Ciclo Hidrológico y las dimensiones sociales para dar como resultado el Ciclo Hidrosocial, y las formas de mediación del agua observadas en la comuna de Petorca.....	69
Fig. 23. Modelo de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea en una cuenca regional.....	71
Fig. 24. Cuenca del Río Petorca, subcuencas y principales afluentes.....	76
Fig. 25. Mapa geológico de la Comuna de Petorca, escala 1:10,0000.....	77
Fig. 26. Dominios estructurales en la Comuna de Petorca.....	81
Fig. 27. Ubicación de labores mineras (menas de Cu, Au y Ag).....	82
Fig. 28. Modelo de elevación de terreno de la Cuenca del Río Petorca y red hidrográfica.....	83
Fig. 29. Imágenes de Google Earth mostrando morfologías fluviales en el Valle de Petorca.....	84
Fig. 30. Bioclimas de la región de Valparaíso.....	86
Fig. 31. Mapa de uso de suelo y vegetación de la Comuna de Petorca.....	87
Fig. 32. Mapa de clases de capacidad de usos de suelo adaptados para cultivo.....	88

Fig. 33. Diferentes ambientes de desarrollo de suelo y vegetación en Petorca. ....	90
Fig. 34. Sector Petorca Interior definido en el Proyecto Aconcagua de la CNR (1995). ....	92
Fig. 35. Delimitación de zonas de recarga y descarga. ....	97
Fig. 36. Ubicación de los puntos de muestreo (febrero, 2021).....	98
Fig. 37. Distribución de la temperatura del agua subterránea .....	101
Fig. 38. Valores de alcalinidad medida en campo, agrupados por sector acuífero .....	105
Fig. 39. Trabajo de medición de parámetros fisicoquímicos del agua subterránea en campo.....	105
Fig. 40. Diagrama de Piper. ....	110
Fig. 41. Diagramas de Stiff, agrupados según los sectores acuíferos de la Comuna de Petorca .....	114
Fig. 42. Gráficos de variación de los componentes mayoritarios del agua subterránea vs Cl-.....	115
Fig. 43. Minerales formadores de rocas ígneas, según la composición de los magmas .....	117
Fig. 44. Etapas y velocidades de reacción en la generación de drenaje ácido.. .....	121
Fig. 45. Rasgos químicos y fisicoquímicos que distinguen a las muestras P06, P08 y P16.....	123
Fig. 46. Diagramas de estabilidad dependientes del pH y Eh para especies de S y F .....	124
Fig. 47. Gráficos de variación del Índice de saturación reportados por PHREEQC .....	129
Fig. 48. Diagrama isotópico $\delta$ 2H vs $\delta$ 18O .....	132
Fig. 49. Gráfico $\delta$ 2H vs $\delta$ 18O para las muestras estudiadas, y diferentes condiciones de recarga .....	134
Fig. 50. Perspectiva regional y perfil topográfico .....	135
Fig. 51. Criterios para definir la jerarquía de los sistemas de flujo de agua subterránea. ....	136
Fig. 52. A) Mapa piezométrico del sector alto del Valle de Petorca. B) Hierro Viejo y La Ñipa.....	139
Fig. 53. Perfil del “acuífero de Petorca”, variaciones en el espesor de los depósitos y “basamento”. ....	140
Fig. 54. Perfiles a lo largo de los valles de Pedernal y Petorca y Valle Las Palmas .....	141
Fig. 55. Perfil 1 desde Pedernal a Artificio, mostrando el sistema de flujos locales.....	142
Fig. 56. Perfil 2 a lo largo del Valle Las Palmas.....	143
Fig. 57. Extracto del plano de equipotenciales en la parte baja del Valle Las Palmas.....	143
Fig. 58. Esquema de los sistemas de flujo de agua subterránea (perspectiva regional) .....	145
Fig. 59. Puntos de muestreo de agua subterránea que exceden los límites permisibles de la Norma Chilena Oficial para riego y consumo humano.....	148
Fig. 60. Comparación entre los acuíferos Río Petorca y Río La Ligua, y el mapa geológico.....	158

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Marisol, Eduardo y Marxel, quienes inspiraron la búsqueda de un camino donde aportar mi granito de arena; gracias por su amor y apoyo incondicional.

Agradezco a Vladimir Vicencio por abrir mis ojos y dirigir mi atención hacia Petorca, una comuna del Chile rural, donde pude conocer y experimentar el despojo del agua, lo cual despertó mi interés por estudiar el agua subterránea más allá de las fronteras geológicas.

Así encontré asilo en los pupitres de Joel Carrillo, connotado investigador, gran maestro y amigo, a quien agradezco su tremendo apoyo, paciencia y confianza. Gracias por abrirme las puertas a México y al fascinante mundo del agua subterránea. Al Dr. José Ramón, coordinador del Posgrado de Geografía, agradezco su humanidad; sin su ayuda no habría logrado vencer los múltiples obstáculos que se presentaron en el camino.

Este proyecto se concretó gracias al apoyo económico de diversas fuentes: (1) **Beca CONACYT** (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología), otorgada por el Gobierno Federal Mexicano. (2) **Beca Atlántida Coll**, entregado por el Instituto de Geografía de la UNAM, gracias a las gestiones y apoyo de Naxhelli Ruiz y Penélope Márquez. (3) Los análisis químicos fueron financiados por **Marisol Vivanco**. (4) Los análisis isotópicos fueron financiados por el **Laboratorio de Análisis Isotópico de la Universidad Andrés Bello** (UNAB), Viña del Mar, Chile, gracias a la gestión de Justinne Rybertt y Francisco Fernandoy.

El trabajo de campo en Petorca fue posible gracias a la desinteresada colaboración de sus habitantes: Vladimir Vicencio, Álvaro Escobar, Claudio Martínez, Nicolás Quiroz, Heriberto Araya, Sergio Rodríguez, Gonzalo Vargas, Luis Godoy, Katy Espinoza, Temo Silva, Carolina Vilches, Ignacio Villalobos, Ricardo Ferreira, Felipe Figueroa, y todas/os las/os dirigentes de la red de Agua Potable Rural de Petorca y particulares que aportaron con información. En especial, agradezco el importante trabajo en terreno de Marxel De la Fuente, Enrique Benavides y Pablo Verger, quienes ayudaron con la logística y resolución de problemas presentados en campo.

Por su valiosa contribución de material digital, agradezco a Vladimir Vicencio, Rodrigo Pérez, Justinne Rybert, Carolina Vilches y Claudio Martínez. También doy gracias al Dr. Gonzalo Hatch-Kuri por facilitar el acceso a los Trabajos de Investigación y Docencia del Seminario de Agua Subterránea y Cambio Climático del Instituto de Geografía, a cargo del Dr. Gonzalo Hatch-Kuri, Dr. José Carrillo-Rivera y la Dr. Carmen Carmona.

Joel Carrillo, Rafael Huizar† y Samira Ouyse, muchísimas gracias por sus valiosas lecciones para el trabajo en campo. Flor Navarrete, muchas gracias por su apoyo para la calibración de los equipos y preparación del muestreo de agua subterránea. Agradezco a cada uno de mis sinodales, por sus nutritivos aportes, correcciones y cuestionamientos que permitieron mejorar este trabajo.

Finalmente, doy gracias a todas/os quienes contribuyeron a mi formación profesional y desarrollo personal, profesoras/es del posgrado, compañeras/os, amigas/os, Sebastián Silva, Lorena Gaeta, Gloria Salazar, Lisette Soto, Manuel Agüero, Dania López. Agradezco especialmente a Enrique, Mon, Chucho, Yazlin, Irujari, Arturo y Amayrani, quienes me brindaron un hogar amoroso e inspirador para escribir gran parte de este trabajo.

## RESUMEN

La Zona Central de Chile ha sido afectada por una secuencia ininterrumpida de sequías desde el 2010, provocando el agotamiento de los ríos y la intensificación de extracción de agua subterránea, única fuente de abastecimiento. Esto ha generado una serie de problemas ya que el país no cuenta con conocimiento robusto sobre los sistemas hidrogeológicos, el marco legislativo e institucional sustentan la concepción del agua como una mercancía y el acceso al agua responde a criterios económicos para beneficio privado, en desmedro de su uso y beneficio público. La inequitativa repartición del agua ha provocado numerosos conflictos socioambientales; el conflicto más visibilizado se desarrolla en Petorca, Región de Valparaíso.

El presente trabajo busca conocer el funcionamiento, estado y distribución de los sistemas de flujo de agua subterránea en la comuna de Petorca, y su relación con los componentes del medio natural y social. Para alcanzar tales objetivos, se aplicó entrevistas y cartografía participativa con el fin de identificar los actores involucrados en el sistema hidrosocial de Petorca, caracterizar las relaciones y dinámicas sociales en torno al agua, y conocer diferentes perspectivas sobre el conflicto por el agua. El análisis del modelo de administración y gestión de agua en Petorca permitió evidenciar cómo se ha construido un espacio de vulnerabilidad hídrica, que es abordado a través de sus componentes sociales. Entre los actores más importantes del sistema hidrosocial están las organizaciones comunitarias de Agua Potable Rural (APR) y la Oficina de Asunto Hídricos (Municipalidad de Petorca), cuyo trabajo colaborativo y coordinado ha logrado abastecer de agua a numerosas localidades rurales cuyas fuentes se han agotado. Las fuentes de afectación al agua subterránea, en términos de cantidad y calidad, percibidos por los informantes, se vinculan a los monocultivos de aguacate (palta), jales (relaves) mineros, desechos de aguas negras y residuos domiciliarios.

Posteriormente, teniendo estos antecedentes en cuenta, se realizó un muestreo de agua subterránea en pozos y manantiales, y la medición de parámetros fisicoquímicos, para conocer la calidad del agua subterránea (composición química e isotópica) e inferir su origen y evolución hidrogeoquímica. Con estos datos se elaboró un modelo hidrogeológico conceptual, aplicando la Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea (Tóth, 1963). Las evidencias recabadas sugieren la presencia de flujos de reciente infiltración, con un tiempo de residencia corto en el subsuelo, que en conjunto integran un sistema de flujos locales. Con base en el contenido isotópico de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , se distinguen 3 condiciones diferentes de recarga en función de variaciones altitudinales, climáticas y cercanía al mar. La composición del agua subterránea parece estar influenciada por los depósitos sulfurados presentes en el área de estudio, y ha sido probablemente alterada por actividades agrícolas, mineras y residuos orgánicos, confirmando la sospecha de los informantes clave.

Una vez comprendida la relación entre el agua subterránea y el sistema hidrosocial, se identificó una serie de falencias del actual modelo de gestión de agua, desde un punto de vista hidrogeológico, y finalmente se presentaron consideraciones para su mejoramiento.

## GLOSARIO

**Ambiente:** aquello que “rodea algo o a alguien como elemento de su entorno” (RAE, 2021). En México, en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) se define el ambiente como “el conjunto de elementos naturales y artificiales o inducidos por el hombre que hacen posible la existencia y desarrollo de los seres humanos y demás organismos vivos que interactúan en un espacio y tiempo determinados” (Artículo 3º de la LGEEPA<sup>1</sup>). Mientras que en Chile, el concepto utilizado es “Medio Ambiente”, el cual se define en la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente como “el sistema global constituido por elementos naturales y artificiales de naturaleza física, química o biológica, socioculturales y sus interacciones, en permanente modificación por la acción humana o natural y que rige y condiciona la existencia y desarrollo de la vida en sus múltiples manifestaciones” (Artículo 2º de la Ley 19300<sup>2</sup>). Cabe aclarar que los conceptos “medio” y “ambiente” tienen igual significado, por lo que la expresión “medio ambiente” resulta redundante<sup>3</sup>. Por otro lado, en el marco teórico de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea, el **ambiente hidrogeológico** corresponde al “modelo conceptual de los parámetros morfológicos, geológicos y climáticos que determinan los atributos principales de un régimen del agua subterránea en un área determinada” (Tóth, 1970; en Tóth, 2000: 16). Los componentes del ambiente hidrogeológico son el agua, los materiales geológicos (rocas y depósitos sedimentarios), el suelo y la vegetación (Tóth, 2000).

**Administración del agua:** Según la RAE (2021), administrar se entiende como “gobernar, ejercer la autoridad o el mando sobre un territorio y sobre las personas que lo habitan”, también como “ordenar, disponer, organizar” y “suministrar, proporcionar o distribuir algo”. En el ámbito del agua, se refiere a la planificación u organización de acciones y la disposición de recursos financieros ejercidos por la autoridad del agua, para el abastecimiento de agua a la población.

**Agua Subterránea:** es el agua que penetra el suelo y se desplaza por debajo del nivel del suelo, circulando a través de la zona no-saturada (más superficial) y la zona saturada (más profunda), una vez que logra alcanzar el nivel freático, a partir del cual continúa su camino en forma de sistemas de flujo de diferente jerarquía (Schmidt *et al.*, 2022), en función de la profundidad alcanzada y el tiempo de recorrido subterráneo (Tóth, 2000).

**Ciclo hidrológico:** también llamado ciclo del agua, se entiende como la “sucesión de fases por las que pasa el agua en su movimiento de la atmósfera a la Tierra y en su retorno a la misma (WMO-UNESCO, 2012). Se trata de un ciclo biogeoquímico, donde el agua se traslada de un lugar a otro y/o cambia de estado físico, a través de las fases del ciclo hidrológico, que son:

---

<sup>1</sup> LGEEPA, última reforma publicada DOF 11-04-2022, consultado el 10/08/2022:

<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>

<sup>2</sup> Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), consultado el 10/08/2022:

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

<sup>3</sup> Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, "Definición", consultado el 10/08/2022 :

[http://archivos.diputados.gob.mx/Centros\\_Estudio/Cesop/Eje\\_tematico/d\\_mambiente.htm](http://archivos.diputados.gob.mx/Centros_Estudio/Cesop/Eje_tematico/d_mambiente.htm)

evaporación, condensación, precipitación, escorrentía, infiltración y circulación subterránea. “En este ciclo el ser humano no interviene, ni tampoco está presente” (Schmidt *et al.*, 2022).

**Ciclo hidrosocial:** proceso de interacción entre agua y sociedad, en el cual el agua es comprendida como un flujo físico (circulación de H<sub>2</sub>O) y, a la vez, como un objeto mediado social y discursivamente (Bakker, 2002). En el ciclo hidrosocial el ser humano interactúa con el ciclo hidrológico, modificando la calidad, distribución y trayectoria natural del agua.

**Crisis hídrica:** en ocasiones, se utiliza este concepto para indicar una disminución de la calidad y cantidad “disponible” de agua dulce, al grado de generar efectos nocivos para la sociedad (ejemplo: Baeza, 2018). Sin embargo, dicha disponibilidad está relacionada con el caudal susceptible de ser concesionado o cedido mediante derechos de aprovechamiento, en función de cálculos errados (véase definición de “Disponibilidad hídrica”). Por ello, en este trabajo se considera que una crisis hídrica es una condición donde el acceso al agua de un grupo humano y de los ecosistemas dependientes, se ve gravemente afectado o limitado por desconocimiento del funcionamiento del ciclo hidrológico (especialmente en su fase subterránea), y por deficiencias en la administración del agua y sus sistemas de abastecimiento, más que por una disminución o ausencia del líquido, lo que impide satisfacer los requerimientos de agua de la población, en cantidad y calidad suficiente, y la subsistencia de los ecosistemas.

**Demanda hídrica:** (término que inadecuadamente se refiere a “demanda de agua”) “cantidades de agua previstas para su distribución a los usuarios en períodos de tiempo determinados para usos específicos y a un precio dado” (WMO-UNESCO, 2012). Se sugiere no confundir este concepto con *requerimientos de agua*, que en primer lugar expresamente se refiere al líquido (véase definición de “Hídrico/a” más adelante, que no es sinónimo de agua), y también se desmarca de la visión mercantil del agua que caracteriza a la definición citada. Cabe mencionar que en México estas cantidades de agua incluyen las pérdidas involucradas en los trayectos de distribución a los usuarios, tal como lo recalcan Carrillo-Rivera *et al.* (2016) respecto a la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, con lo cual se han institucionalizado las deficiencias de los sistemas de abastecimiento e infraestructura hídrica.

**Disponibilidad hídrica:** (término que inadecuadamente se refiere a “disponibilidad de agua”) en una cuenca, es el caudal susceptible a otorgar mediante derechos de aprovechamiento; en el caso del agua subterránea, corresponde a la cantidad de agua (expresada en m<sup>3</sup>/año) estimada en un Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC) que es posible otorgar como derechos de aprovechamiento (DGA, 2016b). Respecto a este concepto, Carrillo-Rivera *et al.* (2016) advierten que este caudal se calcula a partir de parámetros que intervienen en el ciclo hidrológico (escurrimiento superficial, infiltración, evapotranspiración) y los volúmenes de agua extraídos, que en general son estimados (no medidos), evaluados en forma anual, despreciando la distribución desigual de los patrones de precipitación durante el año, el amplio rango temporal (desde meses a miles de años) que puede tardar la infiltración a través de los diferentes materiales, el tipo de flujo subterráneo y las variaciones en la profundidad del nivel freático. Tampoco se tiene certeza de los caudales extraídos por la falta de regulación. Es decir,

la disponibilidad de agua se determina a partir de datos inciertos y suposiciones alejadas de la realidad. Por otro lado, la disponibilidad no considera la calidad del agua que se pretende otorgar a los usuarios.

**Escasez de agua:** (también mal llamada “escasez hídrica”) *“Condición en la cual la demanda de este recurso, en todos los sectores, incluyendo el del medio ambiente, no puede ser satisfecha debido al impacto del uso del agua en el suministro o en la calidad del recurso”* (UNESCO, 2021). Notar que esta definición entiende al agua como un recurso (véase definición de “Recurso hídrico” más adelante) y utiliza el término medio ambiente en forma redundante (véase definición de “Ambiente” más arriba). Cabe aclarar que la escasez de agua suele vincularse equivocadamente con la existencia limitada del agua, cuando realmente la limitación se debe a deficiencias en la gestión y abasto del agua (Carrillo-Rivera *et al.*, 2016; Schmidt *et al.*, 2022) (infraestructura, sistemas de suministro, tecnologías, desconocimiento del ciclo hidrológico) o a un desigual acceso al agua. (Ortega, 2009).

**Estrés hídrico:** relación porcentual entre la cantidad de agua dulce extraída y el agua dulce disponible, que indica *“la presión que ejercen las actividades humanas sobre los recursos naturales de agua dulce”* (FAO, 2018: 44). Su fórmula se establece de la siguiente manera: extracción total de agua dulce (km<sup>3</sup>/año) dividido por la diferencia entre el total de recursos renovables de agua dulce (km<sup>3</sup>/año) y las necesidades de caudal ambiental (km<sup>3</sup>/año), multiplicado por 100 % (FAO, 2018). Cabe destacar que la consideración de caudal ambiental es una novedad reciente propuesta por la FAO (2018), que amplía la definición de estrés hídrico original de la FAO: *“volumen total de aguas subterráneas y superficiales extraídas para uso humano (en el sector agrícola, doméstico o municipal e industrial), expresado en porcentaje del total de recursos hídricos renovables reales”* (FAO, 2018: 9) (meta 7.5 de los Objetivos de Desarrollo del Milenio; FAO, 1999; en FAO, 2018). Se sugiere el uso de “Estrés sobre el agua” para evitar las ambigüedades del término “hídrico” (véase su definición más adelante). Cabe cuestionar las metodologías utilizadas para establecer las cantidades de agua dulce total y la extraída, tal como plantea Carrillo-Rivera *et al.* (2016), así como también para estimar el denominado caudal ambiental. El caudal ambiental (*environmental flow*), considerado en la normativa chilena, es definido como *“la cantidad, el momento y la calidad de los flujos de agua necesarios para sostener los ecosistemas de agua dulce y estuarios y los medios de subsistencia y el bienestar humano que dependen de estos ecosistemas”* (The Brisbane Declaration, 2007).

**Gestión del agua:** La gestión se relaciona con la ejecución o puesta en marcha de las acciones planificadas en la etapa de administración del agua. Una adecuada gestión del agua debe incluir la participación y representación de todos los usuarios involucrados, así como también el conocimiento acabado del funcionamiento del agua

**Hídrico/a:** Perteneciente o relativo al agua como elemento de la naturaleza (RAE, 2021). Comentario: Notar que este adjetivo no es sinónimo de agua (objeto de interés); por tanto, cuando se habla, por ejemplo, de “gestión hídrica” o “escasez hídrica” realmente no se está hablando del agua sino que de algo perteneciente o relativo al agua. En este trabajo, se utiliza



el adjetivo hídrico/a cuando el interés no está puesto en el agua sino que en las construcciones sociales relativas al agua.

**Potabilización:** “acción de convertir el agua en potable y, por tanto, hacerla susceptible de abastecer a una población” (DPEJ, 2020<sup>4</sup>).

**Recursos hídricos:** “recursos disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un período de tiempo apropiados para satisfacer una demanda identificable” (WMO-UNESCO, 2012). Llama la atención que en la definición citada no se hace referencia al agua. Cabe aclarar que la “disponibilidad” está controlada por los caudales de agua susceptibles de ser concesionados o apropiados, por lo que el término “recurso hídrico” parece referirse a la fracción del total de agua existente, destinada a convertirse en mercancía, que resulta de la aplicación de metodologías y cálculos errados (véase definición de “Disponibilidad hídrica”). Por otro lado, se especifica que el destino de los “recursos hídricos” es satisfacer una “demanda” identificable (véase definición de “Demanda hídrica”), es decir, sólo contempla fines productivos y de bebida humana, excluyendo el agua para el sostenimiento de los ecosistemas. Notar que el término “recurso”, definido como el “conjunto de elementos disponibles para resolver una necesidad o llevar a cabo una empresa” (RAE, 2021), presenta diversas acepciones según sea el contexto de su uso, y se refiere en Economía a un bien sujeto a las leyes de mercado (oferta-demanda). En el ámbito del agua, suele utilizarse equivocadamente como sinónimo de agua o para referir a cualquier tipo de agua (superficial, subterránea, marina), o a una fuente de agua con diferentes fines de uso (Schmidt *et al.*, 2022). Debido a estas ambigüedades y a su connotación mercantil, en el presente trabajo se evita el uso del concepto *recurso hídrico* y se recomienda excluirlo de los discursos que busquen alcanzar justicia socioambiental.

**Seguridad hídrica:** (término que inadecuadamente se refiere a “seguridad del agua”, según la definición original de *water security*) “capacidad de una población para salvaguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para mantener los medios de vida, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, para garantizar la protección contra la contaminación del agua y los desastres relacionados con el agua y para preservar ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política” (United Nations, 2013).

**Sistema hidrosocial:** sistema en el que interactúan agua y sociedad en un espacio, tiempo y escala determinada, donde el agua es intervenida y/o transformada, adquiriendo cualidades diferentes a las originales (naturales), según el tipo y grado de mediación que requieran los diversos usos del agua.

**Vulnerabilidad:** concepto propuesto por el hidrogeólogo francés J. Margat (1968) para referirse a diferentes grados de propensión del agua subterránea a ser afectada por agentes contaminantes. Actualmente, este término tiene diferentes connotaciones dependiendo del campo y enfoque de estudio; sin embargo, se define siempre en relación con alguna forma de

---

<sup>4</sup> DPEJ: Diccionario Panhispánico del Español. Consultado el 01/04/2022 en: <https://dpej.rae.es/lema/potabilizaci%C3%B3n#:~:text=Adm.,de%20abastecer%20a%20una%20poblaci%C3%B3n.>

amenaza (natural o antrópica) o con una determinada pérdida (de recursos económicos, de derechos, de salud, de la vida, etc.; Alwang *et al.*, 2001), y se refiere a las condiciones previas a un determinado evento de afectación (susceptibilidad) y a la forma de enfrentar tal evento (capacidad de ajuste o adaptación) (Ruiz, 2012). La vulnerabilidad puede entenderse como el grado en el cual un sistema, persona o grupo humano es susceptible o está expuesto a los efectos adversos de un cierto fenómeno o amenaza o perturbación, y su capacidad de anticipar, lidiar, resistir y recuperarse del impacto de un evento adverso (Birkmann, 2013).

**Vulnerabilidad hídrica:** en este trabajo, se entiende como la condición que determina la susceptibilidad de un grupo humano a ser privados o limitados del goce y uso del agua, y su grado de capacidad de prevenir, afrontar, manejar y recuperarse del impacto derivado de la afectación de sus fuentes de agua. Dicha afectación puede manifestarse como la alteración de la calidad y/o cantidad de agua que impide satisfacer los requerimientos de agua de la población, así como asegurar la permanencia de las fuentes de agua para las generaciones venideras y el sostenimiento de los ecosistemas. Las causas que provocan tales afectaciones al agua o la privación del acceso al agua, pueden originarse por factores naturales, antrópicos o por una combinación de ambos. Dentro de los factores naturales se cuentan, por ejemplo, aspectos geológicos (componentes minerales de las rocas por las que circula el agua subterránea potencialmente tóxicos para la salud humana) y meteorológicos (sequías, variabilidad climática). Por su parte, los factores antrópicos guardan relación, por ejemplo, con eventos de contaminación del agua por mal manejo de residuos o accidentes; deficiencias en los sistemas de abastecimiento e infraestructura hídrica; deficiente administración y/o inequitativa repartición del agua; deficiente legislación de protección ambiental y social (vulneración del derecho humano al agua y saneamiento); uso desmedido de las fuentes de agua; corrupción; desconocimiento del ciclo hidrológico y falta de capacitación sobre el sistema agua, entre otros.

**Vulnerabilidad socioambiental:** *“proceso que conlleva a situaciones críticas e irreversibles en torno a la calidad y cantidad de los recursos hídricos que ponen en riesgo el desarrollo humano y el funcionamiento de los ecosistemas”* (Ávila, 2008: 48). Notar que la vulnerabilidad es una condición, no un proceso. Dado que se habla de recursos hídricos y no de agua, se hace referencia al agua controlada por la oferta/demanda, entendidos como los recursos disponibles o potencialmente disponibles, es decir, susceptibles de ser otorgados a propiedad o concesión (véase definición de “Disponibilidad hídrica”), para satisfacer una “demanda” identificable (véase definición de “Demanda hídrica”). Ello implica que sólo consideran los fines productivos y de bebida humana del agua, excluyendo (contradictoriamente) los requerimientos de los ecosistemas.

## **ABREVIACIONES**

En el texto se suelen utilizar las siguientes abreviaciones:

APR: Agua Potable Rural

CNR: Comisión Nacional de Riego

CASUB: Comunidades de Aguas Subterráneas

DGA: Dirección General de Agua

DOH: Dirección de Obras Hidráulicas

ESVAL: Empresa Sanitaria de Valparaíso, Aconcagua y Litoral

INDH: Instituto Nacional de Derechos Humanos

MODATIMA: Movimiento de Defensa por el acceso al Agua, la Tierra y el Medio Ambiente

SFAS: Sistemas de flujo de agua subterránea

SHAC: Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común

SIG: Sistema de Información Geográfica

TSFAS: Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea

## 1. INTRODUCCIÓN

El ciclo del agua no sólo debe ser entendido como un proceso físico aislado de los agentes antrópicos, ya que la intervención humana influye notablemente en las condiciones de circulación del agua (ya sea en su fase superficial o subterránea), lo cual, a su vez, determina las condiciones de vida de las personas. Desde la perspectiva de la Ecología Política, el concepto de **Ciclo Hidrosocial** recoge esta visión ampliada del agua, donde el agua es comprendida como un flujo físico (circulación de H<sub>2</sub>O) y, a la vez, como un objeto mediado social y discursivamente (Bakker, 2002). Linton y Budds (2014: 175) definen el ciclo hidrosocial como *“un proceso socio-natural mediante el cual el agua y la sociedad se construyen y reconstruyen mutuamente en el espacio y en el tiempo”*.

En virtud de la relación inseparable entre agua y sociedad, diferentes tipos de relaciones sociales pueden modificar el ciclo del agua, alterando su composición, cantidad y distribución, y viceversa, dando lugar a nuevas formas de organización social, construyendo un proceso cíclico (Linton y Budds, 2014). Factores como la legislación hídrica, el ejercicio de instituciones, las obras hidráulicas, intereses político-económicos y las prácticas culturales, son aspectos sociales que intervienen en el recorrido natural del agua, y finalmente determinan quién puede acceder al agua, en qué cantidad y de qué calidad. Esta perspectiva permite reconocer las relaciones de poder que otorga el acceso y posesión sobre una fuente de agua (Budds, 2012). Ejemplo de ello es el concepto de **“escasez hídrica”**, generalmente mal entendida como un proceso hidroclimático y que sólo se define en términos de su disponibilidad física, cuando en realidad se trata de una construcción social, que resulta de la forma en que se conoce, administra y utiliza el agua en un determinado territorio.

En la cuenca del Río Petorca, en la Zona Central de Chile, se ha desarrollado un conflicto por el desigual acceso al agua y la privación del derecho humano al agua y saneamiento. Mientras las autoridades culpan al “cambio climático” por el agotamiento de los ríos, el agua subterránea se encuentra acaparada por una elite vinculada a la política y al agronegocio, bajo una lógica de privatización y mercantilización del agua, que había pasado desapercibida sin mayores cuestionamientos. Sin embargo, la escasez sostenida de precipitaciones durante las últimas dos décadas, ha desenmascarado los impactos sociales y ambientales del modelo neoliberal y extractivista, impuesto por las armas durante la dictadura cívico-militar chilena (1973-1990).

Este nuevo paisaje social y ambiental en Petorca, cuya población es predominantemente rural, está marcado por la desaparición de ríos y manantiales, desertificación de los suelos, reducción del bosque nativo, pérdida de la biodiversidad, cese de la agricultura y ganadería familiar, pérdida de la soberanía hídrica y alimentaria, entre otros. La única fuente de agua que queda es la subterránea y está principalmente destinada a fines comerciales (agroindustria aguacatera de exportación). En respuesta, las comunidades locales se han organizado e iniciado un movimiento de recuperación del acceso al agua, emplazando al mundo académico a aportar con estudios y datos concretos sobre las causas e impactos de esta problemática socioambiental.

El presente trabajo de investigación surge desde la necesidad de contribuir a este conflicto mediante el entendimiento de la interacción entre el agua subterránea, el medio natural y las dinámicas sociales en torno a este vital elemento. Para ello, se recurrió a la **Geografía Ambiental** (Castree *et al.*, 2009), el campo de la geografía que se ubica entre los límites de la geografía física y humana, con un énfasis especial en las cuestiones ambientales; pretende ofrecer un enfoque integral de las problemáticas tanto sociales como naturales, con un referente espacial. Tiene, por tanto, un carácter multidisciplinario que busca entender la interacción entre los sistemas socioculturales y biofísicos. Su objeto de estudio es el ambiente, diferenciándose de otras ciencias ambientales por su perspectiva territorial. El concepto de **ambiente** se refiere a “aquello que se encuentra alrededor”, en forma equivalente al significado del concepto “medio”. Por otro lado, el ambiente puede entenderse como la naturaleza transformada por la actividad humana, cuya “*concepción o transformación responde a negociaciones entre actores sociales en distintos niveles de dominio o poder*” (Bocco y Urquijo, 2013: 83); su carácter social lo distingue de otros conceptos como el ecosistema, bioma o geosistema, basados en análisis esencialmente de tipo biofísico.

Además, esta investigación se ha nutrido de la perspectiva de la **Geografía Radical o Geografía Crítica** (ej. Peet, 1977), enfoque geográfico gestado en la década del 70` para cuestionar los aportes de la Geografía Cuantitativa o Neopositivista<sup>5</sup> y su escaso compromiso con lo social. La Geografía Radical buscó superar el espacio euclidiano (cartesiano) y abstracto, para concebir el espacio geográfico como un producto social, producido y reproducido por los modos de producción, es decir, por las relaciones entre la sociedad y la naturaleza. El caso de injusticia hídrica en Petorca puede ser entendido como una construcción de desigualdad social por medio de los procesos de **acumulación por desposesión**, concepto acuñado por David Harvey (2003) –uno de los autores más influyentes de la Geografía Crítica– para denunciar los métodos de privatización y mercantilización de los elementos naturales de los que se sirve el neoliberalismo para acumular capital, a costa del despojo de los bienes comunitarios (agua, tierra, bosques, minerales, etc.) y el desplazamiento forzado de poblaciones campesinas. La lógica capitalista ha impuesto una forma específica de relación entre la sociedad y la naturaleza, basado en la depredación de los territorios y el modo de concebir la naturaleza (como un recurso económico), promoviendo un desarrollo geográfico desigual a escala local y global.

En este trabajo, la dimensión social del agua fue abordada a través de metodologías cualitativas aplicadas en campo, para conocer el modelo de gestión del agua, las dinámicas sociales en torno al agua y la percepción de los diferentes actores respecto al conflicto. Por su parte, la dimensión física del agua fue analizada con base en la **Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea**, propuesta por J. Tóth (1963), correspondiente a una línea de investigación de la Hidrogeología Moderna que ofrece una perspectiva sistémica, integral y dinámica sobre el funcionamiento, calidad y distribución del agua subterránea. Para ello, se analizaron muestras de agua subterránea en pozos y manantiales en la parte media y alta de la cuenca de Petorca,

---

<sup>5</sup> Geografía Cuantitativa o Neopositivista: gestada a mediados del siglo XX, se basa en el positivismo lógico, la aplicación de teorías y métodos cuantitativos. Concibe el espacio geográfico como un espacio cartesiano, objetivo, independiente de los sujetos que interactúan en él.

caracterizando su comportamiento fisicoquímico y su composición química e isotópica, para obtener pistas sobre su origen y evolución en su recorrido subterráneo. Esta visión permite entender la interacción del agua subterránea con el resto de los componentes ambientales, lo que se manifiesta en diferentes estructuras geomorfológicas, tipos de suelo y vegetación.

Todos estos elementos -ambientales, químicos, fisicoquímicos e isotópicos- constituyen indicadores para determinar la jerarquía de los sistemas de flujo de agua subterránea: local, intermedio y regional. Cada sistema presenta diferentes trayectorias, condiciones y tiempos de recorrido; por consiguiente, cada sistema presenta diferente calidad y relación con los fenómenos superficiales. Por tal motivo, la elaboración de políticas y programas de manejo del agua debieran ajustarse a la configuración de los sistemas de flujo en cada unidad de estudio, en función de las características físicas y sociales propias de cada territorio. De esta manera, es posible diseñar regímenes de extracción de agua apropiados para satisfacer los requerimientos ecosistémicos y sociales, en forma equitativa y sustentable.

El presente documento se ha estructurado en 7 capítulos. En el primer capítulo se brinda una introducción al tema de estudio, indicando la ubicación del área de estudio, antecedentes, planteamiento del problema y justificación. En el capítulo 2 se muestra el diseño de investigación, desglosado en los objetivos y las preguntas de investigación, las hipótesis planteadas y las metodologías aplicadas. El capítulo 3 versa sobre la caracterización hidrosocial de Petorca, donde se exhiben y analizan los actores del sistema hidrosocial y percepciones del conflicto socioambiental. Se describen las formas de uso, administración y gestión del agua subterránea en Petorca, e identifican factores de afectación al agua subterránea percibidos por la comunidad. Se analizan los elementos sociales que han construido la vulnerabilidad hídrica de los habitantes de Petorca, y se concluye preliminarmente que las causas del desabastecimiento de agua en Petorca están vinculadas al modelo político-económico del país, más que a factores “naturales” (disminución sostenida de las precipitaciones). En el capítulo 4 se desarrolla el modelo hidrogeológico conceptual, que se basa en la TSFAS, detallando las metodologías utilizadas para obtener información del agua subterránea y pistas de su interacción con los componentes ambientales. Se incluye una descripción de las características hidrográficas, climáticas, de vegetación y suelo, del referente geológico y geomorfológico de la comuna de Petorca, y una serie de antecedentes hidrogeológicos. Además, se presenta la identificación de zonas de recarga y descarga, la determinación de los SFAS y su evolución. El capítulo 5 trata sobre la calidad del agua subterránea para riego y consumo humano, donde se indican puntos de muestreo con deficiente calidad, las posibles fuentes de las anomalías detectadas y los riesgos para la salud de la población. El capítulo 6 corresponde a la discusión de los antecedentes presentados y los resultados obtenidos en este estudio. Primero se da respuesta a las preguntas de investigación, y luego se realiza un análisis crítico del modelo de administración y gestión del agua en Petorca, proponiendo una serie de consideraciones clave para su mejoramiento, desde un punto de vista hidrogeológico. En el último capítulo se presentan las conclusiones, señalando sintéticamente las características del escenario hidrosocial de Petorca; luego, el funcionamiento, estado y distribución de los SFAS en la comuna de Petorca, y su relación con los componentes del medio natural; y por último, los

cuestionamientos al actual modelo de gestión del agua en Petorca, con miras a garantizar el suministro de agua en suficiente calidad y cantidad para el desarrollo de su población y preservación de los ecosistemas.

## 1.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la parte media y alta de la cuenca del Río Petorca, inscrita en la comuna de Petorca (Fig. 1), Provincia de Petorca, ubicada en la porción norte de la Región de Valparaíso, en la Zona Central de Chile<sup>6</sup>. Limita al Norte con la IV Región de Coquimbo (comunas de Los Vilos y Salamanca), al Este con la comuna de La Ligua y al Sur con la comuna de Cabildo (estas dos últimas pertenecientes a la Región de Valparaíso).

Las latitudes y longitudes que limitan el área de estudio son 32°01'S - 32°23'S y 70°26'O - 71°11'O, respectivamente. La comuna de Petorca pertenece al dominio de la Cordillera de la Costa en su parte occidental, y al dominio de la Cordillera de Los Andes en su porción oriental. Petorca se encuentra a unos 200 km al Norte de Santiago, la capital de Chile, cuyo principal acceso es la Carretera Panamericana (Ruta 5), desde donde se toma el desvío hacia el Este a la altura de la ciudad de La Ligua

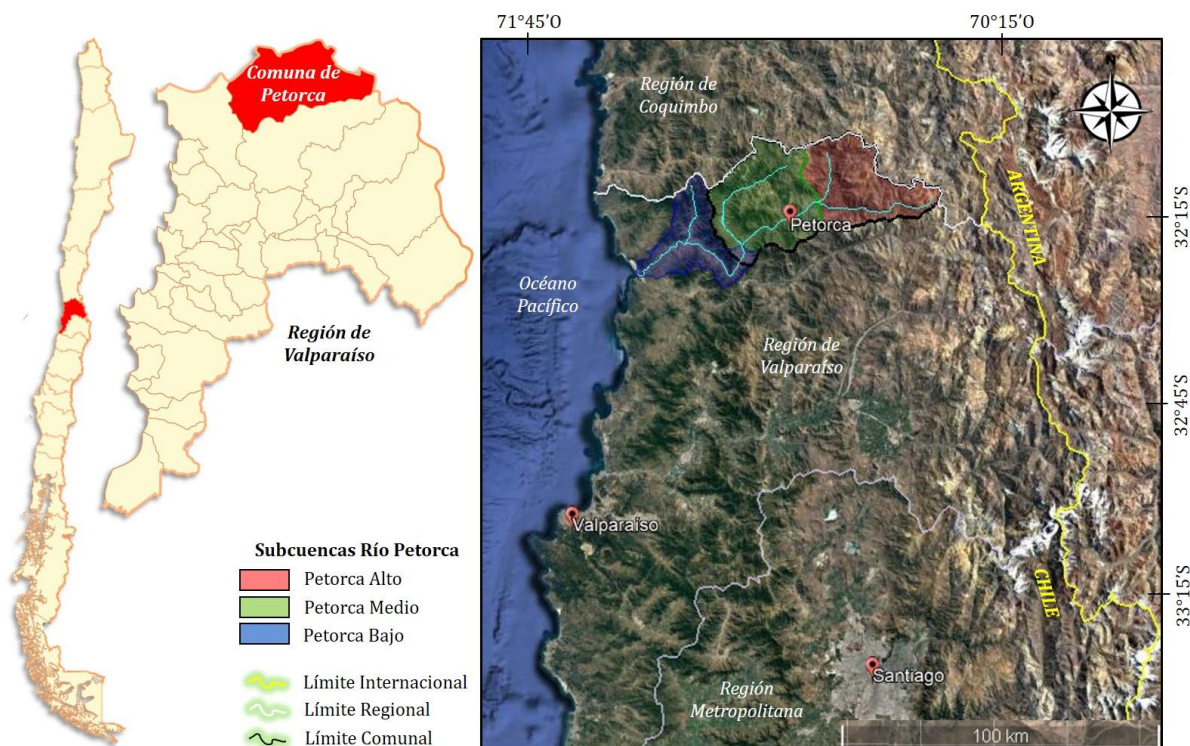


Fig. 1. Ubicación de la Comuna de Petorca, Región de Valparaíso, Chile, correspondiente a la parte media y alta de la Cuenca del Río Petorca (coloreada en el mapa de la derecha según subcuencas).

<sup>6</sup> La división político-administrativa en Chile se compone de 3 unidades territoriales: comuna, provincia y región. La división geográfica del país comprende las zonas: Norte, Central, Sur y Austral.

## 1.2. ANTECEDENTES

El agua dulce no congelada del planeta se encuentra mayoritariamente (~97%) bajo la superficie terrestre (IGRAC, 2015) en su parte continental, siendo la principal fuente de abastecimiento de agua que sustenta las sociedades en el mundo. El agua subterránea, además, cumple un importante rol como sostenedor de ecosistemas, como agente geológico y como modelador del paisaje, teniendo influencia directa sobre una gran variedad de fenómenos que suceden en la superficie terrestre, a diferentes escalas espaciales y temporales (Tóth, 2000).

Por ello, es de suma relevancia conocer cómo funciona el agua una vez que se infiltra en el suelo, qué camino recorre, dónde descarga, cuánto tiempo involucra su movimiento, a qué profundidad, en qué condiciones fisicoquímicas, qué elementos químicos transporta, cuál es su firma isotópica, y cómo interactúa con el resto del ambiente. Esta información es indispensable para realizar adecuadas políticas de gestión y protección del agua, manejo de eventos de contaminación al agua subterránea, y encontrar la forma más eficiente y sostenible de su aprovechamiento. Sin embargo, en muchos países se desconoce el funcionamiento del agua subterránea o sólo se conoce parcialmente, lo cual ha originado, junto con la visión mercantil respecto a su uso y repartición, una serie de efectos negativos ambientales, económicos y sociales, en múltiples lugares del mundo. Millones de personas han sido privadas del derecho humano al agua o han visto afectadas sus fuentes de agua, a causa de deficientes modelos de gestión del agua. El escenario probablemente empeorará, en vista de que los requerimientos de agua seguirán creciendo conforme aumente la población (a una tasa estimada de ~83 millones personas/año; United Nations, 2015) y se intensifiquen los periodos de sequía, según se prevé, asociados al denominado *cambio climático* (Kammeyer, 2017).

La Zona Central de Chile ha sido afectada por una secuencia ininterrumpida de sequías anuales desde el año 2010, correspondiente al evento de sequía más prolongado registrado en la región y con unos pocos análogos en el último milenio, por lo que se le ha denominado la **Megasequía de Chile** (Garreaud *et al.*, 2019). Muchos ríos y manantiales se han secado, lo que ha intensificado la extracción del agua subterránea. Esto ha requerido una adaptación de la infraestructura hídrica y del personal a cargo de la gestión y extracción, proceso en el cual las comunidades rurales han quedado francamente postergadas. En Chile, el agua subterránea para consumo humano alcanza un 40% del volumen total utilizado, mientras que en zonas rurales significa un 76% (Min. del Interior, 2015). A pesar de ello, el país no cuenta con un marco regulatorio apropiado ni con información básica sobre los sistemas de agua subterránea (Arumí y Oyarzún, 2006; Maureira y Kuijk, 2017), que asegure su adecuada gestión y conservación, y un aprovechamiento equitativo y sustentable.

Contrariamente, el agua en Chile es concebida como un recurso económico (artículo 5 del Código de Aguas; Min. de Justicia, 1981) desde la dictadura cívico-militar (ver sección 3.4.2A), lo que ha significado la concentración de derechos de agua en un grupo selecto de entes privados para fines económicos, en desmedro de su uso público para la subsistencia de comunidades campesinas y el mantenimiento de ecosistemas (Mundaca, 2014). Actualmente,



existen siete regiones del país cuyas cuencas presentan un *sobreotorgamiento* de derechos de agua, es decir, se han otorgado más volúmenes de agua mediante títulos de propiedad que el agua supuestamente *disponible* para su aprovechamiento (Gobierno de Chile, 2012), sin ningún tipo de control, fiscalización ni priorización de su uso. Ello da cuenta de las deficiencias en la gestión y administración del agua a escala nacional.

Bajo este escenario político y climático, miles de comunidades han quedado sin agua para su consumo y actividades económicas de supervivencia. Petorca es el emblema nacional del conflicto por el acceso al agua en Chile, desde la llegada de empresas agrícolas, principalmente productoras de aguacate (palta, su nombre local) para exportación. Estas empresas poseen cuantiosos derechos de extracción de agua e infraestructura (pozos profundos, red de canales y tuberías) para el riego de sus cultivos –que han reemplazado cientos de hectáreas de vegetación nativa–, mientras la población local ha visto su suministro de agua severamente afectado, siendo forzados a abandonar sus cultivos y ganadería familiar, y adquirir agua potable mediante camiones aljibes de disposición municipal y/o la compra de agua embotellada (Mundaca, 2014). El mal manejo del agua y su uso indiscriminado ha provocado un desastre ecológico y social, que a juicio de la autora, requiere de profundos cambios de los paradigmas ideológico-políticos y científico-técnicos para su reparación.

### **1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El conflicto socioambiental existente en la comuna de Petorca ha revelado la ideología mercantil detrás del modelo de gestión del agua, y graves deficiencias en su reparto, infraestructura hídrica, abastecimiento, capacidad técnica, métodos de medición y mecanismos de evaluación y control del sistema hídrico del país. Desde el punto de vista de la Hidrogeología Moderna<sup>7</sup>, el marco teórico y metodológico aplicado para evaluar el agua subterránea (ej: Balance Hidrológico, definición de acuíferos) es muy limitado y se considera obsoleto, ya que se basa en supuestos errados y datos inciertos. Esto impide saber con certeza cómo se comporta el agua subterránea y en qué condiciones está, cuál es su origen, por dónde circula y dónde descarga, cuál es su calidad y qué factores la controlan, y cómo interactúa el agua con el resto de los componentes del ambiente.

La Dirección General de Aguas (DGA), organismo estatal encargado de la administración del agua en Chile, no cuenta con la información hidrogeológica suficiente, ni las comunidades con la capacidad técnica, como para disponer de datos y evidencias contundentes sobre la dinámica del agua subterránea y los impactos sobre el sistema hidrogeológico del actual modelo de gestión del agua. Estas falencias evidentemente obstaculizan las vías de solución al conflicto socioambiental, e impide elaborar políticas y planes territoriales que aseguren la real disponibilidad de agua en el largo plazo. Por otro lado, el desconocimiento o falso conocimiento

---

<sup>7</sup> Algunos exponentes: Tóth (1963); Freeze y Cherry (1979); Bredehoeft *et al.* (1982); Carrillo-Rivera *et al.* (2013).

sobre el agua subterránea contribuyen a la construcción de la vulnerabilidad hídrica de las comunidades, reproduciendo las lógicas de desigualdad social y depredación de los territorios.

Por tal motivo, las organizaciones locales vinculadas al uso y administración del agua en la cuenca de Petorca, han manifestado la necesidad de conocer el funcionamiento del agua subterránea con una perspectiva holística, con el fin de participar de manera informada en las instancias de negociación con las autoridades, propiciar condiciones óptimas de extracción de agua subterránea, tanto en cantidad y calidad, y conocer vías de protección de sus fuentes de agua.

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

El presente estudio surge de la problemática socioambiental en torno a la denominada “*escasez de agua*” en la comuna de Petorca, que se presenta engañosamente como justificación a la repartición inequitativa del agua. Esta investigación se justifica en la ausencia de información sobre el sistema hidrogeológico, específicamente desde la visión teórica y metodológica de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea (Tóth, 1963), que ofrece un enfoque sistémico e integral sobre el funcionamiento del agua subterránea, considerando la interrelación entre los diferentes elementos del ambiente con los que interactúa el agua. Por ello, constituye una valiosa herramienta para una adecuada evaluación del agua subterránea y para elaborar modelos factibles de su aprovechamiento óptimo y protección.

Se espera que este trabajo brinde una aproximación al agua subterránea alternativa a las metodologías tradicionales, con una perspectiva ampliada, y que los resultados de este estudio proporcionen ciertas bases científicas y técnicas que ayuden a visualizar posibles soluciones a la problemática del agua, y sean considerados en futuros planes de gestión del agua y de ordenamiento territorial.

Dada la gran presión que se ejerce sobre los sistemas hidrológicos por los crecientes requerimientos de agua, la variabilidad de los patrones climáticos y la tendencia global de ciertos sectores políticos interesados en privatizar el agua, resulta de suma importancia incrementar el entendimiento hidrológico para poder mejorar las condiciones de acceso y disfrute del agua, generar capacidades de adaptación y asegurar el sustento de las fuentes de agua en el presente y para las futuras generaciones.

## 2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación corresponde a un estudio de caso crítico<sup>8</sup>, ya que investiga un fenómeno único para entender cómo interactúan los diversos elementos del sistema hidrogeológico de la comuna de Petorca, su estado y fuentes de afectación, bajo condiciones de alto estrés hídrico y en un contexto de gran efervescencia social. Se trata de una investigación mixta, ya que abarca métodos cualitativos (entrevistas, cartografía participativa) y cuantitativos (medición de parámetros fisicoquímicos y análisis químico e isotópico del agua subterránea).

El estudio es de tipo secuencial exploratorio, ya que el muestreo de agua subterránea fue diseñado con base en la información aportada por los habitantes de la comuna, como será detallado a lo largo del capítulo. La triangulación se hará a nivel conceptual (interpretación del mismo fenómeno desde diferentes ópticas).

### 2.1. OBJETIVOS

**Objetivo General:** Conocer el funcionamiento, estado y distribución espacial de los sistemas de flujo de agua subterránea (SFAS) en la comuna de Petorca, y su relación con los componentes del medio natural y social, para proponer consideraciones hidrogeológicas que ayuden a mejorar el actual modelo de administración y gestión de agua subterránea.

#### **Objetivos Particulares:**

1. Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual, para entender cómo funciona y se distribuye espacialmente el agua subterránea. Esto implica identificar: i) los SFAS y su jerarquía, ii) las zonas de recarga y descarga, iii) la geometría y límites del sistema.
2. Conocer la calidad del agua subterránea, mediante análisis químico de muestras colectadas en pozos y manantiales, así como caracterizar sus isótopos estables, y determinar su variación espacial, con el fin de inferir el origen y evolución hidrogeoquímica del agua subterránea.
3. Caracterizar la relación de los SFAS con el resto de los componentes ambientales.
4. Identificar los actores involucrados y las dinámicas sociales en torno al agua, caracterizar su relación con el agua y obtener diferentes perspectivas sobre la problemática del agua.
5. Identificar los procesos y fuentes de afectación –naturales y antrópicos– del sistema hidrogeológico, tanto en cantidad como en calidad del agua.
6. Identificar falencias del actual modelo de gestión del agua y presentar consideraciones hidrogeológicas para su mejoramiento.

---

<sup>8</sup> Caso crítico: representa un caso inusual, especialmente problemático, que permite probar los límites de una teoría o cuestionar supuestos que soportan teorías ya establecidas, y comprender la relación entre dos o más elementos bajo condiciones contingentes extremas (Bryman, 2008).

## 2.2. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cuál es la relación entre el agua subterránea y el actual modelo de uso y gestión del agua? ¿Cuál ha sido el impacto de este modelo en el ciclo hidrológico y en las dinámicas sociales de la comuna de Petorca?
- ¿Cuál es la dinámica, el estado y la distribución de los sistemas de flujo de agua subterránea en la comuna de Petorca? ¿Cómo se distingue la jerarquía de los sistemas de flujo presentes?
- ¿Cuál es la relación entre los diferentes sistemas de flujo de agua subterránea y el resto de los componentes del ambiente, en la comuna de Petorca?
- ¿Cuáles son las consideraciones hidrogeológicas que se deben tener presentes para mejorar el uso y protección del agua subterránea en la comuna de Petorca?

## 2.3. HIPÓTESIS

En la comuna de Petorca, el ciclo hidrológico se ha visto afectado por una combinación de factores naturales (como cambios en los patrones climáticos a escala local, regional y global) y antrópicos (como las políticas públicas en materia del agua, infraestructura hídrica y el modelo de gestión de agua). Respecto a la dimensión social, se cree que las prácticas humanas han impactado negativamente en el sistema hidrogeológico, alterando la calidad, cantidad y distribución del agua subterránea. Entre estas prácticas se cuentan: (1) el acaparamiento de agua en la parte alta de la cuenca para uso agrícola, (2) el reemplazo de la vegetación nativa por monocultivos de especies introducidas con alto requerimiento de agua (aguacate), (3) el uso de agroquímicos en la industria agrícola, (4) el mal manejo de desechos mineros (yacimientos de Au-Ag-Cu) y domiciliarios (rellenos sanitarios, aguas residuales).

Se piensa que estas prácticas de afectación existentes a nivel comunal, junto con el modelo neoliberal que rige la legislación y gestión del agua en Chile, han construido un marco de vulnerabilidad hídrica en los habitantes de la comuna, quienes han sido privados de su acceso al agua por más de una década: las fuentes de agua que abastecían a las comunidades de Petorca, como ríos, manantiales y norias<sup>9</sup> o pozos someros (<30 m), en su mayoría se han agotado, mientras que los flujos subterráneos más profundos (> 100 m) sí se encuentran activos, pero se requiere de una gran inversión monetaria para acceder a ellos, por lo que su extracción está controlada por el poder económico de agentes privados.

En relación con el medio natural, se espera encontrar dos sistemas de flujo de agua subterránea: (1) flujos locales, relacionados a las napas someras que abastecen a las comunidades y que se encuentran mayormente afectados por los factores mencionados, y (2) flujos intermedios,

---

<sup>9</sup> Noria: obra de captación de agua subterránea a niveles someros (<20 m de profundidad), generalmente elaborada de forma artesanal, con un amplio diámetro (1 a 3 m) y cuyas paredes pueden quedar expuestas o ser revestidas de anillos de concreto o ladrillos. Se diferencia de un pozo porque este último alcanza mayores profundidades, por lo que requiere maquinaria especializada para su perforación, y presenta un diámetro menor (<30 cm).

ubicados a mayor profundidad y que proveen agua a los entes privados, con una calidad diferente ya que presentan otras condiciones de circulación y están más “protegidos” de los fenómenos superficiales de afectación. Cada sistema tendrá sus propias manifestaciones ambientales como resultado de diferentes interacciones entre el agua y el medio, detectables por indicadores químicos y fisicoquímicos, e indicadores ambientales como tipos de suelo y vegetación, y rasgos geomorfológicos.

En definitiva, se buscará probar que los modos en que la sociedad interactúa con el agua, provocan impactos en el ciclo hidrológico que modifican sus patrones de distribución, cantidad y calidad del agua, lo que a su vez repercute de vuelta en la sociedad, afectando de manera desigual a los grupos humanos en función de sus condiciones económicas.

## 2.4. METODOLOGÍA GENERAL DEL ESTUDIO

Este trabajo se sustenta en datos recopilados mediante técnicas cualitativas y cuantitativas: (i) Las **técnicas cualitativas** (entrevistas y cartografía participativa) aportan información para efectuar la caracterización hidrosocial de la comuna de Petorca y del modelo de gestión de agua. Además, permitió la identificación de manantiales y pozos de extracción de agua subterránea, con datos como el estado de las fuentes, ubicación, accesos y dueños, para luego realizar una selección estratégica de recolección de muestras de agua, que fueron utilizadas en la elaboración del modelo hidrogeológico. Esto fue especialmente relevante para identificar puntos de muestreo cercanos a los potenciales factores de afectación al agua subterránea indicados por los habitantes informantes en esta primera fase. (ii) Las **técnicas cuantitativas** (medición de parámetros fisicoquímicos del agua subterránea y análisis de su composición química e isotópica) permitieron identificar, caracterizar, cuantificar, delimitar y jerarquizar los sistemas de flujo de agua subterránea y sus componentes, con lo cual se construyó el modelo hidrogeológico conceptual. Las técnicas cualitativas complementaron y robustecieron el modelo hidrogeológico, permitiendo realizar de forma más asertiva recomendaciones para el mejoramiento del uso y protección del agua subterránea. El detalle de las metodologías cualitativa y cuantitativa, se entrega en las secciones 3.2 y 4.2, respectivamente.

El trabajo realizado puede estructurarse en las siguientes etapas:

1. Revisión bibliográfica y generación de capas de información
  - Revisión bibliográfica: informes, estudios técnicos, mapas
  - Generación de capas de información (en ArcGis y Google Earth Pro), a partir de mapas asequibles para la caracterización topográfica, geológica, geomorfológica, hidrológica, uso del suelo, tipo de suelo y vegetación
2. Trabajo de Campo I: técnicas cualitativas
  - Cartografía participativa
  - Entrevistas a informantes clave
  - Decodificación (gabinete)

3. Trabajo de campo II: adquisición de datos para el modelo hidrogeológico conceptual
  - Definición de puntos y condiciones de muestreo de agua subterránea
  - Medición de parámetros fisicoquímicos del agua subterránea
  - Toma de muestras de agua subterránea para análisis de laboratorio (químico e isotópico)
4. Elaboración del modelo hidrogeológico conceptual
  - Elaboración y análisis de cartografía topográfica, geológica, tipos de suelo y vegetación
  - Integración de antecedentes hidrogeológicos y resultados obtenidos: datos cualitativos (campo I) + datos fisicoquímicos (campo II) + datos químicos e isotópicos (laboratorio)
  - Identificación de zonas de recarga y descarga
  - Caracterización de los sistemas de flujo de agua subterránea
  - Elaboración de secciones hidrogeológicas
5. Análisis de la calidad del agua subterránea para riego y consumo humano
6. Identificación de falencias del modelo de gestión del agua, y propuestas para su mejoramiento

### 3. CARACTERIZACIÓN HIDROSOCIAL DE LA COMUNA DE PETORCA

El ciclo hidrosocial entiende al agua como una dualidad “híbrida” que resulta de su naturaleza física (elemento conformado por 2 átomos de hidrógeno y 1 de oxígeno) y de su calidad como objeto mediado socialmente (Bakker, 2002). A medida que el agua circula a través del ciclo hidrológico, va interactuando con las dimensiones socio-culturales, políticas, económicas y tecnológicas de las sociedades humanas, revelando las relaciones que determinan el control, apropiación, manejo y distribución del agua. Esta perspectiva, que pretende complementar el concepto de Ciclo Hidrológico, permite analizar la organización espacial del agua como un elemento que interviene en las relaciones sociales que conforman el espacio geográfico<sup>10</sup>.

Estas relaciones con el agua constituyen relaciones sociales de poder, las cuales se entretajan en siete fases (Hatch-Kuri y Carrillo-Rivera, 2021): (1) Fase científica: formas epistemológicas que definen el entendimiento del agua, quién y cómo se decide qué es el funcionamiento del agua. (2) Fase técnica: infraestructuras y técnicas para modificar el ciclo hidrológico. (3) Fase del poder: determina quién y cómo controla la distribución y acceso al agua. (4) Fase normativa: formas de regulación que determinan la relación con el agua. (5) Relaciones sociales mediadas por el agua y los conflictos que supone cada forma particular. (6) Experiencia: conjunto de saberes sobre el agua. (7) Gestión: instrumentalización de políticas del manejo del agua. En cada una de estas fases se produce el proceso de hibridación del agua (naturaleza-sociedad), que se inicia en la definición científica y constantemente se regresa a ella luego de experimentar problemas y conflictos derivados del manejo del agua. La diferencia de visiones entre los diversos actores que intervienen en cada fase, y la sobreimposición de una visión sobre otras, suelen desencadenar tensiones y conflictos por el agua.

El proceso de alumbramiento del agua subterránea corresponde a un proceso de transformación e intervención socio-técnica (perforación, bombeo y conducción del agua a través de tuberías), donde se obtiene o “produce” un tipo de agua hibridada, llamada “agua producida”, que adquiere cualidades diferentes a las originales, según el tipo y grado de mediación o intervención que requieran los diversos usos del agua. Para llevar a cabo tal intervención se deben conjugar tres factores: **capital, fuerza de trabajo y tecnología** (Hatch-Kuri, 2021); los cuales determinan el grado y las formas de acceso al agua de los usuarios.

En este capítulo se analizará la dimensión social del agua en la comuna de Petorca, buscando entender el modelo de administración y gestión del agua, los actores involucrados, las dinámicas sociales en torno al agua y diferentes visiones sobre el conflicto por el acceso al agua. La idea es vincular posteriormente estas relaciones sociales con los patrones de circulación del agua a través del ambiente subterráneo. Para recopilar dicha información, se aplicaron metodologías cualitativas en una salida de campo realizada en enero de 2020, cuyos resultados se describen y discuten a lo largo del capítulo.

---

<sup>10</sup> Espacio geográfico: Es la manifestación de la intervención humana sobre los elementos naturales, es decir, la expresión de la relación e interacción entre el medio físico y el ser humano.

### 3.1. ANTECEDENTES SOCIALES Y DEMOGRÁFICOS DE LA COMUNA DE PETORCA

Desde su fundación en 1754, la comuna de Petorca se reconoce por su identidad minera y campesina, con un importante legado arqueológico del pasado precolombino que dejaron las culturas Aconcagua y Diaguita. La comuna cuenta con 10,558 habitantes aproximadamente y una densidad de 7 habitantes por km<sup>2</sup>, con un carácter predominantemente rural (más del 58%; INE, 2019). El índice de aislamiento (calculado con base en el grado de lejanía, desconexión, incomunicación de un territorio) alcanza un valor de 0.5004 (SUBDERE, 2011), el más alto a nivel de la Región de Valparaíso continental. Según la encuesta CASEN (Caracterización Socioeconómica Nacional) del 2009, existe un 16% de pobreza de tipo no indigente, además de 1% de población en estado de indigencia, porcentaje que está sobre el promedio regional y nacional. El nivel de instrucción promedio en la comuna varía entre los 8 y 12 años; menos de 200 personas han accedido a la enseñanza superior, mientras que cerca de 1,000 nunca han asistido a una sala de clases, lo que se refleja en una de las peores cifras de analfabetismo del país (8%) (BCN, 2013).

Los principales focos de desarrollo han sido históricamente la agricultura y la pequeña minería de oro-cobre. En las últimas décadas el territorio ha experimentado grandes cambios con las manifestaciones locales del cambio climático y la introducción de la industria agroexportadora, principalmente de aguacates (paltas), con el 90% de la superficie cultivada destinada a su producción. La escasez de precipitaciones, el agotamiento de los ríos, manantiales y fuentes subterráneas someras, la degradación del suelo, la pérdida de ganados y la biodiversidad en general, han afectado significativamente la calidad de vida de la comunidad petorquina, profundizando su vulnerabilidad social (sobre la cual se hablará más adelante) y niveles de pobreza. A nivel provincial, el Instituto Nacional de Derechos Humanos indicó *“la pauperización de más de 7,000 pequeños agricultores, más de 50,000 personas padecen de la carencia de agua para beber y servicios higiénicos básicos, a pesar de las innumerables denuncias realizadas”* (INDH, 2012: 142).

Los eventos de sequía meteorológica y emergencia hídrica en Petorca, que comenzaron en los años 90s, se transformaron en una condición permanente; la población rural ha debido adaptarse a una cuota crítica de hasta 50 litros de agua al día por persona, suministrados por camiones aljibe una vez por semana. En plena pandemia de Covid-19 (abril, 2020), la Seremi (Secretaría Regional Ministerial) de Salud decidió arbitrariamente bajar el suministro de agua potable de 100 a 50 l/día, lo cual imposibilitó seguir protocolos de prevención de contagio. Esto motivó al Instituto Nacional de Derechos Humanos a acudir a los tribunales de justicia, y en una sentencia histórica, el 23 de marzo de 2021 la Corte Suprema reconoció el agua como un derecho fundamental y ordenó al Estado chileno asegurar 100 litros diarios para cada habitante de Petorca (Diario Uchile, 2021).

Mientras tanto, los extensos monocultivos aguacateros mantienen intactos sus suministros de agua (subterránea). Esta inequidad en la distribución y el acceso al agua ha generado un conflicto socioambiental con grandes repercusiones políticas a nivel nacional e internacional,



cuestionando fuertemente el modelo hídrico, económico y político de Chile que legó la dictadura cívico-militar.

### 3.1.1. El Estallido Social

Este estudio se llevó a cabo en medio de un histórico contexto socio-político nacional conocido como el **Estallido Social de Chile**: una serie de masivas manifestaciones iniciadas el 18 de octubre de 2019, y que se mantuvieron persistentemente durante al menos un año, donde convergieron todas las luchas políticas-sociales-ambientales que se venían gestando desde el “retorno a la democracia” en 1990. Las principales demandas manifestadas en el estallido fueron: recuperación del derecho a la salud, vivienda, trabajo, jubilación y educación; fin a la desigualdad social; feminismo e igualdad de género; reconocimiento de los pueblos indígenas y recuperación de territorios usurpados en dictadura; justicia por los crímenes cometidos en dictadura; corrupción y abuso de la clase política-empresarial; reformas constitucionales; derecho humano al agua y saneamiento; fin a las zonas de sacrificio<sup>11</sup>.

La efervescencia social, de carácter multigeneracional y sin color político (a excepción de los sectores de derecha que se restaron del movimiento), se vivió transversalmente en todo el país, logrando un amplio apoyo de la población mientras la aprobación del presidente Sebastián Piñera cayó hasta un 6%<sup>12</sup>. Las manifestaciones fueron violentamente reprimidas por fuerzas militares y policiales, dejando un saldo nacional (entre octubre de 2019 y marzo de 2020) de 34 personas fallecidas, 3,838 personas heridas, 427 personas con daño ocular por impacto de perdigones o bombas lacrimógenas perpetradas por la policía (34 con pérdida o estallido ocular), 10,365 detenidos en protestas (1,249 niños y adolescentes), y 5,155 denuncias por violación a los derechos humanos (526 por violencia sexual, 520 por tortura), según cifras del Instituto Nacional de Derechos Humanos (INDH, 2021).

A pesar de las políticas represivas impuestas por el gobierno de Piñera, las manifestaciones no cesaron y se logró conformar una Comisión Constituyente, por votación popular, para redactar la nueva Constitución Política del Estado Chileno y desechar la Constitución impuesta en dictadura. Se replegaron espontáneamente los cabildos abiertos en todo el país, y de esta forma surgieron propuestas concretas desde la ciudadanía organizada para formular las nuevas bases constitucionales y reformas estructurales profundas a uno de los sistemas neoliberales más desiguales del mundo.

En la Provincia de Petorca, donde nació el movimiento por el agua en Chile, luego del Estallido Social, las organizaciones locales como MODATIMA (Movimiento de Defensa por el acceso al

---

<sup>11</sup> Zonas de sacrificio: territorios intensivamente explotados o contaminados por actividades industriales, donde las comunidades social y económicamente vulnerables que habitan esos territorios son sometidas a absorber los costos ambientales y sociales de tales actividades.

<sup>12</sup>AFP (2020). Presidente chileno Sebastián Piñera obtiene 6% de aprobación, la peor en 30 años. Recuperado el 06/06/2021, de <https://www.france24.com/es/20200116-presidente-chileno-sebasti%C3%A1n-pi%C3%B1era-obtiene-6-de-aprobaci%C3%B3n-la-peor-en-30-a%C3%B1os-estudio>

Agua, la Tierra y la Protección del Medio Ambiente) y otros grupos activistas ambientales, lograron posicionar a varios de sus integrantes en cargos de poder municipal, regional y constitucional: Vladimir Vicencio (Oficina de Asuntos Hídricos, Municipalidad de Petorca), Álvaro Escobar (Concejal de la Municipalidad de Petorca), Ignacio Villalobos (Alcalde de Petorca), Rodrigo Mundaca (Gobernador de la Región de Valparaíso), y Convencional Constituyente (Carolina Vilches). Todos ellos, a excepción de R. Mundaca, participaron y colaboraron en el presente estudio en forma previa a ocupar estos cargos. Esto representa una alineación histórica, en muchos niveles de poder, de ideologías que buscan recuperar el acceso al agua, garantizar el derecho fundamental al agua potable y saneamiento, poner fin a la concepción del agua como una mercancía y devolverle su carácter de bien común, priorizando su uso como sostenedor de los ecosistemas y de la vida, salud y dignidad de las personas.

### **3.2. METODOLOGÍA**

El trabajo de campo con la población local se llevó a cabo entre los días 5 y 17 de enero de 2020, gracias al financiamiento aportado por el Programa de Becas Atlántida Coll del Instituto de Geografía de la UNAM. Además, contó con el apoyo y colaboración de pobladores de Hierro Viejo (Vladimir Vicencio, Pablo Verger) y organizaciones de la comuna de Petorca, como la Unión Comunal de Agua Potable Rural, el Geoparque Valle de Petorca y la Escuela de Agroecología Germinar. Esta primera fase de campo tuvo un carácter cualitativo, y consistió en la realización de entrevistas y una sesión de cartografía participativa, buscando los siguientes objetivos:

- Conocer el modelo de gestión y administración del agua en la comuna de Petorca, especialmente del agua subterránea, los actores que intervienen en su uso y manejo, y sus formas de organización, tanto a nivel comunitario y municipal.
- Generar una cartografía que sintetice la dinámica social y los conflictos en el territorio en torno al agua subterránea, estrategias de aprovechamiento, así como los elementos y mecanismos de injusticia hídrica percibidos por la población.
- Conocer la percepción de cambios/afectación del sistema hidrogeológico en las últimas décadas por parte de los habitantes de la comuna, identificando la ubicación de potenciales fuentes de afectación.
- Identificar la ubicación, acceso, estado y dueños de pozos y manantiales, con potencial de ser muestreados en la Fase de Campo II. Establecer contacto con los dueños para obtener permisos de muestreo.

Se buscó la participación de habitantes que estén o hayan estado vinculados con la extracción/gestión/administración de agua subterránea en la comuna de Petorca, tanto a nivel provincial, municipal y comunitario, consultando sobre los siguientes temas y sus respectivos observables (Tabla 3.1):

Tabla 3.1. Temas y observables abarcados en las entrevistas y cartografía participativa realizadas en el trabajo de Campo I (enero de 2020).

TEMA	OBSERVABLES
Uso, gestión y administración <sup>13</sup> del agua subterránea en la comuna de Petorca	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marco administrativo del agua subterránea, a nivel comunal (comuna de Petorca) y comunitario (localidades)</li> <li>- Actores relacionados con el uso y administración del agua subterránea, formas de organización</li> <li>- Principales usos del agua subterránea</li> <li>- Estrategias de aprovechamiento de agua subterránea</li> </ul>
Zonas de descarga de agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ubicación y estado de pozos y manantiales</li> <li>- Ubicación de fuentes termales</li> <li>- Accesos y propietarios</li> </ul>
Afectación al agua subterránea	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ubicación y características de potenciales factores de afectación</li> <li>- Mecanismos de afectación</li> <li>- Acciones de protección</li> </ul>
Cambios en el sistema hidrogeológico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cambios en la cantidad (caudal) y/o calidad del agua subterránea extraída</li> <li>- Variación de la profundidad del nivel piezométrico</li> <li>- Cese de manantiales/pozos</li> </ul>
Conflictos por el acceso al agua en el territorio	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Actores del conflicto y relaciones de poder</li> <li>- Acceso al agua subterránea, distribución del agua</li> <li>- Acaparamiento de agua, extracción intensiva</li> </ul>

### 3.2.1. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN

#### A. Entrevistas

Las entrevistas aplicadas fueron semiestructuradas, buscando conocer los diversos actores que intervienen en el modelo hídrico de la comuna de Petorca, sus funciones, la relación entre ellos y diferentes visiones sobre la crisis hídrica existente en el territorio. Se logró entrevistar a 9 dirigentes de organizaciones de administración comunitaria del agua en zonas rurales, conocidas como Sistemas de APR (Agua Potable Rural), 3 dirigentes de organizaciones locales de carácter político-ambiental, y 2 funcionarias públicas (autoridades a nivel municipal y provincial). Todas las entrevistas fueron registradas con grabación, con el debido consentimiento de los informantes. Además, se solicitó a las personas entrevistadas datos sobre el estado actual de los pozos, registros de caudal, profundidad del agua en la última década y análisis químicos. El listado de las 14 personas entrevistadas se muestra en la sección 3.3.

#### B. Cartografía Participativa

Con el objetivo de recoger un relato colectivo en torno a un bien común (el agua), específicamente acerca de la relación de los habitantes de la comuna de Petorca con el agua

<sup>13</sup> Conceptos explicados en sección 3.3.1.

subterránea, se utilizó la herramienta de mapeo colectivo para facilitar la reflexión y discusión sobre el estado actual del sistema hidrológico y los cambios percibidos en las últimas décadas. De esta manera, se logró visualizar gráficamente los elementos que componen la dinámica hidrosocial y el conflicto por el acceso al agua existente en el territorio.

Esta actividad se realizó en un espacio recuperado por el Comité de APR de Quebrada de Castro, el día 16 de enero de 2020, en conjunto con la Escuela de Agroecología Germinar y el Geoparque Valle de Petorca, donde se congregó a dirigentes, activistas y agricultores que se han abastecido de agua por medio de norias, pozos y manantiales (vertientes, como se les conoce localmente) durante décadas para regadío de sus cultivos familiares. Como guía metodológica se utilizó el “Manual de Mapeo Colectivo: Recursos cartográficos críticos para procesos territoriales de creación colectiva” de los llamados “Iconoclasistas” (Ares y Risler, 2013), el cual ofrece una serie de íconos y dispositivos gráficos para representar lo que se desea cartografiar. El mapa colectivo se construyó sobre una imagen satelital (Landsat 8) con la delimitación comunal, a escala 1:50.000, que fue cubierto por láminas de mica transparente para poder dibujar y escribir sobre el mapa, y pegar los íconos extraídos del manual iconoclasista.

El primer paso fue hacer una breve presentación de cada uno de los asistentes, seguido de la explicación de la metodología a seguir y de la imagen satelital utilizada. A continuación se invitó a los participantes a localizar diferentes poblados y puntos de referencia en el mapa, para luego abrir el diálogo mediante una serie de preguntas generadoras. Los resultados se encuentran en la siguiente sección.

### **3.3. RESULTADOS**

A pesar de los inconvenientes relacionados a la emergencia hídrica<sup>14</sup> en la comuna de Petorca, fue posible recabar información clave para conocer el modelo de administración y gestión del agua, así como el conflicto socioambiental. La Fig. 2 muestra la distribución de los puntos visitados de la red de comités y cooperativas de APR (Agua Potable Rural) de la comuna (a excepción de la Cooperativa de APR Artificio, que pertenece a la comuna de Cabildo), logrando abarcar gran parte del área de estudio y cubriendo las 4 subcuencas que componen la parte media y alta de la cuenca del Río Petorca: (1) Río Pedernal, (2) Río El Sobrante, (3) Estero Las Palmas y (4) Río Petorca Oriente.

---

<sup>14</sup> Referido a la condición de desabastecimiento de agua de varios sistemas de APR (Agua Potable Rural), dificultando la participación de sus dirigentes en las actividades del trabajo de campo.

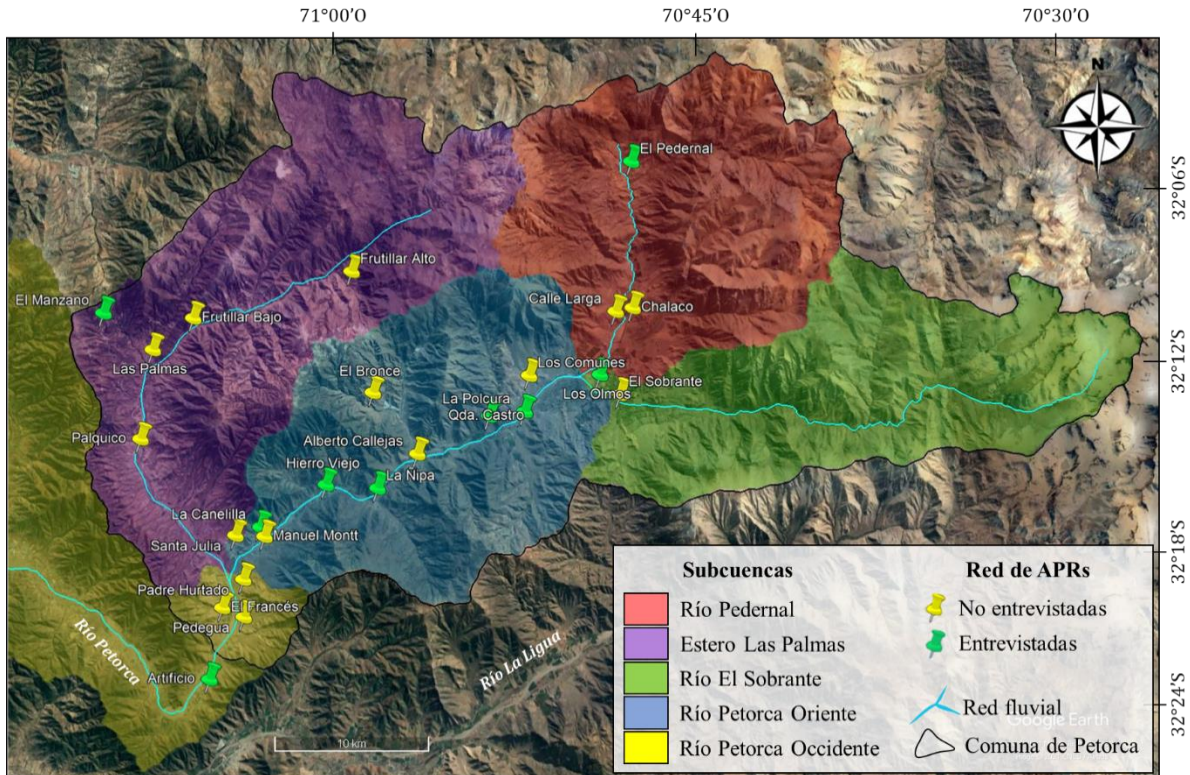


Fig. 2. Mapa que muestra la red de comités y cooperativas de Agua Potable Rural (APR) en la parte media y alta de la Cuenca del Río Petorca. En color verde se indican las APRs visitadas en la Fase I de Campo (enero, 2020), para llevar a cabo las entrevistas a sus dirigentes.

Durante el recorrido por la comuna se pudo observar drásticas diferencias en el paisaje natural, determinadas por la presencia o ausencia de agua (Fig. 3), así como también en las condiciones de vida de los habitantes, relacionadas a las posibilidades de acceso al agua. Además, se apreció numerosas y diversas formas de manifestaciones de las demandas por el acceso al agua, destacando la consigna “No es sequía, es saqueo” (Fig. 4) que ha resonado con fuerza en todo el país, y diferentes formas de organización social para enfrentar la emergencia hídrica y política<sup>15</sup>.

<sup>15</sup> Durante el Estallido Social (sección 3.1.1), el gobierno de Sebastián Piñera reprimió fuertemente cualquier forma de manifestación, declarando Estados de Excepción Constitucional (recurso dispuesto para situaciones graves donde la seguridad y el orden público se ven gravemente afectados) que restringen las garantías constitucionales como la libertad de locomoción, reunión y el arresto arbitrario de personas, por lo que se vivía un clima ambivalente de miedo y subversión.





Fig. 3. A) Estanques de acumulación de agua que abastece el cultivo de paltos (aguacate) adyacente, en el sector de Calle Larga (parte alta de la cuenca). B) Lecho del Río Petorca, completamente seco, en el puente de la ciudad de Petorca (parte media de la cuenca). Registro personal, enero 2020.



Fig. 4. Manifestaciones del conflicto por el acceso al agua. A) Rayado en paradero de micro en Petorca: "No es sequía, es saqueo" (tomada en enero, 2020). B) Demandas por el derecho al agua, en el contexto del Estallido Social Chileno (octubre, 2019), tomada de internet.

## Entrevistas

A continuación se muestra el listado de las 14 personas entrevistadas en enero de 2020, junto con una breve reseña de los cargos y funciones que desempeñan dentro del sistema hidrosocial en la comuna de Petorca:

1. Álvaro Escobar: gerente de la Cooperativa de APR de Hierro Viejo y presidente de la Unión Comunal de Agua Potable Rural de la cuenca del Río Petorca, agrupación que reúne a todos los comités y cooperativas de APRs de la comuna de Petorca. Actualmente se desempeña como Concejal por la comuna, elegido por votación popular (2021). Su colaboración en este estudio fue crucial, ya que propició el contacto de la mayor parte de los dirigentes de APR entrevistados.
2. Claudio Martínez: técnico agrícola, presidente de la Asociación Gremial de APRs del Río Petorca, organización que permitió el desarrollo del Sistema de Aducción de Hierro Viejo (véase sección 3.3.1.B).
3. Heriberto Araya: presidente del Comité de APR El Pedernal.
4. Sergio Rodríguez: vicepresidente de la Cooperativa de APR Valle Los Olmos.
5. Gonzalo Vargas: orfebre, presidente del Comité de APR La Polcura.
6. M<sup>a</sup> Inés Catalina Espinoza: presidenta del Comité de APR Quebrada de Castro.
7. Luis Godoy: agricultor, presidente y operador del Comité de APR El Esfuerzo de La Canelilla.
8. Jennifer Cortez: secretaria del Comité de APR El Manzano.
9. Myriam González: presidenta de la Cooperativa de APR de Artificio y directora de las Comunidades de Agua Subterránea (CASUB) de Petorca Oriente, un red de usuarios de agua subterránea con personalidad jurídica organizada en torno a un acuífero o sector hidrogeológico de aprovechamiento común (SHAC).
10. Nicolás Quiroz: profesor de historia y dirigente de la Escuela de Agroecología Germinar, organización que busca impulsar la agroecología desde su dimensión técnica y política en el Valle de Petorca, para hacer frente a la agroindustria instalada en la zona y crear alternativas de producción popular.
11. Ignacio Villalobos: técnico agrónomo, dirigente de MODATIMA (Movimiento de Defensa por el acceso al Agua, la Tierra y la Protección del Medio Ambiente), y actual alcalde de la comuna de Petorca elegido por votación popular (2021).
12. Ricardo Ferreira: ex asesor gubernamental en materia hídrica en la Provincia de Petorca, forma parte de la Fundación Agua Acción y la Fundación Desarrollo para Petorca.
13. Carolina Vilches: geógrafa, especialista en gestión hídrica. Encargada de la Oficina de Asunto Hídricos de la I. Municipalidad de Petorca. Actualmente forma parte de la Convención Constituyente elegida por votación popular (2021).
14. Claudia Carrasco: Ingeniera civil especialista en hidráulica y en gestión integrada de recursos hídricos, ingeniera de proyectos de Agua Potable Rural. Es jefa de la Oficina Provincial de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) de la Provincia de Petorca, organismo dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP).



Varias de las personas entrevistadas aportaron informes técnicos, bases de datos, bibliografía relevante y contactos. Así, fue posible adquirir registros de diversos pozos de la red de APR, como coordenadas, caudal de extracción, profundidad del agua e informes de calidad del agua cruda (sin potabilizar). Además, se obtuvo el permiso de 4 particulares y 9 organizaciones de APR de la comuna de Petorca, para realizar mediciones de parámetros fisicoquímicos y recolectar muestras de agua subterránea en los pozos bajo su propiedad o administración, durante la Fase II de campo, que se realizó un año más tarde. Algunas imágenes de los puntos visitados se exhiben en la Fig. 5.



*Fig. 5. Fotografías de pozos y acumuladores de APRs visitados para entrevista de sus dirigentes (enero, 2020). A) La Canelilla, B) Quebrada de Castro, C) El Manzano, D) Valle Los Olmos (ubicación en Fig. 2).*

### **Cartografía Participativa**

A través de la cartografía participativa se obtuvo información sobre los elementos del sistema hidrosocial y la relación entre ellos, con énfasis en aquellos actores involucrados en el conflicto por el agua. También se buscó conocer los efectos sociales y ambientales del conflicto percibidos por la comunidad. Se logró convocar a 14 personas de un amplio rango etario (entre 25 y 65 años), provenientes de diversas localidades de la comuna (Fig. 6). Para incitar el diálogo y localización de elementos en el mapa, se plantearon las siguientes preguntas generadoras a lo largo de la actividad:

- ¿Quiénes son los actores relacionados con el uso, administración y gestión del agua?
- ¿Cuáles son las formas de organización en torno al agua?
- ¿Cómo se manifiesta la problemática del agua en la comuna?
- ¿Cuál es el origen del conflicto por el acceso al agua en la comuna?
- ¿Cómo se manifiestan las acciones de las comunidades frente a la problemática del agua?



- ¿Cuáles son las fuentes de contaminación del agua en la comuna?
- ¿Cuáles son los elementos o factores que ponen en riesgo la seguridad hídrica en la comuna?

Los participantes indicaron puntos en el mapa donde las vertientes (manantiales) se han secado, y donde se extrae agua subterránea en forma intensiva e incluso ilegalmente, así como también posibles fuentes de contaminación a los cursos de agua superficiales y subterráneos. Se señaló a los relaves (jales) mineros del sector de Pedernal, Los Comunes y El Bronce, como potenciales fuentes de contaminación, ya que no se encuentran debidamente manejados, y se sospecha que son fuente de contaminación *“por arsénico al suelo y al agua subterránea”*. También se indicó como una fuente de contaminación el vertedero (depósito de residuos domiciliarios) de Chincolco y los derrames irregulares de aguas negras en el sector de la Planta de Tratamiento de ESVAl (empresa sanitaria de agua). Estos puntos serán tratados con mayor profundidad en la sección 3.3.2.



*Fig. 6. Sesión de Cartografía Participativa realizada en Quebrada de Castro (enero, 2020), a través de una alianza con la Escuela de Agroecología Germinar y el Geoparque Valle de Petorca.*

Además, se generó un interesante debate y reflexión sobre el desabastecimiento de agua que afecta al territorio hace más de una década. Manifestaron el sentimiento de desgaste emocional y de injusticia que significa ser vecinos de los paltos (aguacates), *“las agrícolas verdes verdes y nosotros perdimos todos nuestros árboles y animales... Si hubiera suficiente agua, toda la comunidad tendría como para regar sus huertos... pero no están las condiciones como para que todos compartamos el agua”*. Se cuestionó fuertemente el modelo de gestión del agua y la inequidad en su repartición: *“habría que saber cuánta es la cantidad de agua necesaria para poder mantener la vida y los sistemas agroecológicos, que permitan a las comunidades subsistir, y desde ahí repartir el agua”*. *“¿Cuánta agua necesitamos para vivir, para comer? porque la*

*mayoría de la producción aquí no es para comer (aquí), es para exportación”. “Se preocupan de ver cuánta agua tenemos, pero la calidad pasa a un segundo plano”.*

Respecto a las formas de organización para enfrentar el desabastecimiento de agua, el grupo comentó las dificultades que han tenido durante años para concretar proyectos de abastecimiento de agua potable que les permita independizarse de los camiones aljibe, sobre todo aquellas localidades que, por su reducido número de habitantes, no pueden optar a fondos estatales de financiamiento para este tipo de proyectos. La colaboración entre las APRs y el apoyo de la Oficina de Asuntos Hídricos de la Municipalidad de Petorca ha sido fundamental para lograr el suministro de agua potable en sus hogares. Sin embargo, se observó ciertas deficiencias en la infraestructura de carácter comunitario que han logrado habilitar: *“se habilitó una piscina para los pequeños agricultores, pero no está muy coordinado, la manguera está rota... El agua nos llega por gravedad pero es muy poquita, no alcanza”.* Y al parecer no se encuentran debidamente asegurados: *“había perros muertos”* (en un estanque de acumulación de agua).

Las organizaciones de usuarios de agua, como las Asociaciones de Canalistas (agua superficial) y las CASUB (Comunidades de Agua Subterránea) (ver sección 3.3.1C), pueden incluir a pequeños y grandes agricultores, repartiendo el agua según el número de acciones que cada socio tiene, y cada título de agua corresponde a un voto. *“Son una forma poco democrática porque los que conforman las directivas son los que tienen más acciones o derechos de agua. Como no hay agua en el río, los canalistas no están operando, entonces qué hacen ellos, vienen los viejos grandes (empresas agrícolas), les compran las acciones y así obtienen más derecho a voto. Por eso hay que promover que los canalistas que no vendan sus acciones”.*

Por último, se manifestó preocupación sobre la construcción de un embalse en el Estero Las Palmas, concesión adjudicada por la empresa china Harbour Engineering Company (CHEC). Existe desconfianza y la creencia de que este embalse va a beneficiar a las agrícolas del sector, ya que el agua no estaría destinada al consumo humano. Por otro lado, se cuestionó la utilidad de esta obra: *“El embalse Las Palmas nunca se va a llenar con las precipitaciones de aquí, de dónde van a traer el agua?”* Efectivamente el proyecto contempla la inyección de agua subterránea desde el sector de Río Tinto (parte alta del Río Petorca) a través de un canal alimentador. Recientemente, CHEC denunció errores significativos en los cálculos de disponibilidad de agua efectuados por la DGA, por lo que solicitaron a las autoridades suspender el contrato de construcción y compensaciones económicas<sup>16</sup>.

El mapa construido colectivamente se exhibe en la Fig. 7 y la Fig. 8. Los elementos del sistema hidrosocial indicados por los participantes y los actores involucrados en el conflicto por el acceso al agua, así como las fuentes potenciales de afectación al agua subterránea percibidas, serán abordados con mayor profundidad en lo que resta del capítulo.

---

<sup>16</sup> Noticia publicada en el medio El Observador el 04/09/2021: <http://www.observador.cl/petorca-empresa-concesionaria-pide-indemnizacion-y-suspender-contrato-del-embalse-las-palmas-por-falta-de-agua-en-la-zona/>



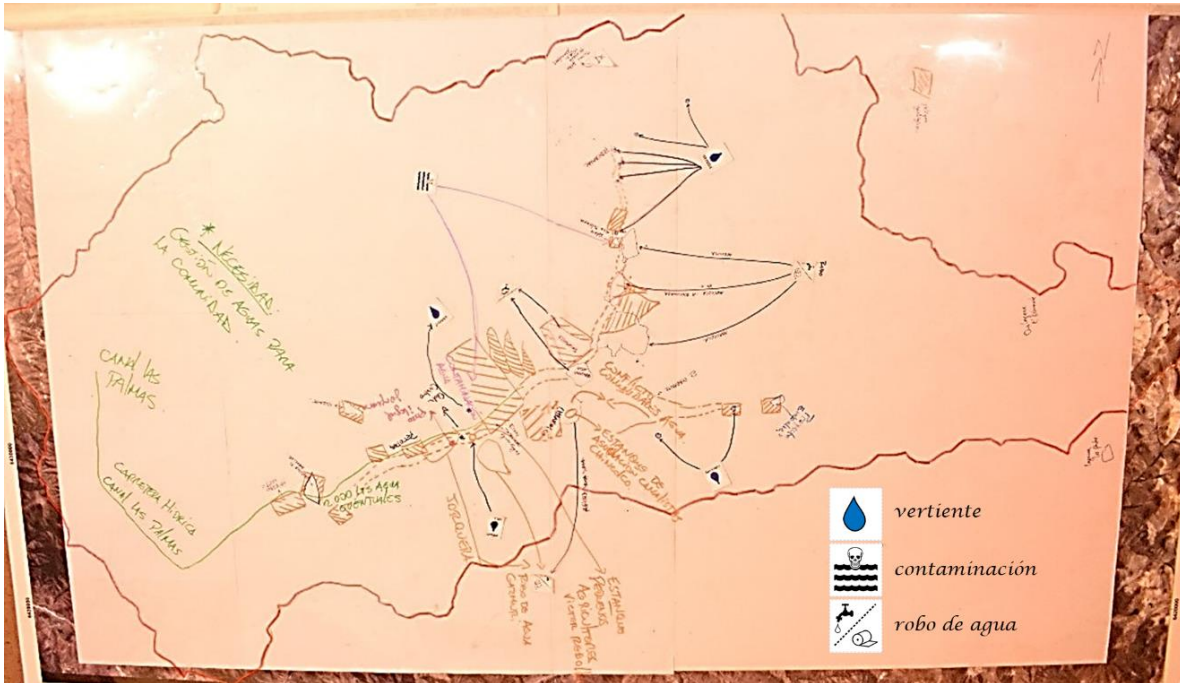


Fig. 7. Resultado de la sesión de Cartografía participativa (enero, 2020). Se ha puesto una lámina blanca entre la imagen satelital y la mica para su mejor visualización.

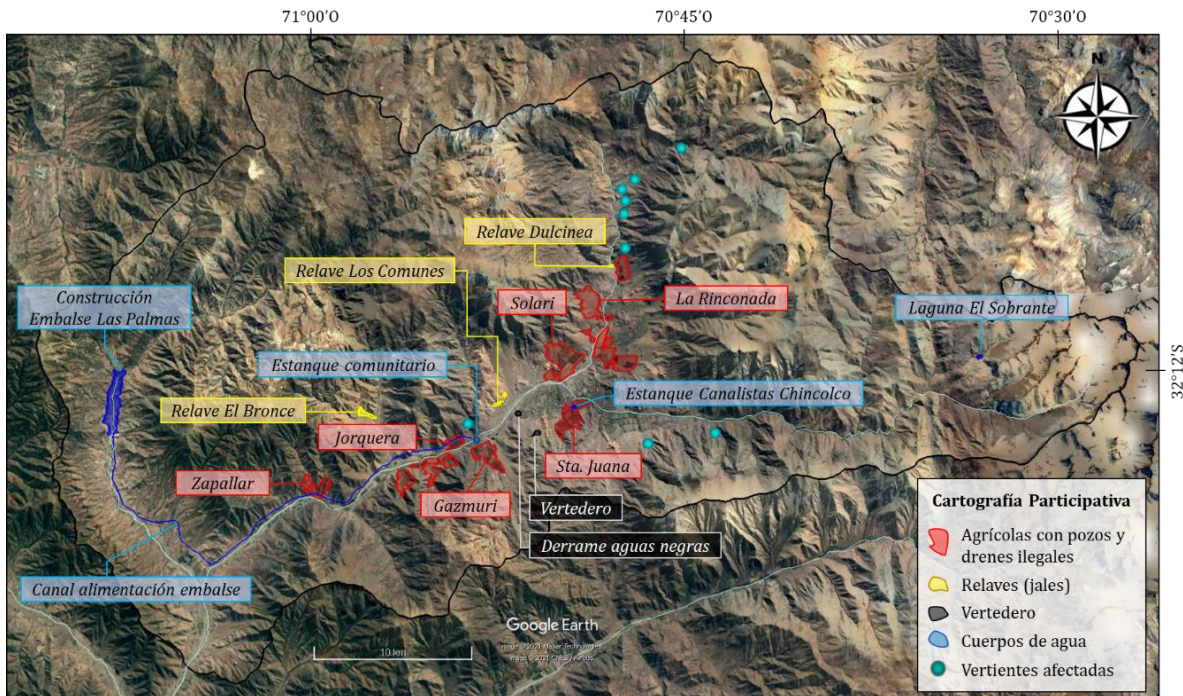


Fig. 8. Digitalización de la cartografía participativa (Fig. 7), que muestra los elementos del sistema hidrosocial y actores involucrados en el conflicto por el acceso al agua, además de fuentes potenciales de afectación al agua subterránea percibidos por los asistentes.

### 3.3.1. USO, ADMINISTRACIÓN Y GESTIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA COMUNA DE PETORCA

Se entiende por **uso** del agua subterránea todas aquellas formas en que se utiliza esta fuente de agua, ya sea para fines de consumo humano, regadío, industrial, etc. Por otro lado, el concepto de **administración** se refiere a la planificación u organización de acciones y la disposición de recursos financieros para alcanzar ciertos objetivos. En cambio, la **gestión** tiene que ver con la ejecución o puesta en marcha de las acciones planificadas<sup>17</sup>.

En Chile, el uso, administración y gestión del agua están regidos por el **Código de Aguas** (1981) donde se define en su Artículo 2: “*son aguas subterráneas las que están ocultas en el seno de la tierra y no han sido alumbradas*” (Min. de Justicia, 1981). La exploración y explotación del agua subterránea está sujeta a las normas de la **Dirección General de Aguas (DGA)**, la principal autoridad del agua en el país, dependiente del Ministerio de Obras Públicas. Este organismo está encargado de la gestión y administración del agua, mediante las siguientes facultades: (1) medición, monitoreo e investigación de los “recursos hídricos” en el país; (2) planificación del recurso y formulación de recomendaciones para su aprovechamiento; (3) otorgamiento de los derechos de aprovechamiento de aguas; (4) regulación y limitación de la extracción de agua; (5) fiscalización de obras hidráulicas y regímenes de extracción; (6) supervisión de organizaciones de usuarios del agua. A lo largo de este capítulo se analizarán ciertas deficiencias en el cumplimiento de estas funciones, y cómo esto ha contribuido a la crisis hídrica en Petorca.

El uso del agua subterránea en Petorca adquirió gran relevancia cuando los cursos superficiales de la cuenca del Río Petorca comenzaron a agotarse, desde fines de la década del 90. Según el estudio de Bujes (2015), la mayor parte del agua subterránea en la cuenca es utilizada para riego por empresas agrícolas, con un 45% del caudal total registrado en la DGA (Tabla 3.2). Estos derechos fueron inscritos en su mayoría a partir del año 2005, durante el *boom* del negocio de la palta (aguacate). Cabe notar que el 74% de los derechos no están identificados en la base de datos oficial de la DGA.

*Tabla 3.2. Titulares efectivos de derechos de agua en la Cuenca del Río Petorca (vigentes hasta octubre de 2012). OUA: Organizaciones de Usuarios de Agua. Tomado de Bujes (2015).*

Categoría	Titulares Efectivos	Número de Registros	Derechos de Agua Inscritos	Caudal otorgado	
				l/s	%
Empresa Agrícola	58	257	323	1976.40	45.67
Persona Natural	619	919	1069	1861.93	43.03
Otros	16	29	41	237.33	5.48
Agua Potable	19	36	36	180.98	4.18
Empresa Minera	3	5	6	42.86	0.99
OUA	2	2	2	27.60	0.64
<b>TOTAL</b>	<b>717</b>	<b>1248</b>	<b>1477</b>	<b>4327.10</b>	<b>100.00</b>

<sup>17</sup>RAE (2001) y Universidad Benito Juárez (2015), consultado 26/08/2022 <https://www.ubjonline.mx/gestion-de-proyectos-vs-administracion/#:~:text=Mientras%20que%20la%20administraci%C3%B3n%20planifica,recursos%20y%20monitorea%20sus%20trabajos.>

## A. Administración del Agua Subterránea

En Chile se han definido 212 acuíferos administrativos<sup>18</sup>, mayormente concentrados en la Zona Centro y Sur del país, mientras que la Zona Austral permanece sin información (Fig. 9A). Los derechos de aprovechamiento subterráneos se clasifican en definitivos (otorgados a perpetuidad en dictadura) y provisionales, siendo estos últimos aquellos que se han entregado en los denominados **Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC)**. En los SHAC, la DGA puede limitar el ejercicio de los derechos de extracción o dejarlos sin efecto, en caso de constatar la afectación a los derechos de aprovechamiento definitivos (DGA, 2016b). Cada SHAC se encuentra caracterizado con información administrativa (número y caudal de derechos de agua definitivos o provisionales) y física (área, volumen sustentable/recarga, volumen provisional, disponibilidad total, volumen total comprometido, volumen total solicitado, disponibilidad actual y reservas), verificándose el “sobretorgamiento” de derechos respecto a la disponibilidad total, calculada mediante el Balance Hidrológico (DGA, 2017). Para el caso del **Acuífero Río Petorca**, la DGA ha definido 5 SHAC (DGA, 2014), de los cuales el N° 4 (Río Petorca Poniente) no se incluye en el área de estudio (Tabla 3.3; Fig. 9C):

Tabla 3.3. Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) que conforman el Acuífero del Río Petorca, definidos por la Dirección General de Aguas (DGA).

Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) del Acuífero Río Petorca		
Nº Sector	SHAC	Estado
1	Río Pedernal	zona de prohibición
2	Estero Las Palmas	zona de prohibición
3	Río del Sobrante	zona de prohibición
4	Río Petorca Poniente	zona de prohibición
10	Río Petorca Oriente	zona de prohibición

La DGA puede declarar **Zonas de Prohibición** para nuevas explotaciones, mediante resolución fundada en la protección de acuífero (Artículo 63 del Código de Aguas), que impide otorgar ningún tipo de derechos de aprovechamiento. Además, la DGA está facultada para declarar **Áreas de Restricción**, que corresponden a los SHAC “en los que existe el riesgo de grave disminución de un determinado acuífero, con el consiguiente perjuicio de derechos de terceros ya establecidos en él” (Artículo 65 del Código de Aguas); sólo se pueden entregar derechos de aprovechamiento provisionales. La declaración de una zona de prohibición y de un área de restricción da origen a una **Comunidad de Aguas Subterráneas (CASUB)**, formada por todos los usuarios comprendidas en ella. Las CASUB del Acuífero Río Petorca, con sus derechos de agua, caudales otorgados y pozos, se encuentran en la Tabla 3.4.

Con base en estudios técnicos donde se aplica el Balance Hidrológico, la DGA ha declarado a nivel nacional 95 SHAC como Área de Restricción y 91 como Zona de Prohibición (DGA, 2017)

<sup>18</sup> Los criterios que rigen la definición de sus límites y distribución serán discutidos en la sección 6.2.2.



(Fig. 9B). Todos los SHAC del acuífero del Río Petorca fueron declarados como Áreas de Restricción para nuevas explotaciones de aguas subterráneas (Resolución DGA-216, 15 de abril de 1997); luego se dejó sin efecto los derechos de aprovechamiento provisionales de aguas subterráneas (Resolución DGA-1703, 13 de junio de 2014) y actualmente se encuentran catalogados como Zonas de Prohibición (Resolución DGA-19, 25 de julio de 2018) (DGA, 2019).

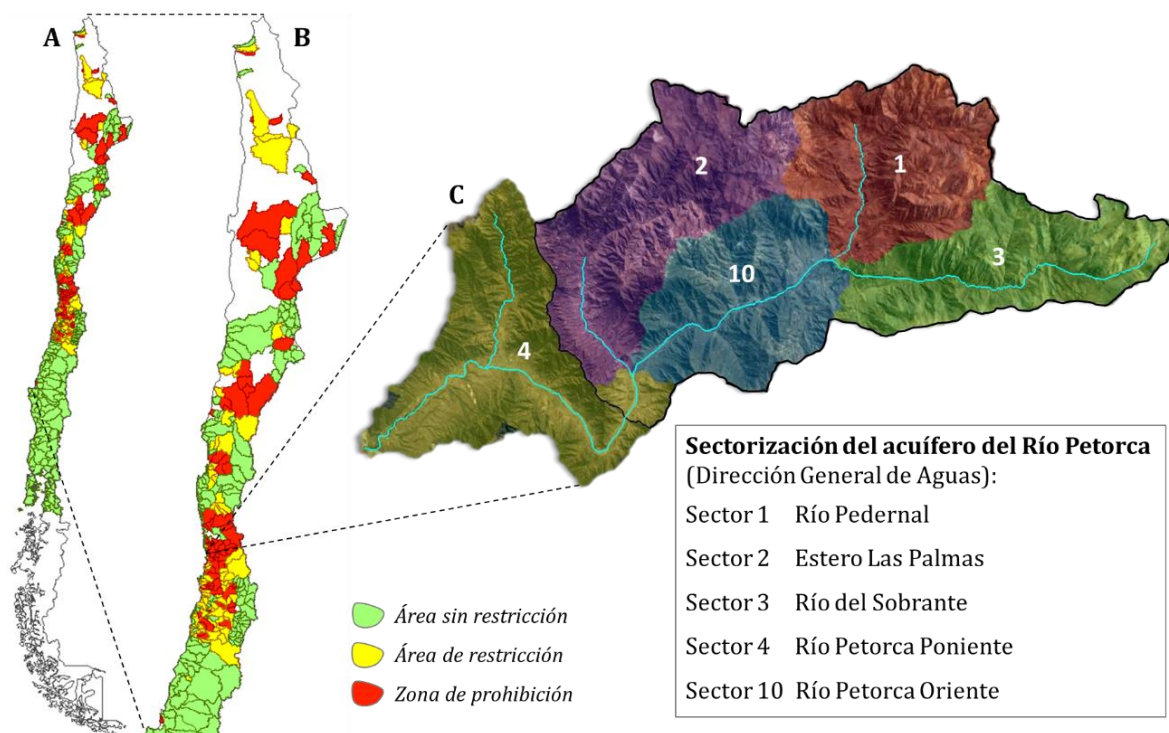


Fig. 9. A) Acuíferos definidos por la Dirección General de Aguas en Chile. B) Ampliación de la Zona norte y Centro (hasta Concepción), donde se concentran las Áreas de Restricción y Zonas de Prohibición. C) Sectorización del Acuífero Río Petorca; en negro se delimita la Comuna de Petorca. Fuente: <https://snia.mop.gob.cl/observatorio/>.

Tabla 3.4. Derechos de agua subterránea inscritos en la DGA por las CASUB hasta 2016, en el Acuífero Río Petorca y situación de pozos pertenecientes a las CASUB según registros de la DGA vs catastro realizado por la CNR (Hidrogestión, 2019).

CASUB	Nº de títulos	Caudal asignado (l/s)	Pozos inscritos	Pozos no inscritos	Total de pozos	% Pozos irregulares
Petorca Poniente	1123	2697.2	562	1053	1615	65.2
Petorca Oriente	337	1214.7	355	564	919	61.4
Estero Las Palmas	107	232.2	129	236	365	64.7
Río Pedernal	94	258.6	86	117	203	57.6
Río El Sobrante	41	103.6	61	38	99	38.4
<b>TOTAL</b>	<b>1702</b>	<b>4506.3</b>	<b>1193</b>	<b>2008</b>	<b>3201</b>	<b>287.2</b>

## B. Abastecimiento de Agua Potable

En las zonas urbanizadas del país el agua potable es suministrada por empresas sanitarias, que pasaron a ser privadas a fines del siglo pasado. En el caso de Petorca, es ESVAL (Empresa Sanitaria de Valparaíso, Aconcagua y Litoral), la primera en ser privatizada en 1998, perteneciente a ENEL (mayor consorcio eléctrico en Chile, de accionistas italianos), la cual abastece a las ciudades de Petorca y Chincolco. Por su parte, en las zonas rurales (como lo es gran parte de la comuna de Petorca) existe una red de organizaciones de **Agua Potable Rural (APR)**, un modelo público-comunitario de agua potable, originado en la década de los 60s, que abastece a las localidades donde las empresas sanitarias no desean invertir. Las APRs se constituyen bajo la figura de comités y cooperativas, que operan bajo los permisos de funcionamiento del Ministerio de Salud<sup>19</sup>, y cuentan con la participación voluntaria de la comunidad. Su fuente de financiamiento proviene de la subvención estatal por parte del Departamento de Programas Sanitarios (DPS), perteneciente al Ministerio de Obras Públicas (MOP), según la ley de presupuesto aprobada cada año en el Congreso (Villarroyel, 2012), y de una cuota social aportada por los socios de las cooperativas y comités.

Las organizaciones de APR se originan desde una solicitud de la comunidad al MOP, organismo que otorga un terreno para la instalación de infraestructura de extracción o captación de agua, tratamiento y matrices de distribución. Los miembros del directorio de los comités y cooperativas de APRs son elegidos democráticamente por sus socios, quienes asumen la ardua tarea, en forma no remunerada, de administración y gestión del agua para la comunidad que representan. En muchos casos, el personal carece de preparación técnica para las labores de gestión operacional, y deben lidiar con la burocracia institucional y las desigualdades en la distribución del agua.

En la comuna de Petorca existen 25 organizaciones de APR (Fig. 2), 3 cooperativas y 22 comités, agrupadas en la **Unión Comunal de APRs de la Cuenca del Río Petorca**, que también incluye a la APR de Artificio (en comuna vecina de Cabildo). Sus dirigentes declaran un importante desgaste físico y psicológico, no sólo por la exigencia de aprender sobre el funcionamiento y mantenimiento del servicio de agua potable, temas contables y administrativos, sino porque *“la emergencia hídrica se ha extendido por demasiado tiempo y no damos abasto con la cantidad de problemas que debemos solucionar”*, refiriéndose a los desafíos de enfrentar a diario el desabastecimiento de agua, el agotamiento de los pozos, el deterioro de la infraestructura hídrica, conflictos entre los socios y con las autoridades, etc. *“El trabajo colaborativo y solidario entre las APRs, y el apoyo de la Oficina de Asuntos Hídricos, ha sido esencial para lograr lo que hemos logrado”*, declara una dirigente de APR. En 2017, mediante un Fondo de Protección Ambiental (FPA), la Unión de APRs logró la creación del Nudo Hídrico: una sede ubicada en Hierro Viejo que incluye oficinas, una Biblioteca del Agua y una estación meteorológica. Esto ha favorecido el trabajo y coordinación de los dirigentes, así como también de los estudiantes, académicos, profesionales y voluntarios que han aportado a la labor de las APRs.

---

<sup>19</sup> SiSS (Superintendencia de Servicios Sanitarios). Consultado el 24/03/2021 en <http://www.siss.gob.cl/appsiss/historico/w3-article-3809.html>

Entre los sistemas de APR se distinguen “APR MOP” y “APR No MOP”, “*dependiendo de si están adscritas al MOP, lo que implica recibir (o no) apoyo técnico y financiero para obras hidráulicas*”, aclara la funcionaria de la DOH. Los dirigentes APRs entrevistados comentaron que esta diferencia se hace en función del número de habitantes, por lo tanto, “*las localidades con pocos habitantes no pueden optar a este tipo de apoyo ministerial*”; en consecuencia, ante el agotamiento de sus fuentes de agua, su abastecimiento depende del camión aljibe. La Tabla 3.5 muestra el listado de APRs MOP y No MOP en la comuna de Petorca, distinguiendo su fuente de abastecimiento de agua potable. Nótese que casi todas las APR cuentan con uno o más pozos para extracción de agua, pero la mayoría de ellos se encuentra en desuso por agotamiento del agua subterránea, por lo que actualmente son abastecidos con camiones aljibe o por medio del sistema de emergencia de aducción (explicado en la siguiente sección).

*Tabla 3.5. Organizaciones de Agua Potable Rural (APR) de la Comuna de Petorca, indicando si reciben (“MOP”) o no (“No MOP”) apoyo del MOP (Ministerio de Obras Públicas), N° de viviendas beneficiadas y su fuente de abastecimiento de agua (Aljibe: camión aljibe; Aducción: ver pág. 43). Fuente: entrevistas realizadas en este estudio (enero, 2020) y Oficina de Asuntos Hídricos (comunicación enero, 2022).*

	<b>APR</b>	<b>MOP ?</b>	<b>N° viviendas</b>	<b>Fuente de abastecimiento</b>
1	Villa Alberto Callejas	MOP	176	Aducción
2	Hierro Viejo	MOP	361	Aducción + Aljibe
3	Manuel Montt	MOP	117	Aducción
4	Santa Julia	MOP	152	Aducción
5	El Francés	MOP	160	Aducción + Pozo
6	Pedegua	MOP	366	Aducción + Aljibe
7	Chalaco	MOP	123	Pozo
8	Valle Los Olmos	MOP	330	Pozo
9	La Polcura	MOP	64	Pozo
10	Palquico	MOP	98	Pozo
11	Las Palmas	MOP	60	Pozo
12	Padre Hurtado	MOP	65	Pozo
13	El Sobrante	MOP	178	Pozo
14	La Ñipa	MOP	265	Pozo + Aducción + Aljibe
15	Quebrada de Castro	No MOP	8	Aducción
16	La Canelilla	No MOP	39	Aducción
17	Paradero 4	No MOP	127	Aducción
18	El Bronce + El Durazno Unido	No MOP	37	Aljibe
19	Los Comunes	No MOP	55	Pozo + Aljibe
20	Frutillar Bajo	No MOP		Manantial + Aljibe
21	Frutillar Alto	No MOP	12	Manantial + Aljibe
22	El Manzano	No MOP	30	Manantial + Aljibe
23	Calle Larga	No MOP	42	Pozo
24	Quebrada Honda	No MOP	24	Pozo
25	Pedernal	No MOP	45	Manantial



Los camiones aljibe son dispuestos por la Municipalidad de Petorca, que compra agua a proveedores privados locales que cuentan con derechos de agua subterránea y pozos suficientemente profundos y/o en zonas privilegiadas de la comuna que aún preservan sus reservorios de agua, como el sector de Río Tinto y El Sobrante. Tal como se pudo apreciar en el trabajo de campo, el nuevo paisaje petorquino incluye el tránsito constante de camiones aljibe.

### Pozos y Manantiales Agotados

Según la información recabada en terreno durante las entrevistas (enero, 2020) y en la campaña de muestreo de pozos y manantiales (febrero, 2021), es posible identificar y localizar aquellas fuentes que abastecen de agua a la población de Petorca que se han agotado y las que continúan activas, como se muestra en la Fig. 10. De hecho, muchos de los puntos visitados en la Fase de Campo I, donde se obtuvo autorización para el monitoreo de agua, no pudieron ser muestreados ya que se habían agotado al regresar al año siguiente.

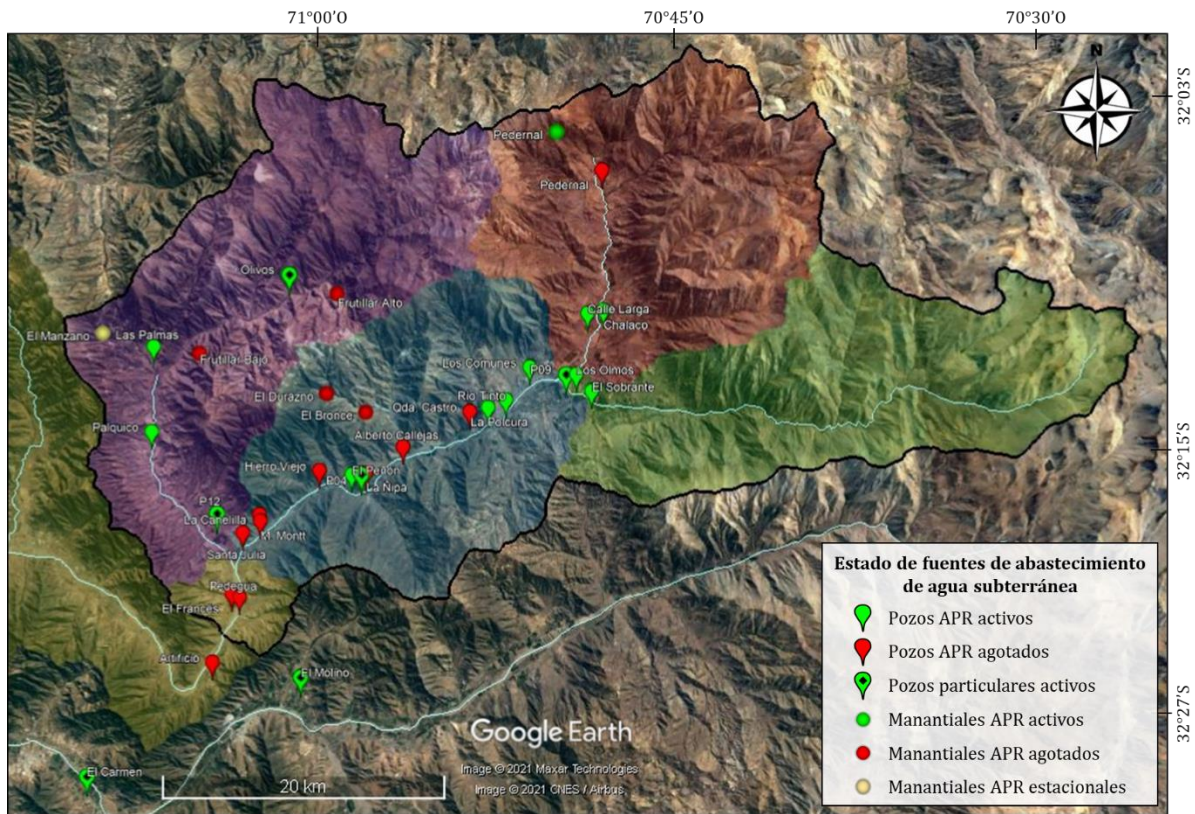


Fig. 10. Estado de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea, de uso comunitario APR (Agua Potable Rural) y particular para riego. Información recabada en campo (enero, 2020; febrero, 2021) y actualizada por vía telefónica (noviembre, 2021).

Tabla 3.6. Estado de las fuentes de abastecimiento de agua subterránea. Distribución en Fig. 10.

Sector	Localidad	Uso	Fuente	Estado	Profundidad pozo
El Sobrante	El Sobrante	APR	Pozo	activo	8 m
			Manantial	activo	
	V. Los Olmos* (P15)	APR	Pozos (5)	sólo 1 activo	8-80 m
	Chincolco (P09)	Particular	Pozo	activo	80 m
Las Palmas	Palquico (P13)	APR	Pozo	activo	N.I.
	Las Palmas (P14)	APR	Pozo	activo	42 m
	Frutillar Bajo	APR	Manantial	inactivo	
	Frutillar Alto	APR	Manantial	inactivo	
	El Manzano*	APR	Manantial	estacional	
	Sta. Julia (P12)	Particular	Pozo	activo	23 m
Pedernal	Chalaco (P08)	APR	Pozo	activo	48
	Calle Larga* (P06)	APR	Pozo	activo	80
	Pedernal* (P07)	APR	Manantial	activo	
Pozo			agotado	6 m	
Petorca E	V. Alberto Callejas	APR	Pozo	agotado	
	Hierro Viejo*	APR	Pozos (4)	agotado	7-58 m
	Manuel Montt	APR	Pozo	agotado	
	Santa Julia	APR	Pozo	agotado	
	La Ñipa	APR	Pozo	agotado	
	La Polcura*	APR	Pozo	activo	
	Qda. de Castro*	APR	Pozo	agotado	10 m
	La Canelilla*	APR	Pozo	agotado	
	El Bronce	APR	Manantial	agotado	
	El Durazno Unido	APR	Manantial	agotado	
	Los Comunes (P16)	APR	Pozo	activo	70 m
	Río Tinto (P10)	APR	Pozo	activo	18 m
	El Peñón (P05)	Aducción*	Pozo	activo	120 m
	La Ñipa (P04)	Particular	Pozo	activo	41 m
Petorca W	El Francés	APR	Pozo	agotado	
	Pedegua	APR	Pozo	agotado	
	Padre Hurtado	APR	Pozo	agotado	
	Paradero 4	APR	Pozo	agotado	
	Artificio*	APR	Pozos (4)	agotados	11-34 m
	Frutillar Alto*	Particular	Pozo	activo	22 m
La Ligua	El Carmen (P02)	Particular	Pozo	activo	21 m
	El Molino (P03)	Particular	Pozo	activo	60 m

\* punto de entrevista (enero, 2020). P(01): punto muestreado (febrero, 2021). N.I.: no informado.



## Sistema de Aducción

Como forma de enfrentar la emergencia hídrica, en el año 2010 se constituyó la **Asociación Gremial de Servicios de APR del Río Petorca** para crear un sistema que permitiera conducir agua desde los pozos del sector de Río Tinto hacia las localidades sin agua (Fig. 11). El presidente de la Asociación, el Sr. Claudio Martínez, indica que *“el Sistema de Aducción de Hierro Viejo es un sistema comunitario de tuberías, con 33 km de longitud y 160 mm de diámetro, que abastece a 10 APRs que se encuentran con sus pozos secos, llegando a 1906 familias”*. Esta iniciativa fue propuesta por dirigentes de diversas agrupaciones de APRs a la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), organismo que apoyó la implementación del proyecto. La Asociación cuenta con 4 pozos que se han ido incorporando al sistema de aducción a medida que se van secando los pozos; actualmente, los pozos que se encuentran operativos son los de Río Tinto y El Peñón, con una profundidad de 18 y 120 m, respectivamente. Sin embargo, con base en el sostenido abatimiento de los niveles del agua en el pozo El Peñón, el Sr. Claudio asegura que es probable su pronto agotamiento (comunicación el 23.09.2021). El agua cruda<sup>20</sup> es almacenada en un estanque de acumulación de 250 m<sup>3</sup> en el Peñón, desde el cual se distribuye aguas abajo hasta el sector de Artificio (comuna de Cabildo). Cada APR conectada al sistema de aducción se encarga de potabilizar el agua en sus respectivas plantas de potabilización.

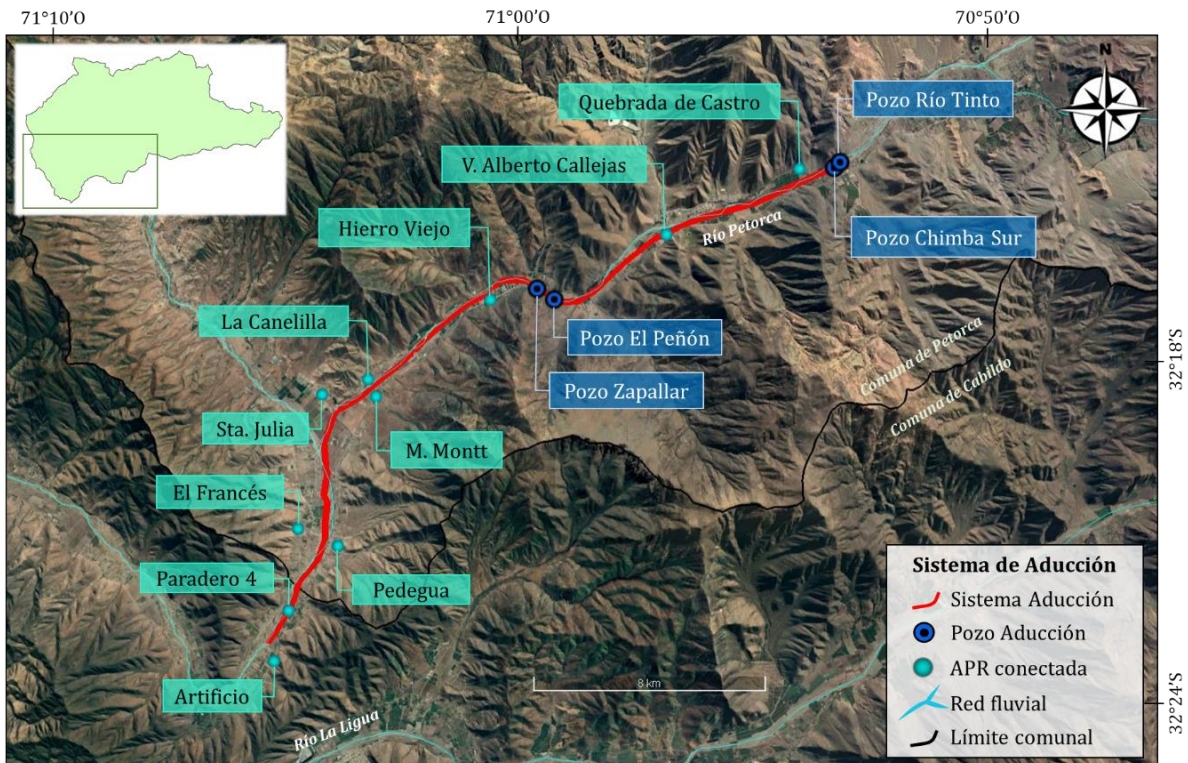


Fig. 11. Sistema de Aducción que abastece de agua subterránea a 10 comités y cooperativas de APR en las comunas de Petorca y Cabildo. Modificado de archivo KMZ proporcionado por el Sr. Claudio Martínez (presidente de la Asociación Gremial de Servicios de APR del Río Petorca).

<sup>20</sup> Agua cruda: agua que no ha pasado por procesos de potabilización.

Los sistemas de APR conectados a este servicio son: Quebrada de Castro, Hierro Viejo, La Canelilla, Manuel Montt, Santa Julia, Pedegua, El Francés, Villa Alberto Callejas, Paradero 4 y Artificio (el último perteneciente a la comuna de Cabildo). El Sr. Claudio agrega que “*a futuro se desea extender el alcance de la aducción 18 km hacia el Este y 1 km hacia el Oeste*”.

### **C. Actores involucrados en el modelo hidrosocial de Petorca**

Existen numerosas entidades que participan en la administración y gestión del agua en Petorca (más detalles en sección 3.4.2B). A continuación se indican aquellas mencionadas por los informantes que participaron en este estudio (Fig. 12), distinguiendo los Órganos Centralizados (órganos de la Administración del Estado) y los Órganos Descentralizados (organizaciones de usuarios, como las Asociaciones de Canalistas, las Comunidades de Agua y Juntas de Vigilancia) (Vergara, 2010).

#### **Órganos Centralizados:**

**Dirección General de Aguas (DGA):** primer órgano central de la Administración del Estado, dependiente del Ministerio de Obras Públicas (MOP), cuya principal función es la administración del agua (los detalles de sus funciones fueron descritas en la sección 3.3.1.A).

**Dirección de Obras Hidráulicas (DOH):** unidad del MOP cuya función es la planificación y ejecución de proyectos hídricos, incluyendo la construcción directa o indirecta (por medio de concesiones) de infraestructura hídrica.

**Comisión Nacional de Riego (CNR):** servicio del Ministerio de Agricultura que elabora las políticas y programas de riego para el sector agrícola del país (ejemplo: Política Nacional de Riego y Drenaje, Programa de Fomento al Riego, etc.). Está conformada por un Consejo de Ministros (de Agricultura, de Economía, Fomento y Reconstrucción, de Hacienda, de Obras Públicas, y de Planificación), que coordina las instituciones involucradas en riego y drenaje, y una Secretaría Ejecutiva, que lleva a cabo estudios y proyectos hídricos. La CNR busca asegurar el incremento y mejoramiento de la superficie regada del país, mediante la administración de la Ley N° 18.450 que permite al sector privado obtener subsidios para acceder a infraestructura y sistemas de riego tecnificado.

**Oficina de Asuntos Hídricos (OAS):** perteneciente a la I. Municipalidad de Petorca, fue creada en 2016 por el trabajo conjunto del municipio, la Unión de APRs de la cuenca del Río Petorca y la Universidad de Playa Ancha. La OAS tiene el rol de coordinar e integrar las políticas públicas en materia territorial y de agua, promover la participación comunitaria y elaborar normas y programas orientados a asegurar el acceso al agua de los habitantes de la comuna, y contribuir a la seguridad hídrica a partir de una visión integrada del territorio.

**Órganos Descentralizados:** Las organizaciones de usuarios están reguladas por el Artículo 257 del Código de Aguas, que establece que si dos o más usuarios de agua se benefician de la

misma fuente de agua (ya sea superficial o subterránea), podrán formar una organización con el fin de extraer y repartir el agua entre los titulares de derechos, y construir obras de captación y drenaje para su aprovechamiento.

**Juntas de Vigilancia:** organizaciones que administran y distribuyen el agua de una misma cuenca hidrográfica, sobre la cual tienen derecho sus miembros. Sus competencias y poderes jurídicos se refieren al agua como un bien público regulado en forma especial por el Código de Aguas. Además, cumplen funciones de vigilancia y sanción, y de colaboración con la DGA en la gestión de redes de monitoreo del agua.

**Asociaciones de Canalistas:** organizaciones constituidas por titulares que utilizan una misma obra de captación y conducción, como cauces artificiales o embalses.

**Comunidades de Aguas Subterráneas (CASUB):** organización en torno a un acuífero o Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común (SHAC), formada por todos aquellos titulares de derechos de agua subterránea (APRs, agrícolas, empresas sanitarias, etc.). Las CASUB tienen la potestad de controlar y fiscalizar las extracciones de agua.

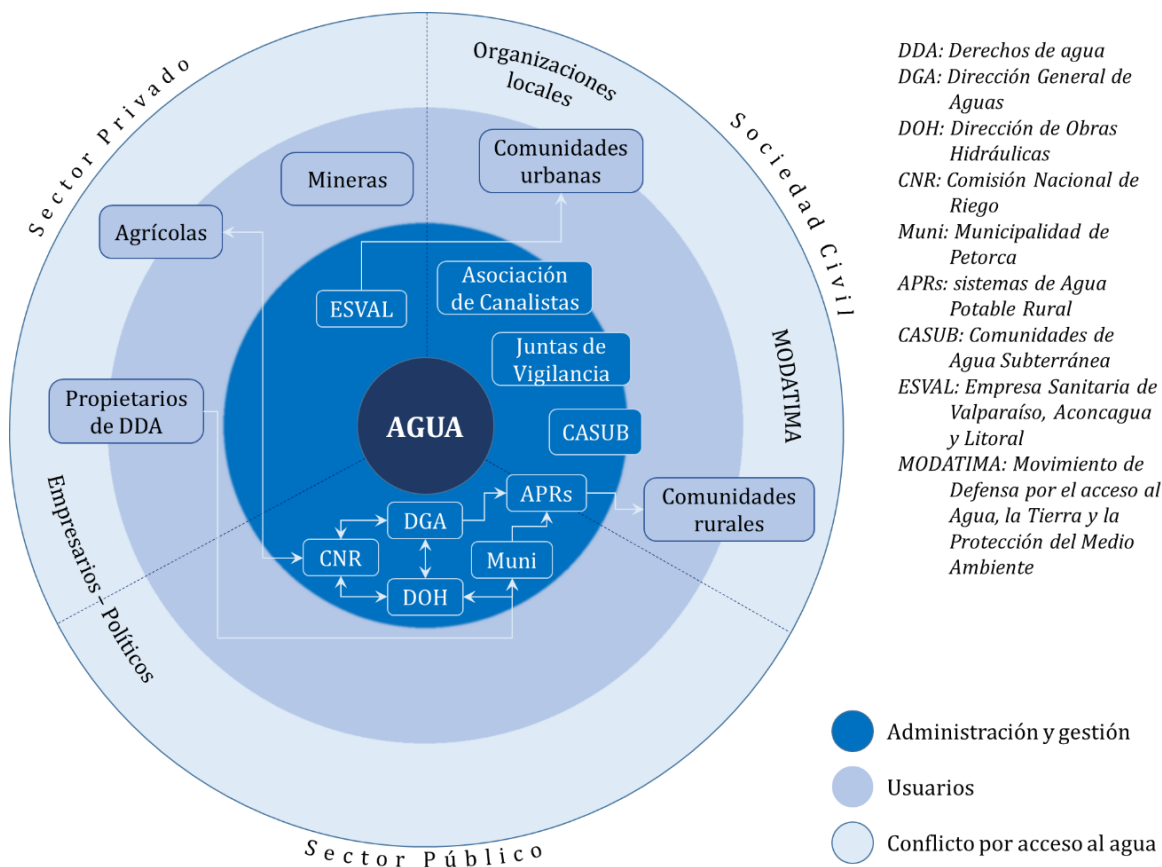


Fig. 12. Mapa de actores del sistema hidrosocial de la Comuna de Petorca, elaborado a partir de la información recabada en campo (enero, 2020).

### 3.3.2. IDENTIFICACIÓN DE FACTORES DE AFECTACIÓN AL AGUA SUBTERRÁNEA PERCIBIDAS POR LA COMUNIDAD

A continuación se detalla (en orden de importancia) la información recabada mediante entrevistas y cartografía participativa (enero, 2020), respecto a los factores que pueden afectar al agua subterránea, en su **calidad** y **cantidad**, percibidas por los informantes de este estudio:

**1. Monocultivos Agrícolas:** instalados en el Valle de Petorca desde la década del 90 para la producción en masa de paltas (aguacates) de exportación, y en menor grado cítricos y nogales. Algunos de los accionistas mayoritarios de estas empresas son actores políticos que han tenido cargos de gran poder, como diputados, senadores y gobernadores. La distribución de estas plantaciones se muestra en la Fig. 8. Las empresas agrícolas de aguacate son indicados por los participantes como el factor principal del conflicto por el acceso al agua debido a los siguientes motivos:

- A pesar de que Petorca pertenece a la categoría de “excluido y con limitaciones severas” para el cultivo de aguacate, según las condiciones climáticas de la zona (CIREN, 2011), el Valle de Petorca es uno de los principales productores de este fruto en Chile, considerado el segundo país con mayor producción de aguacate en el mundo, después de México.
- Estas empresas agrícolas poseen, en conjunto, alrededor del 47% de los derechos de extracción de agua de la cuenca (y aún falta considerar un tercio de las inscripciones que no declaran los caudales extraídos; Bujes, 2015), acaparando el agua en grandes piscinas de acumulación en la parte alta y media de la cuenca. Es de notar que estas prácticas implican pérdidas innecesarias de agua por evaporación directa. Además, los informantes manifestaron sistemáticamente que estas empresas extraen un caudal mayor al otorgado por la DGA, y han construido numerosos pozos y drenes ilegales (Fig. 13) que desvían agua -que no es de su propiedad- hacia sus estanques acumuladores. Esta usurpación de agua ha sido denunciada innumerables veces por organizaciones como MODATIMA y el INDH, con muy pocas consecuencias para los usurpadores (Ej: multas, destrucción de tubería ilegal en Río Petorca de la agrícola El Peñón de Zapallar<sup>21</sup>). En cambio, las represalias para los denunciadores han sido devastadoras: denuncias judiciales, hostigamientos, agresiones y amenazas de muerte. Es parte de la criminalización de la lucha por el derecho al agua que han denunciado varios activistas en la Provincia de Petorca (Ej: Mundaca, 2014; entrevista de Briones y Fattori, 2021<sup>22</sup>).
- Las grandes agrícolas tienen la capacidad técnica y económica para una adecuada infraestructura hídrica y de alcanzar flujos de agua subterránea más profundos (los niveles más someros, a los cuales pueden acceder los pobladores, están agotados).

---

<sup>21</sup> Noticia publicada en el noticiero El Desconcierto (04/02/2019), consultada el 09/03/2020 en: <https://www.eldesconcierto.cl/nacional/2019/02/04/desmantelan-tuberia-ilegal-que-robaba-agua-en-petorca-para-empresa-productora-de-paltas.html>

<sup>22</sup> Entrevista publicada en Doble Espacio (revista de la Escuela de Periodismo, Universidad de Chile) en junio de 2021. Consultada el 09/03/2020 en: <http://www.doble-espacio.uchile.cl/2021/07/09/ser-mujer-y-vivir-en-petorca-significa-no-poder-ir-al-colegio-o-a-trabajar-porque-estas-con-la-menstruacion-y-no-tienen-agua/>

- Utilizan agroquímicos tóxicos para salud, que se pueden infiltrar en el suelo y contaminar el agua subterránea.
- Los monocultivos de aguacate han desplazado a parte de la vegetación nativa de la zona, adaptada a las condiciones climáticas locales con un bajo consumo de agua. En cambio, los aguacates (especie introducida) tienen un requerimiento de agua significativamente mayor (100-200 l/día/árbol, según informantes). Por otro lado, las grandes agrícolas han ocupado no sólo las laderas de cerros sino que también la caja o fondo de los ríos (teóricamente, de propiedad pública) que se encuentran completamente secos. Esto promueve la degradación y erosión del suelo, que ya presentaba un limitado desarrollo previo a la llegada del agronegocio, y contribuye negativamente a la incrementar la aridez del clima a escala local.

**B. Jales (relaves) y desechos mineros:** en la comuna existe pequeña minería de Cu-Au, y muchos pirquenes<sup>23</sup> de extracción artesanal se encuentran abandonados, junto con jales (relaves) y otros desechos y artefactos mineros que carecen de un manejo adecuado. En la Fig. 16 se muestra la distribución de relaves en la comuna. Estos depósitos tóxicos se encuentran muy cerca de sistemas de drenaje superficial, pozos noria (privados y de APRs) y plantaciones (Fig. 17), completamente expuestos a la acción del viento y agua, lo que representa un evidente factor de contaminación. De hecho, recientemente (22.08.2021) ocurrió un desborde de un relave en el sector de Los Comunes, alcanzando terrenos agrícolas y habitacionales, por lo que el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) decretó el cierre temporal de la faena<sup>24</sup>. Sin embargo, esto no garantiza la recuperación de los suelos y agua contaminados.

**C. Aguas negras:** algunos informantes señalaron el mal manejo de aguas negras por parte de la planta de tratamiento de Esva (empresa sanitaria), que han sido vertidas sin tratamiento al lecho del Río Petorca. Evidencia de ello ha sido presentada por el colectivo de comunicación popular El Choclo<sup>25</sup>, mostrando imágenes de agua contaminada escurriendo cerca del pozo de APR de La Polcura y de los pozos que abastecen de agua a las plantaciones de aguacate y cítricos de exportación del empresario Gazmuri (Fig. 14).

**D. Vertedero:** en el sector de Chincolco se encuentra el vertedero municipal, el cual recibe los desechos domiciliarios de toda la comuna de Petorca desde hace 30 años. Este vertedero representa un serio problema para el poblado que se encuentra a 400 m, ya que posee algunas irregularidades en cuanto al manejo de los desechos depositados. Por ejemplo, está emplazado en un sistema de quebradas que avanan hacia el poblado, y el vertedero no está impermeabilizado, por lo que fácilmente los líquidos o lixiviados percolados pueden contaminar el agua subterránea. El Geólogo Vladimir Vicencio (2017) elaboró un informe

---

<sup>23</sup> Pirquén (del mapudungun “pilquén” = trapos): Modo de explotación de una mina que consiste en que el minero trabaja de forma independiente, generalmente con escasos medios (RAE, 2022).

<sup>24</sup> Noticia publicada el 27/08/2021 en Noticiero SoyQuilota, consultada el 09/12/2021 en: <https://www.soychile.cl/Quillota/Sociedad/2021/08/27/720534/derrame-relave-minero-petorca.aspx>

<sup>25</sup> El Choclo, comunicación popular: colectivo del Valle de Petorca enfocado en difundir las experiencias, luchas y reflexiones surgidas de las organizaciones territoriales. Link: [https://www.facebook.com/elchoclocp/videos/1316459168496702/?\\_so\\_=channel\\_tab&\\_rv\\_=all\\_videos\\_card](https://www.facebook.com/elchoclocp/videos/1316459168496702/?_so_=channel_tab&_rv_=all_videos_card)



preliminar sobre este caso, confirmando la sospecha de los vecinos del sector sobre la amenaza que este vertedero representa para la salud de la población (Fig. 15).

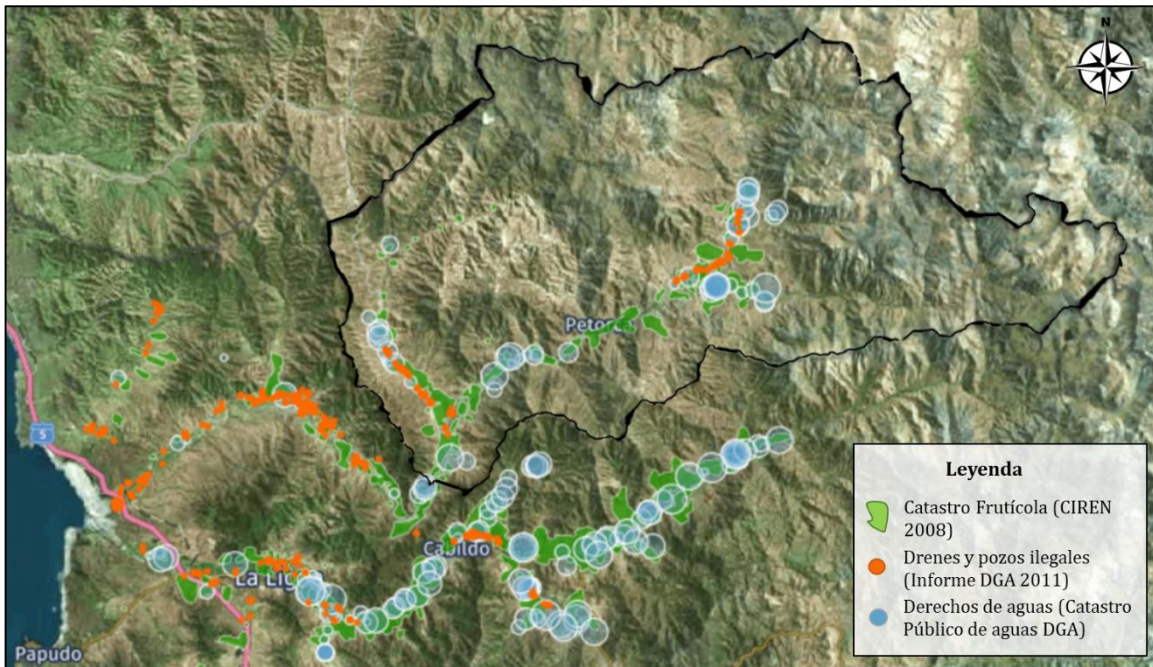


Fig. 13. Distribución de los derechos de agua asociados a empresas agrícolas, junto a drenes y pozos ilegales catastrados por la DGA en el 2011, en los valles del Río Petorca y Río La Ligua. La comuna de Petorca es delimitada por el polígono negro. Fuente: Plataforma de conflictos Socio-ambientales: Conflicto por el agua Provincia de Petorca (carto.com).



Fig. 14. Desecho de aguas negras al Río Petorca. Publicado por el medio El Choclo (febrero, 2019): [https://www.facebook.com/elchoclocp/videos/1316459168496702/?\\_so\\_=channel\\_tab&\\_rv\\_=all\\_videos\\_card](https://www.facebook.com/elchoclocp/videos/1316459168496702/?_so_=channel_tab&_rv_=all_videos_card)



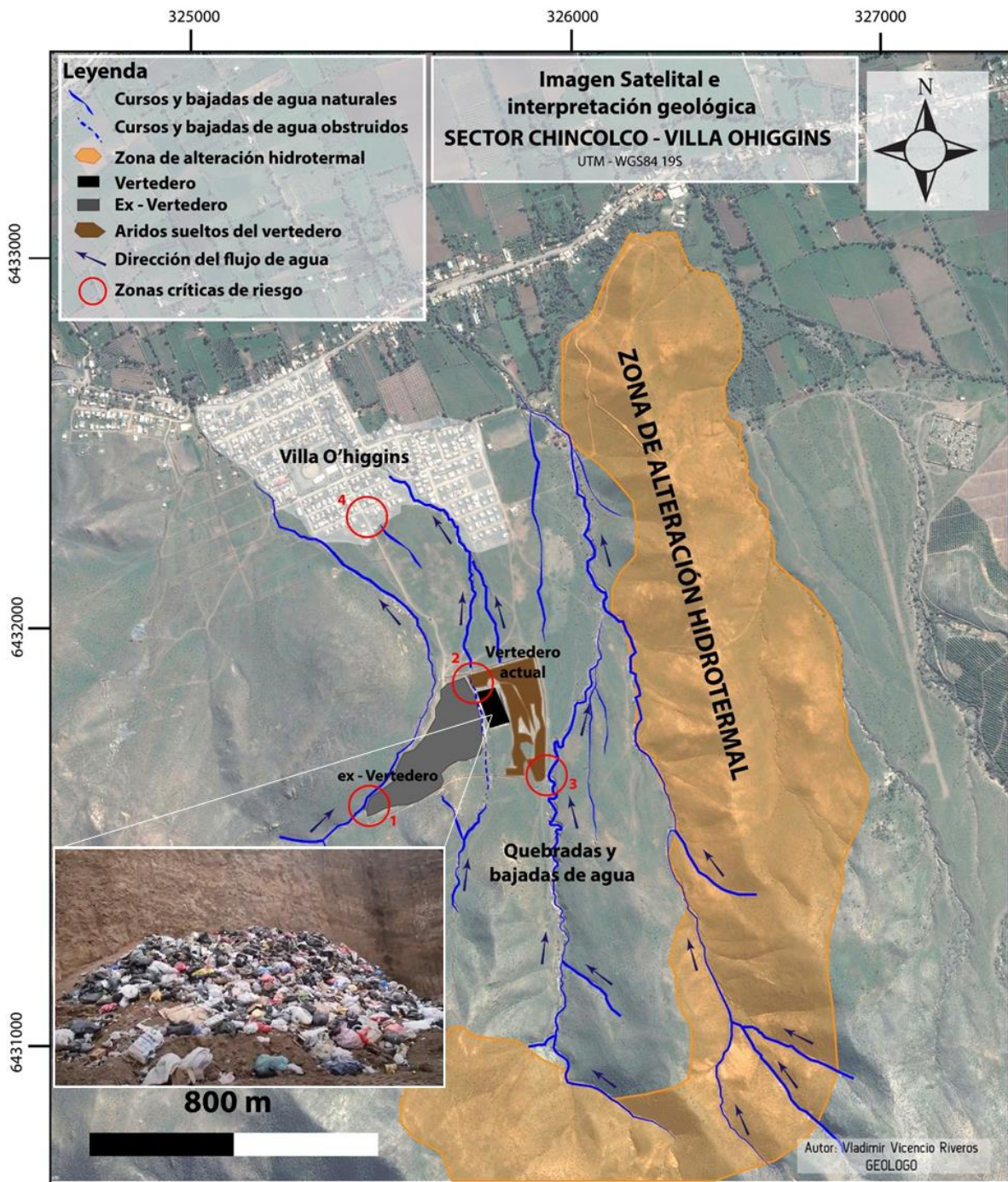


Fig. 15. Imagen satelital indicando la ubicación del vertedero de Chincolco, próximo a la Villa O'Higgins, y la red de avenamiento que se ve interrumpida por el vertedero. Tomado de V. Vicencio (2017). Además, se muestra una imagen del interior del vertedero, tomada del video "Las acciones de la comunidad de Chincolco ante el basural" (<https://www.youtube.com/watch?v=ez-3W3F9kxA&t=9s>).



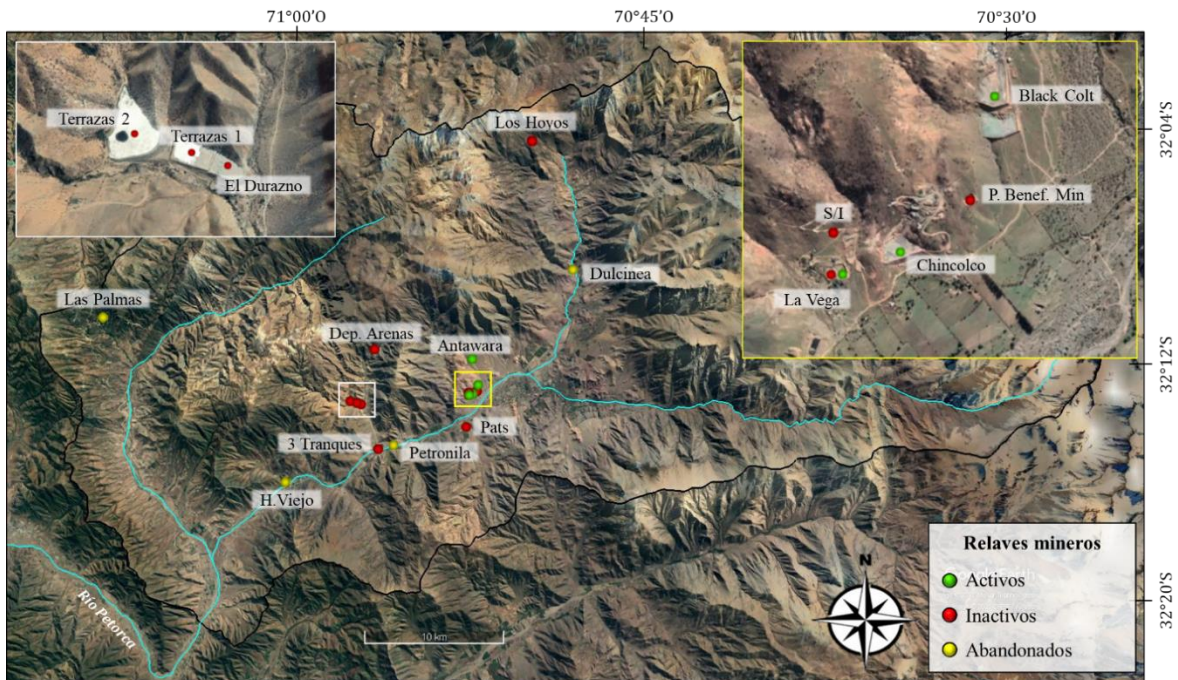


Fig. 16. Ubicación de relaves (jales) mineros en la Comuna de Petorca (detalles en Anexo 6). Fuente: Catastro de Depósitos de Relaves en Chile 2019 (versión Google Earth). Recuperado de <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>.



Fig. 17. Relave (jale) de la mina abandonada Dulcinea, próxima a las plantaciones de paltos (aguacate) en el valle del Río Pedernal. Fotografía tomada por Vladimir Vicencio (enero, 2020).

### 3.4. CONSTRUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD HÍDRICA EN PETORCA

El concepto de vulnerabilidad fue propuesto por el hidrogeólogo francés J. Margat (1968) para referirse a diferentes grados de propensión del agua subterránea a ser afectada por agentes contaminantes. Actualmente, este término tiene diferentes connotaciones dependiendo del campo y enfoque de estudio; sin embargo, se define siempre en relación con alguna forma de amenaza (natural o antrópica) o con una determinada pérdida (de recursos económicos, de derechos, de salud, de la vida, etc.; Alwang *et al.*, 2001), y se refiere a las condiciones previas a un determinado evento de afectación (susceptibilidad) y a la forma de enfrentar tal evento (capacidad de ajuste o adaptación) (Ruiz, 2012). La vulnerabilidad puede entenderse como el grado en el cual un sistema, persona o grupo humano es susceptible o está expuesto a los efectos adversos de un cierto fenómeno o amenaza o perturbación, y su capacidad de anticipar, lidiar, resistir y recuperarse del impacto de un evento adverso (Birkmann, 2013).

La vulnerabilidad está presente independientemente del tipo o fuente de peligro/amenaza, es una condición preexistente o una propiedad inherente de las comunidades. El factor más importante que determina el grado de impacto de un peligro/amenaza es la **vulnerabilidad social**, entendida como el conjunto de características de una población que influyen la capacidad de una comunidad de prepararse o responder o recuperarse de algún peligro o desastre (Cutter *et al.*, 2009). Finalmente, lo que determina esta capacidad es resultado de una serie de factores sociales que generan escenarios de exclusión o desigualdad para acceder a satisfactores, que se refieren a *“los estándares mínimos generalizables, en cuya ausencia se genera la privación de una necesidad humana fundamental”* (Ruiz, 2012: 68). Los factores que determinan la vulnerabilidad social se relacionan con el nivel socioeconómico, género, raza, edad, educación, crecimiento poblacional, acceso a servicios, dependencia social, entre otros (Cutter *et al.*, 2009).

Los desastres, ya sean catastróficos (repentinos; ejemplo: huracanes, inundaciones) o crónicos (ejemplo: disminución sostenida de precipitaciones, aumento del nivel del mar), se generan a partir de la interacción entre amenaza (componente físico o natural) y vulnerabilidad (componente social) (Ruiz, 2012). Cabe mencionar que, en virtud de la imposibilidad de controlar la existencia de una determinada amenaza o peligro, las sociedades sólo pueden manejar el riesgo de desastres<sup>26</sup> a través de la disminución de la vulnerabilidad a dicha amenaza (Wisner *et al.*, 2004), es decir, trabajando sobre los factores sociales que promueven la exposición a cierta amenaza y que limitan las capacidades de sobrellevar el daño.

La vulnerabilidad de un grupo humano a desastres relacionados con la privación del agua o la afectación de sus fuentes de agua, se construye durante varias décadas (en forma crónica) a partir de la conjunción de varios elementos, los cuales serán analizados para el caso de Petorca a lo largo del presente capítulo.

---

<sup>26</sup> Riesgo de desastre (daño) = (Amenaza o Peligro) x Vulnerabilidad (Wisner *et al.*, 2004).

### 3.4.1. VULNERABILIDAD HÍDRICA Y CONCEPTOS RELACIONADOS

La **vulnerabilidad hídrica** corrientemente se asocia con la exposición de determinadas fuentes de agua a ser contaminadas, disminuidas o agotadas, sobre todo por fenómenos hidrometeorológicos. Sin embargo, este capítulo está destinado a analizar la vulnerabilidad hídrica desde una perspectiva social, es decir, la vulnerabilidad de un grupo humano a la privación de agua, en suficiente cantidad y adecuada calidad (que equivocadamente se asocia con “escasez de agua” por falta de precipitaciones). Se buscará responder ¿cuáles son los componentes sociales que controlan el acceso al agua de los habitantes de Petorca?

Según el estándar mínimo internacional indicado por la Organización Mundial de la Salud, se considera que una persona es vulnerable en el aspecto hídrico cuando dispone de un volumen de agua inferior a 20 litros al día. Este organismo además señala que 50 l/día/persona es una cantidad razonable para hidratación y saneamiento (OMS, 2003). No obstante, un consumo óptimo de agua implica cubrir necesidades básicas como la hidratación, preparación de alimentos, saneamiento e higiene personal, lo cual se alcanza con 100 a 200 litros diarios de agua por persona (Gleick, 1996). Es de notar que esta cantidad deja fuera a los requerimientos de agua para el desarrollo de actividades de subsistencia familiar, como la pequeña ganadería y agricultura, que caracterizan a una población rural como la de Petorca.

Urquiza y Cadenas (2015) abordan el concepto de vulnerabilidad hídrica desde una perspectiva de la teoría de sistemas, y lo definen como *“las limitaciones de un sistema para enfrentar una amenaza o desastre relacionado con “escasez de agua”, contaminación del “recurso disponible” o dificultades de acceso al “recurso”, junto con las modificaciones negativas que puede sufrir el sistema frente a este tipo de afectaciones, tanto durante como después de la amenaza o daño”*. Estos autores también abordan el concepto de: (a) **Escasez hídrica socialmente construida** (Mehta, 2007): serie de condiciones socioculturales que afectan la capacidad de control y la potencialidad de recuperación de un determinado grupo social frente a una amenaza externa, al margen de las condiciones biofísicas. (b) **Adaptación hídrica**: atributo de un sistema que le permite responder de manera positiva frente a una **perturbación** del recurso hídrico. (c) **Gobernanza hídrica**: capacidad que alcanza un sistema de modificarse a sí mismo, manejar su propia **resiliencia** y mejorar sus condiciones para enfrentar futuras perturbaciones.

Estos conceptos pueden ser cuestionados por varios aspectos, si lo que se busca es garantizar el acceso universal al agua. Lo primero que llama la atención es utilizar **“recurso hídrico”** como sinónimo de agua, ya que recurso se define como el *“conjunto de elementos disponibles para resolver una necesidad o llevar a cabo una empresa”* (RAE, 2021); recurso hídrico son los *“recursos disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un período de tiempo apropiados para satisfacer una demanda identificable”* (WMO-UNESCO, 2012). Cabe aclarar que **“demanda (de agua)”** se refiere a las *“cantidades de agua previstas para su distribución a los usuarios en períodos de tiempo determinados para usos específicos y a un precio dado”* (WMO-UNESCO, 2012). Además, el término **escasez hídrica**, que generalmente se utiliza para hacer alusión a la falta física de agua, resulta de la ecuación de

**oferta vs demanda**, cuando la oferta es superada por la demanda de agua (más detalle en sección 3.4.2). A través de la supuesta “escasez hídrica” se ha logrado convencer a gran parte de la sociedad de que “hay poca agua”, y con ello se legitima el aumento de su precio. Es evidente que todos estos conceptos tienen su origen en el campo económico, y reproducen la concepción del agua como una mercancía a merced de las leyes del mercado.

Por otro lado, el concepto “**perturbación**” se define como el acto de modificar y alterar el estado, orden o quietud de una cosa o ser, enfatizando cierta inestabilidad del estado que se considera como óptimo o normal. En la teoría de sistemas complejos, las fluctuaciones o perturbaciones son los cambios que se presentan en los procesos de estructuraciones y destructuraciones de un sistema (Soto, 2015). Mientras que “**resiliencia**” es la capacidad de un sistema de absorber perturbaciones y reorganizarse, para mantener su estructura, función e identidad (Folke, 2006). El término resiliencia proviene del latín *resilio* que significa “saltar hacia atrás, rebotar, quedar como estaba”, y fue introducido en el campo de la ecología por Crawford Holling en 1973 para referirse a la “medida de la persistencia de los sistemas y de su capacidad para absorber cambios y perturbaciones y aun así mantener las mismas relaciones entre poblaciones o variables de estado” (Holling, 1973:14). Luego, el concepto fue extrapolado a la psicología para referirse a la capacidad de las personas de sobreponerse a situaciones adversas y contextos de riesgo (Kotliarenco *et al.*, 1997); y a los sistemas socio-ecológicos para explicar la interacción entre ambiente y sociedad, entendiéndose como la elasticidad de un sistema, lo que “*implica que el estado normal o funcional del sistema es el estado deseable al que hay que retornar después de un evento crítico de desastre, el cual se conceptualiza como una perturbación*” (Ruiz, 2012). Sin embargo, tal como advierte Ruiz (2012), muchas veces la normalidad no es éticamente adecuada, y en el ámbito de la vulnerabilidad, ésta no se genera por la presencia de perturbaciones (ambientales), sino que por causas crónicas (sociales), por lo que se debe cuidar la base teórica de este concepto y las implicancias de su aplicación en los sistemas sociales. Es decir, esta capacidad de elasticidad puede ser utilizada para promover la flexibilidad o adaptabilidad de una población a condiciones de vida inapropiadas, disfrazadas de “normalidad”, lo cual no resuelve el problema de fondo: desigualdad social en el acceso a satisfactores o estándares mínimos para atender una necesidad humana fundamental, en este caso, el acceso de una población al agua.

Ávila utiliza un concepto más amplio, la **vulnerabilidad socioambiental**, que define como “*el proceso que conlleva a situaciones críticas e irreversibles en torno a la calidad y cantidad de los recursos hídricos que ponen en riesgo el desarrollo humano y el funcionamiento de los ecosistemas*” (Ávila, 2008: 48). La autora señala que la vulnerabilidad socioambiental puede servir como indicador de otro concepto relacionado, la **seguridad hídrica**, entre las cuales existe una relación inversa: mientras mayor sea la vulnerabilidad socioambiental, menor será la seguridad hídrica. Cabe mencionar que el término “seguridad hídrica” fue erradamente traducido del inglés “*water security*”, por lo que su significado original es “seguridad del agua”, lo cual no debe confundirse con seguridad de *algo* “*perteneciente o relativo al agua*”, que es el significado de “hídrico/a” (RAE, 2021). Este concepto es entendido por las Naciones Unidas como la “*capacidad de una población para salvaguardar el acceso sostenible a cantidades*



*adecuadas de agua de calidad aceptable para mantener los medios de vida, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, para garantizar la protección contra la contaminación del agua y los desastres relacionados con el agua y para preservar ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política" (United Nations, 2013).*

Stevens (2012) menciona algunos indicadores de la vulnerabilidad socioambiental como: A) **Disponibilidad de agua:** volumen de agua (superficial y subterránea) potencialmente aprovechable respecto al total de la población (disponibilidad per cápita). B) **Estrés hídrico:** relación entre disponibilidad de agua y el agua requerida para los diversos usos humanos (consumo humano, agrícola, industrial). C) **Explotación del agua subterránea:** relación entre la tasa de extracción de agua subterránea y la tasa de recarga, para una determinada unidad acuífera. D) **Marginación social:** condición que impide a cierta fracción de la población satisfacer necesidades básicas (alimentación, abastecimiento de agua potable, vivienda, educación, servicios de salud, etc.). E) **Demanda hídrica:** relación entre disponibilidad de agua y tasa de crecimiento demográfico. Es de notar que en México, la autoridad del agua (CONAGUA) ha definido Demanda como la *"cantidad de agua requerida en las tomas para consumo de una localidad o área de proyecto, considerando los diferentes usuarios (domésticos, comerciales, industriales, turísticos, entre otros) que ahí tienen lugar, más las pérdidas físicas del sistema"*<sup>27</sup>. Por otro lado, la definición de estrés hídrico resulta semejante a la de escasez hídrica; sin embargo, la condición de *escasez* se adquiere cuando el *estrés hídrico* (presión de las actividades humanas sobre el agua *disponible*) supera el 25% (FAO, 2018).

En estas definiciones se sigue observando el uso de conceptos que mercantilizan el agua, pero ahora es preciso cuestionar las metodologías utilizadas para determinar los indicadores mencionados (disponibilidad de agua, estrés hídrico, explotación de agua subterránea y demanda hídrica). Todos ellos incluyen en su ecuación la cantidad de agua que se encuentra en el medio natural, y específicamente para el agua subterránea (cuya cantidad sobrepasa con creces al agua superficial) el volumen se estima a partir de parámetros que no se miden, sino que se estiman mediante ecuaciones cuyos supuestos están errados, tal como lo argumentan Carrillo-Rivera *et al.* (2016). Realmente no se cuenta con datos precisos para estimar la cantidad de agua que se encuentra en el subsuelo ni la cantidad de agua extraída (¿cómo cuantificar los pozos que operan de forma informal o ilegal?), y/o no se considera el sistema hidrogeológico completo, sino sólo su parte más superficial, y los límites de las unidades de estudio ("acuíferos") están definidos por criterios políticos-administrativos (no hidrogeológicos) que conllevan a resultados y modelos muy alejados de la realidad. Este cuestionamiento será argumentado con más detalles en la sección 6.2, pero en el fondo la **"disponibilidad de agua"** puede ser fácilmente manipulada bajo el marco teórico y metodológico con el que se estima. Cabe mencionar que ninguno de estos conceptos se hayan definidos en el Código de Aguas que rige la administración y gestión del agua en Chile, lo que conlleva a ambigüedades y a un mal uso de ellos.

---

<sup>27</sup> Recuperado de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>

Teniendo presente estos cuestionamientos, la Fig. 18 muestra una síntesis de los elementos sociales que construyen un espacio de vulnerabilidad y de no vulnerabilidad hídrica. Ambos espacios se encuentran separados por un umbral que distingue condiciones sociales, políticas y económicas asociadas al bienestar colectivo respecto al uso y goce del agua, los cuales pueden servir como parámetros de evaluación de este tipo de vulnerabilidad. A primera vista, muchos de los elementos del espacio de vulnerabilidad forman parte del escenario hidrosocial de Petorca, lo cual se buscará evidenciar en la siguiente sección.

UMBRAL DE VULNERABILIDAD HÍDRICA	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protección institucional/jurídica</li> <li>• Garantía del derecho humano al agua y saneamiento</li> <li>• Equidad en el acceso al agua</li> <li>• Explotación regulada del agua</li> <li>• Adecuada infraestructura hídrica</li> <li>• Sistema de monitoreo y fiscalización del agua</li> <li>• Uso eficiente del agua</li> <li>• Uso ético del agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adecuada calidad del agua</li> <li>• Conocimiento del sistema hidrológico               <ul style="list-style-type: none"> <li>- Funcionamiento, distribución</li> <li>- Reserva de Caudal Ecológico</li> <li>- Capacidad de carga de la cuenca</li> </ul> </li> <li>• Educación y cultura del agua</li> <li>• Manejo integral del agua</li> <li>• Seguridad hídrica</li> <li>• Participación ciudadana</li> </ul> <p style="text-align: right;"><i>No vulnerabilidad</i></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desprotección institucional/jurídica</li> <li>• Vulneración del derecho humano al agua y saneamiento</li> <li>• Inequidad en el acceso al agua</li> <li>• Explotación intensiva o desproporcionada del agua</li> <li>• Falta de infraestructura hídrica</li> <li>• Falta de monitoreo y fiscalización del agua</li> <li>• Uso ineficiente del agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acaparamiento del agua</li> <li>• Corrupción: negocio del agua</li> <li>• Sobreotorgamiento de concesiones extractivistas</li> <li>• Contaminación del agua</li> <li>• Desconocimiento del sistema hidrológico</li> <li>• Falta de educación y cultura del agua</li> <li>• Falta de manejo integral del agua</li> <li>• Inseguridad hídrica</li> <li>• Falta de participación ciudadana</li> </ul> <p style="text-align: right;"><i>Vulnerabilidad</i></p>

Fig. 18. Elementos sociales que construyen un espacio de vulnerabilidad y de no vulnerabilidad, en la dimensión social del agua. Sobre el umbral de vulnerabilidad (línea roja), es posible acceder a satisfactorios o estándares mínimos para atender la necesidad humana fundamental de contar con fuentes permanentes de agua, en suficiente cantidad y calidad. Basado en las clases de N. Ruiz (2020).

### 3.4.2. VULNERABILIDAD HÍDRICA EN PETORCA

La Zona Central de Chile<sup>28</sup> ha sido afectada por una secuencia ininterrumpida de sequías anuales desde el año 2010, correspondiente al evento de sequía más prolongado registrado en la región y con unos pocos análogos en el último milenio, por lo que se le ha denominado la **Megasequía de Chile** (Garreaud *et al.*, 2019). Cabe distinguir los cuatro tipos de sequía, según los efectos y parámetros considerados (Marcos, 2001): (a) **Sequía Meteorológica**: fenómeno prolongado de precipitación inferior a la media; depende de la variabilidad climática de cada lugar. (b) **Sequía Agrícola**: humedad insuficiente en el suelo que limita el crecimiento de un determinado cultivo; depende de las condiciones meteorológicas, características biológicas del cultivo y propiedades del suelo. (c) **Sequía Hidrológica**: decrecimiento del volumen del agua (superficial y subterránea) que impide satisfacer los requerimientos hídricos bajo un determinado sistema de gestión de agua. (d) **Sequía Socioeconómica**: escasez de precipitación

<sup>28</sup> El estudio de Garreaud *et al.* (2019) comprende la zona entre las latitudes 30 y 38°S.

que limita la *disponibilidad* de agua con perjuicios económicos, sociales y ambientales; la magnitud y duración del fenómeno climático es tan importante como la forma en que la economía y la sociedad desarrollan sus actividades, ya que pueden incrementar la vulnerabilidad a la escasez de precipitaciones.

En este contexto, es preciso distinguir que cualquier tipo de sequía es un fenómeno meteorológico, y se caracteriza por su carácter anómalo temporal o transitorio. En cambio, la **escasez hídrica** es una condición permanente de déficit en el suministro de agua respecto a la *demanda*, que puede resultar por un rápido y desregulado aumento de los requerimientos de agua, o por un descenso en la *disponibilidad* de agua, y/o por problemas con los sistemas de suministro de agua (Van Loon *et al.*, 2016). Un evento de sequía no debiese producir *escasez* de agua, a menos que existan deficiencias en la administración y gestión del agua. Pueden acabarse o no existir fuentes de agua superficiales (como en las zonas desérticas del mundo) pero siguen estando presente las fuentes subterráneas, que de hecho constituyen las mayores reservas de agua dulce del planeta. El problema de fondo no es la sequía, sino la gestión del agua. Por tanto, cuando se habla de **escasez de agua**, en realidad se trata de: (a) un desconocimiento del sistema hidrogeológico, (b) una carencia de infraestructura, tecnología y técnicas adecuadas para la extracción y abastecimiento óptimo del agua y (c) falta de un marco político-jurídico que regule el uso y reparto justo del agua, garantizando el derecho humano al agua y saneamiento y el mantenimiento de los ecosistemas.

Como en muchas comunas del país, Petorca no cuenta con políticas de planificación territorial ni un modelo de gestión del agua que considere anomalías climáticas transitorias, menos cuenta con un entendimiento acabado del funcionamiento del agua subterránea. Las medidas de las autoridades frente a la crisis hídrica han sido más reactivas que preventivas, y en numerosas ocasiones se ha declarado a la comuna en “emergencia agrícola por déficit hídrico” y como “zona de catástrofe por sequía”. Si bien estos decretos permiten agilizar medidas excepcionales y el aporte de recursos públicos para las tareas de auxilio (reparto de agua con camiones aljibes, entrega de forraje y otros subsidios), se trata de medidas paliativas y temporales, que no atienden las causas del problema, profundizando los niveles de vulnerabilidad y desigualdad social de sus habitantes.

La comuna de Petorca ha transitado desde una sequía meteorológica hasta una socioeconómica, y según las proyecciones climáticas las condiciones de aridez y desertificación, probablemente se vuelvan permanentes. Sin embargo, los perjuicios asociados a la falta de precipitaciones y el agotamiento de los ríos no han afectado realmente a las empresas agrícolas de la comuna, que continúan expandiendo sus cultivos hacia las laderas de los cerros e incluso en el lecho de los ríos que se encuentran secos hace más de una década (ocupando terrenos que en teoría son de propiedad pública). Estas empresas se sirven de la extracción de agua subterránea sin ninguna restricción o control.

**¿Sequía o Saqueo?** “*NO es sequía, es saqueo*” es una de las consignas más conocidas del movimiento social que pretende recuperar el acceso al agua en Petorca. Dicha frase denuncia el



contraste entre las causas físicas y sociales de la denominada crisis hídrica: la megasequía, indicada por las autoridades para convencer a la población de que la “naturaleza” es la responsable de la “*escasez de agua*”, y por otro lado, el saqueo de agua, señalado por los petorquinos como el problema de fondo de esta crisis, que se refiere al inequitativo acceso al agua y la explotación descontrolada de agua subterránea por parte de las empresas agrícolas, en detrimento de los caudales de flujos subterráneos someros que abastecían de agua a las comunidades locales.

Estas empresas, poseedoras de la mayor parte de los derechos de agua de la comuna, acaparan el agua en las partes altas y medias de la cuenca de Petorca, extraída desde pozos profundos (> 80 m), muchos de ellos ilegales (Bolados *et al.*, 2018). Por su parte, la población, que solía abastecerse de agua a través de pozos someros (norias) y un sistema de canales desde los ríos, se fue quedando paulatinamente sin agua, siendo obligados a comprar agua embotellada y conformarse con un promedio de hasta 50 l/día/persona. El abastecimiento depende de los camiones aljibe (financiados por el municipio); sin embargo, “*si el camino está malo, no llega el agua*” (informante local, 2020). Para poner en perspectiva el problema, sólo basta con comparar este suministro de agua, cantidad apenas suficiente para hidratación e higiene personal (OMS, 2003), con el volumen disponible para un árbol de aguacate (100-200 l/día).

La cuenca del Río Petorca ha quedado seca, se han agotado ríos, muchos manantiales y los flujos de agua subterránea más someros; sólo subsisten flujos subterráneos profundos (>100 m), a los cuales sólo pueden acceder las agrícolas y entes privados. Es decir, el acceso al agua está controlado por factores políticos-económicos, vulnerando el derecho humano fundamental al agua y saneamiento de la población. Esta evidente desigualdad es consecuencia de un modelo económico y político heredado de la dictadura, y profundizado en los siguientes gobiernos “democráticos”, que agravó la vulnerabilidad social previamente existente de los habitantes de Petorca frente al déficit sostenido de precipitaciones.

**¿Cómo se ha construido la vulnerabilidad hídrica en Petorca?** En este trabajo se han identificado 6 componentes sociales de la vulnerabilidad hídrica en Petorca, que se suma a otros múltiples tipos de vulnerabilidad preexistentes: vulnerabilidad económica, social, política, institucional, entre otras (Wilches, 1993). Los componentes analizados son el aspecto jurídico, institucional, político, social, técnico-científico e infraestructura hídrica (Fig. 19).

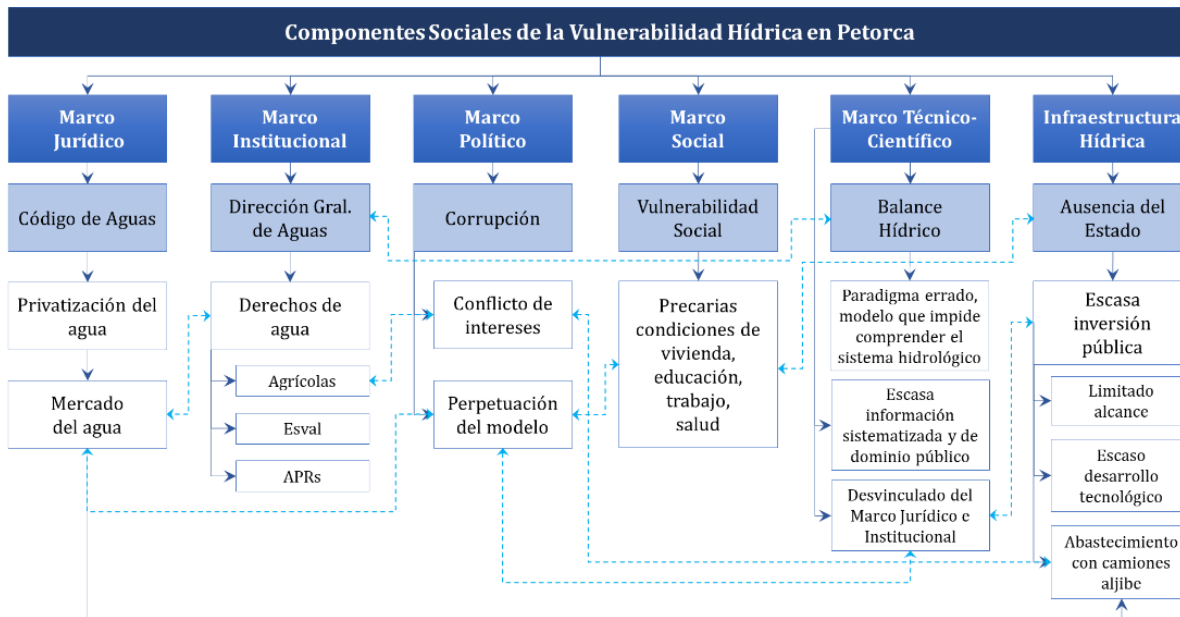


Fig. 19. Esquema que sintetiza los componentes sociales de la Vulnerabilidad Hídrica en Petorca, y la interrelación entre ellos (señalada con flechas celestes). Esval: Empresa Sanitaria de Valparaíso, Aconcagua y Litoral. APR: Agua Potable Rural (sistema comunitario de abastecimiento de agua en zonas rurales).

### A. Marco Jurídico

El modelo de administración del agua en Chile es uno de lo más privatizados y mercantilizados del mundo (Budds, 2012), considerado por muchos como el principal motor de las desigualdades y conflictos socioambientales en el país. Este modelo se sustenta en dos documentos fundamentales elaborados en dictadura (1973-1990): la **Constitución Nacional de Chile** (1980) y el **Código de Aguas** (Min. de Justicia, 1981), que consagraron la propiedad privada como un derecho central del contrato social chileno, y el derecho privado sobre el territorio para el uso del agua. A pesar de que el Código de Aguas reconoce el agua como un “bien nacional de uso público”, “se otorga a los particulares el derecho de aprovechamiento de ellas” (Artículo 5º), quedando los derechos de agua amparados por las garantías constitucionales respecto del **derecho de propiedad**: “los derechos de los particulares sobre las aguas, reconocidos o constituidos en conformidad a la ley, otorgarán a sus titulares la **propiedad sobre ellos**” (Artículo 19, Nº 24 de la Constitución Política de Chile). De esta manera, comenzó la privatización del agua, a través de la concesión de derechos de aprovechamiento, cedidos gratuitamente y a **perpetuidad**. El Código de Aguas permite la separación de la propiedad del agua del dominio de la tierra, por lo que las comunidades fueron despojadas de sus fuentes de agua aunque fueran dueñas de las tierras. Los derechos de agua se concentraron en un grupo selecto de carácter privado para fines económicos, en desmedro de su uso público y descuidando el derecho humano al agua y saneamiento de la población, y las capacidades ecológicas de las cuencas y fuentes subterráneas (Mundaca, 2014; Bolados *et al.*, 2018).

Así nació el **mercado del agua** en Chile, con un modelo de negocios muy lucrativo bajo el escenario de *escasez hídrica*: entes privados, que adquirieron derechos de agua durante la

dictadura en forma gratuita y a perpetuidad, aprovechan la crisis para vender el agua extraída por pozos (en millones de pesos chilenos cada litro/segundo; comunicación oral de informantes locales, 2020) a las empresas sanitarias de agua (ESVAL en el caso de Petorca) y a los municipios (Estado), que subsidian el reparto de esta agua a comunidades rurales aisladas, como Petorca, mediante camiones aljibe. El paradigma de la privatización del agua en Chile está tan normalizado, que no llama la atención que en la página web de la Dirección General de Aguas (autoridad del agua) es posible acceder al Mercado del Agua para la compra/venta de derechos de agua, como si se tratara de cualquier mercancía (Fig. 20).

Por otro lado, el Código de Aguas de 1981 fue diseñado preferencialmente para la regulación del agua superficial, presenta escasos pronunciamientos sobre el agua subterránea (de un total de 400 artículos, alrededor de 30 están dedicados al agua subterránea) y carece de definiciones de conceptos esenciales en la materia, lo que da espacio a importantes vacíos legales (Rivera, 2015). Ante ello, se han logrado llevar a cabo ciertas modificaciones al Código de Aguas por los gobiernos sucesores a la dictadura. Por ejemplo, en 2005, luego de una tramitación de 13 años en el Congreso, se instauraron algunas normas ambientales, como el establecimiento de un caudal ecológico mínimo como requisito para otorgar nuevos derechos de agua (Artículo 129 bis 1), o un pago de patente por el desuso de agua para desincentivar la mantención y concentración de los derechos. En 2014 se elaboró un reglamento sobre normas de exploración y explotación de aguas subterráneas (Decreto Nº 203). Sin embargo, la legislación vigente no ha sido capaz de adaptarse al escenario de sequía y *escasez hídrica* que afecta a gran parte del país. Las modificaciones hechas al Código de Aguas sólo han servido de maquillaje, la concentración de derechos y el monopolio hídrico continúan intactos (Larraín *et al.*, 2010).

En consecuencia, el marco jurídico no sólo ha entorpecido un adecuado aprovechamiento y administración del agua, sino que ha promovido un acceso inequitativo al agua.

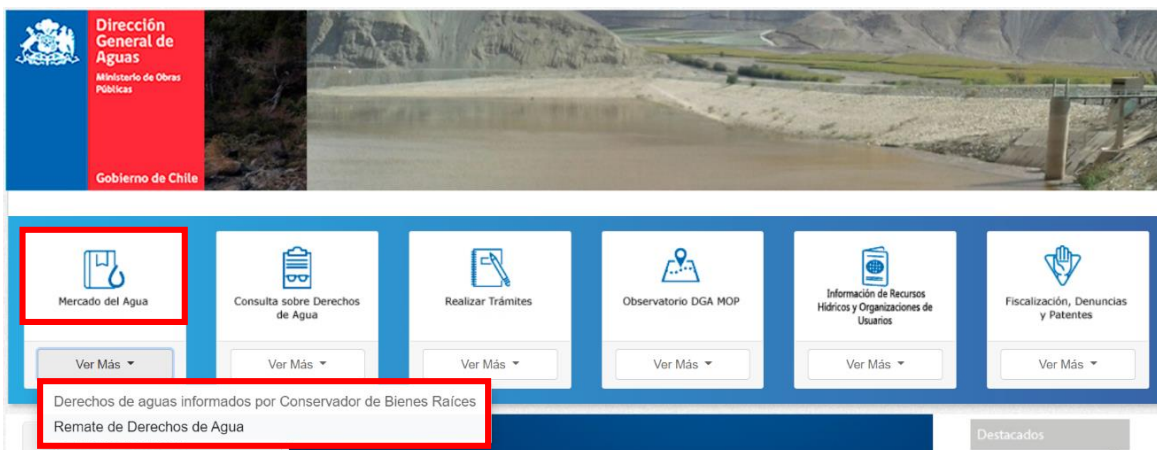


Fig. 20. Página web de la Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, destacando en recuadros rojos la sección de “Mercado del Agua” y el “Remate de Derechos de Agua”.

## B. Marco Institucional

En Chile existen 43 organismos del Estado que tienen competencias en materia hídrica, desde ministerios, gobiernos regionales, municipios, servicios públicos, corporaciones y organizaciones autónomas (Banco Mundial, 2011); algunos de ellos se indican en la Tabla 3.7. El Ministerio de Obras Públicas (MOP) ha sido históricamente la autoridad nacional del agua, a través de sus dependencias ministeriales: Dirección General de Aguas, Dirección de Obras Hidráulicas, Dirección de Riego, Dirección de Planeamiento y Departamento de Defensas Fluviales, entre otros. Además, está involucrado el Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, a través de la Comisión Nacional de Riego (CNR). Entre las instituciones con competencias en calidad del agua se cuentan el Ministerio de Medio Ambiente, el Ministerio de Salud y la Superintendencia de Servicios Sanitarios.

Tabla 3.7. Organismos estatales vinculados directamente con la gestión del agua en Chile. Tomado de Larraín et al. (2010).

Entidades	Funciones relacionadas con el Agua	Normas asociadas a las funciones descritas
<ul style="list-style-type: none"> <li>Dirección General de Aguas (DGA)</li> </ul>	Promover la gestión y administración del recurso hídrico. Fiscalización y control de la calidad del recurso en sus fuentes naturales.	Código de Aguas (Ley N° 1.122, Ministerio de Justicia) Decreto N° 1.220, Ministerio de Obras Públicas
<ul style="list-style-type: none"> <li>Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA)</li> <li>DGA,</li> <li>Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR)</li> </ul>	Protección y conservación ambiental del recurso hídrico.	Ley N° 20.417, Ministerio Secretaría General de Gobierno Ley N° 19.300, Ministerio Secretaría General de Gobierno Decreto N° 1, Ministerio de Defensa Decreto N° 90, Ministerio Secretaría General de la Presidencia Decreto N° 46, Ministerio Secretaría General de la Presidencia
<ul style="list-style-type: none"> <li>Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)</li> </ul>	Regulación de los servicios de agua potable y saneamiento.	Ley N° 18.778, Ministerio de Hacienda Decreto N° 50, Ministerio de Obras Públicas Decreto N° 195, Ministerio de Hacienda
<ul style="list-style-type: none"> <li>Comisión Nacional de Riego (CNR)</li> <li>Dirección de Obras Hidráulicas (DOH)</li> </ul>	Labores de desarrollo y fomento del riego.	Ley N° 18.450, Ministerio de Agricultura Decreto N° 7, Ministerio de Economía Decreto N° 1.123, Ministerio de Justicia Decreto N° 179, Ministerio de Economía Decreto N° 285, Ministerio de obras Públicas Decreto N° 397, Ministerio de Agricultura
<ul style="list-style-type: none"> <li>Servicio Agrícola y Ganadero (SAG),</li> <li>Servicio de Salud,</li> <li>Servicio Nacional de Pesca,</li> <li>Subsecretaría de Pesca</li> </ul>	Fiscalización y control de la calidad de las aguas para fines específicos.	Decreto N° 237, Ministerio de Bienestar Social Decreto N° 106, Ministerio de Salud Decreto N° 735, Ministerio de Salud
<ul style="list-style-type: none"> <li>SISS</li> <li>Servicios de Salud</li> </ul>	Fiscalización y control de efluentes.	

Este arreglo institucional ha generado una serie de superposición de funciones y multiplicidad de competencias, sumado a que entre ellos no existe una adecuada comunicación, coordinación ni colaboración, generando finalmente una dispersión de las funciones. De esta forma se ha permitido la promoción de numerosos proyectos de extracción de agua subterránea sin una adecuada evaluación ambiental ni planificación ambiental (Banco Mundial, 2011). Peor aún, no

existen instancias territoriales de coordinación intersectorial, ni entre los organismos públicos y privados que administran y gestionan el agua (Peña, 2003).

La **Dirección General de Aguas (DGA)** tiene la facultad de otorgar los derechos de aprovechamiento de aguas, el deber de realizar los estudios técnicos de evaluación de las fuentes de agua y de mantener un sistema de información, y las labores de fiscalización para controlar su extracción. Sin embargo, estas funciones son cumplidas en forma muy deficiente. A pesar de las condiciones de sequía presentes en la cuenca de Petorca, y aun cuando los ríos de esta cuenca habían sido declarados como agotados<sup>29</sup> en 1997 (Resolución DGA 216), la DGA continuó otorgando títulos de propiedad de agua subterránea hasta el año 2016, con volúmenes mayores que el agua supuestamente disponible para su aprovechamiento, lo que se conoce como **sobreotorgamiento de derechos de agua** (Gobierno de Chile, 2012). En la Provincia de Petorca, los derechos de agua están notablemente concentrados en el agronegocio.

Por otro lado, la DGA carece de personal calificado y de recursos financieros suficientes para llevar a cabo sus funciones, en especial la de fiscalización. No cuenta con suficiente autonomía (no existen medidas para evitar un nombramiento político-partidista o la remoción arbitraria dentro de la DAG, y su financiamiento depende directamente del presupuesto nacional), ni con la adecuada autoridad (o nivel jerárquico más alto dentro de la institucionalidad pública) ni con presencia a nivel local (Jouravlev, 2010). Los roles de la DGA se enfocan principalmente en la asignación del agua (de forma muy inequitativa), pero el resto de sus facultades quedan fuera de su competencia, dejando la resolución de conflictos en manos de las organizaciones de Usuarios de Agua o los Tribunales de Justicia (Costa, 2016).

El sobreotorgamiento de derechos de agua y la ausencia de fiscalización ha generado un desastre ecológico y social sin precedentes en la región (Mundaca, 2014; Bolados *et al.* 2018), más aún cuando la DGA no tiene la facultad de caducar o dejar sin efecto los derechos otorgados.

### **C. Marco Político**

A pesar de que las bases del modelo político-económico del país fueron impuestas en dictadura (1973-1990), los gobiernos “democráticos” subsecuentes se encargaron de profundizarlo. Muchas de las empresas y servicios estatales privatizados en dictadura, pasaron a manos de políticos-empresarios que conservaron sus puestos de poder y privilegio una vez terminado el régimen militar. Específicamente en la Provincia de Petorca, los derechos de agua están

---

<sup>29</sup> La declaración de agotamiento es un instrumento del que dispone la DGA para señalar limitaciones en la “disponibilidad” de las fuentes naturales de agua superficial por encontrarse acabadas, lo que impide la constitución de nuevos derechos de aprovechamiento de aguas superficiales de tipo consuntivo y ejercicio permanentes. Esta declaración no impide la constitución de nuevos derechos de tipo no consuntivo o consuntivo de ejercicio eventual (DGA, 2016a). Los derechos de aprovechamiento se clasifican en consuntivos y no consuntivos. Los derechos consuntivos facultan al titular a consumir totalmente las aguas en cualquier actividad. Por el contrario, los derechos no consuntivos permiten emplear el agua sin consumirla y obligan a restituirla en la forma que lo determine el acto de adquisición o de constitución del derecho (DGA, 2016b).

mayoritariamente concentrados en cuatro grupos familiares de la clase política chilena (Fig. 21), dedicados al agronegocio en la Región de Valparaíso (Bolados *et al.* 2018):

- a) Pérez-Yoma/Junemann: Edmundo Pérez Yoma (DC<sup>30</sup>; exministro de Defensa del gobierno de Eduardo Frei Ruiz-Tagle y titular del Ministerio del Interior del primer gobierno de Michelle Bachelet; ex miembro del directorio de Televisión Nacional de Chile, propietario de la Agrícola Cóndor y La Loica), y su cuñado Osvaldo Junermman Gazmuri, dueño de la Agrícola Los Graneros y ex director de Palta Hass Chile.
- b) Cerda/Álamos: Eduardo Cerda Lecaros (exdiputado DC de la Región de Valparaíso, presidió la comisión de Recursos Hídricos y Desertificación; ex alcalde de Cabildo, socio de la Agrícola Santa María de Vitahue), hijo de Eduardo Cerda García (exdiputado y exsenador por la Región de Valparaíso, ex intendente de la Región de Valparaíso, dueño de la Agrícola Pililén). Ignacio Álamos Cerda, dueño de las Sociedades Agrícolas Viento Note, San Antonia y del Silencio, es pariente de Eduardo Cerda L. y cuñado de Juan Antonio Coloma (ex presidente de la UDI<sup>31</sup>).
- c) Ruiz-Tagle: Juan Ruiz-Tagle y familiares (cercanos colaboradores y miembros de la UDI), dueños de las agrícolas Huingal y Los Ángeles.
- d) Piwonka: Alberto Piwonka Zañartu e hijo, socios de la Agrícola Pullacón (La Ligua), familia asesora de empresas que se adjudicaron fondos públicos a través de la Ley de Fomento a la Inversión Privada.

Nombre	Total Derechos Concedidos	Total Caudal Concedido (l/s)
Asociación de Canalistas Canal Chincolco	7	1.225,3
Sociedad Agrícola y Ganadera El Sobrante Limitada	3	968,3
Sociedad Agrícola Los Angeles de Cabildo Limitada	9	700,0
Agrícola Petorca S.A.	26	252,1
Sociedad Agrícola Los Graneros Limitada	28	186,9
Agrícola Altos de Polcura Ltda.	2	154,0
Agrícola Chacra San Pascual Limitada	8	135,0
Agrícola Olivos de Huaquen S.A.	14	129,3
Empresa de Obras Sanitarias De Valparaiso S.A	3	125,0
Agrícola San Juan Limitada	9	121,5
Agrícola e Inmobiliaria Los Altos De Zapallar Ltda	9	121,0
Agrícola San Lorenzo Limitada.	6	120,6
Sopraval S.A.	9	118,4
Esval S.A.	6	117,0
Agrícola Pullacon Limitada	16	111,0
Agrícola Paltuncho Ltda	45	108,0
Agrícola Cóndor Limitada	4	104,3

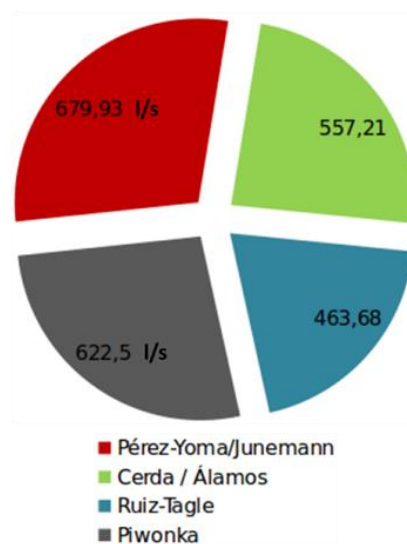


Fig. 21. Derechos de agua y caudales concedidos (2000-2009, DGA) que superan los 100 l/seg, en la Región de Valparaíso, junto con los 4 grupos familiares que concentran la mayoría de estos derechos (hasta el año 2017) para sus negocios agrícolas. Extraído de Bolados *et al.* (2018).

<sup>30</sup> DC: Democracia Cristiana, partido político de centro-derecha en Chile.

<sup>31</sup> UDI: Unión Demócrata Independiente, partido político de derecha en Chile.

A raíz de denuncias efectuadas por MODATIMA<sup>32</sup>, estos políticos-empresarios fueron fiscalizados por la DGA y procesados por la justicia chilena, acusados de usurpación de agua. En el 2011, la DGA identificó al menos 65 drenes enterrados para desviar y conducir aguas desde ríos y esteros hacia estas agrícolas (Fig. 13). Pérez-Yoma fue sancionado por usurpación de agua con la suma de \$825,260 CLP (≈ \$1,000 USD). Eduardo Cerda García, quien integraba la Comisión Investigadora de extracción ilegal de aguas y áridos en los ríos del país, resultó procesado por extraer agua subterránea desde cuatro pozos por un caudal 600% mayor al autorizado; fue multado con \$618,945 CLP (≈ \$780 USD). Osvaldo Junemann fue multado con \$825,260 CLP (≈ \$1,000 USD) por extracción no autorizada de aguas subterráneas (Arellano, 2017). Estas cifras, insignificantes frente a las ganancias mensuales de las empresas involucradas, parecen una burla para los afectados y organizaciones locales, que llevan años luchando por recuperar el agua, resistiendo a constantes amenazas de muerte y amedrentamientos (Mundaca, 2014; Cooperativa, 2022<sup>33</sup>).

Es evidente el conflicto de intereses y la corrupción creada en torno al lucrativo negocio del agua. Estos personajes han ocupado su poder político para blindar su extracción de agua y evitar a toda costa la Reforma al Código de Aguas, que ha sido históricamente dilatada (17 veces puesta en la agenda legislativa desde el retorno a la democracia), con lo cual el modelo de administración del agua en Chile sigue intacto.

#### **D. Marco Social**

La comuna de Petorca tiene 10,000 habitantes aproximadamente y una densidad de 6 habitantes por km<sup>2</sup>, con un carácter predominantemente rural: más del 70% en 2015 (INE, 2015), descendiendo al 58% en 2019 (INE, 2019). El índice de aislamiento (grado de lejanía, desconexión, incomunicación de un territorio) alcanza un valor de 0.5004 (SUBDERE, 2011), el más alto a nivel de la Región de Valparaíso continental, manifestando el limitado acceso de la población a los centros urbanos y a los servicios de educación y salud. Según la encuesta CASEN (Caracterización Socioeconómica Nacional) del 2009, existe un 16% de pobreza de tipo no indigente, además de 1% de población en estado de indigencia, porcentaje que está sobre el promedio regional y nacional. El nivel de instrucción promedio en la comuna varía entre los 8 y 12 años; menos de 200 personas han accedido a la enseñanza superior, mientras que cerca de 1,000 nunca han asistido a una sala de clases, lo que se refleja en una de las peores cifras de analfabetismo del país (8%) (BCN, 2013).

Los principales focos de desarrollo son la agricultura y la pequeña minería de oro-cobre. En las últimas décadas el paisaje social ha experimentado grandes cambios con las manifestaciones locales del cambio climático y la introducción de la industria agroexportadora, principalmente de aguacates (paltas), con el 90% de la superficie cultivada destinada a su producción. La

---

<sup>32</sup> MODATIMA: Movimiento de Defensa por el acceso al Agua, la Tierra y la Protección del Medio Ambiente, nacido en la Provincia de Petorca.

<sup>33</sup> Medio Cooperativa: <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/region-de-valparaiso/defensora-del-agua-en-petorca-es-amenazada-de-muerte-por-tercera-vez-en/2022-01-11/011634.html>



escasez de precipitaciones, el agotamiento de los ríos, manantiales y fuentes subterráneas someras, la degradación del suelo y la pérdida de ganados y la biodiversidad en general, han afectado significativamente la calidad de vida de las comunidades petorquinas, profundizando sus niveles de pobreza. A nivel provincial, el Instituto Nacional de Derechos Humanos indicó “*la pauperización de más de 7,000 pequeños agricultores, más de 50,000 personas padecen de la carencia de agua para beber y servicios higiénicos básicos, a pesar de las innumerables denuncias realizadas*” (INDH, 2012: 142).

Estos indicadores demográficos revelan profundos problemas sociales que se relacionan directamente con su vulnerabilidad social y el histórico abandono por parte del Estado, condición que se ha agravado con la llegada del agronegocio y la falta de precipitaciones en la zona. El desarrollo económico del que tanto se jactan gobernantes y empresarios de Petorca, ha sido a costa del empobrecimiento social y deterioro ambiental del territorio.

### **E. Marco Técnico-Científico**

En Chile existe una grave carencia de conocimiento sobre los sistemas hidrogeológicos. El agua subterránea para consumo humano alcanza un 40% del volumen total, mientras que en zonas rurales significa un 76% (Min. del Interior, 2015), incrementándose su importancia en un escenario de sequía y agotamiento del escurrimiento superficial. A pesar de ello, el país no cuenta con información básica sobre los sistemas de agua subterránea (ejemplo: Arumí y Oyarzún, 2006). Probablemente, la industria minera y agrícola posee información más contundente, pero es de uso y beneficio privado. En cambio, la inversión del Estado para el desarrollo científico y el fortalecimiento de las fuentes de información pública son francamente deficientes.

Por otro lado, la DGA ha definido una centena de *acuíferos* en Chile, que sólo obedecen a criterios administrativos (no hidrogeológicos), y los mal entiende como entidades aisladas e inconexas, sin considerar el sistema hidrogeológico completo. En el caso de Petorca, está definido el “Acuífero Río Petorca” cuyos límites son los de la cuenca homónima, es decir, se imponen límites de la dinámica hidrológica superficial cuando ellos no necesariamente coinciden con las fronteras subterráneas. Las cuencas adyacentes suelen estar hidráulicamente conectadas subterráneamente por ciertos tipos de flujos, y son las características geológicas las que mayormente controlan la dinámica y calidad (natural) del agua subterránea, por tanto, debieran ser el criterio dominante para la definición de los acuíferos y su extensión.

Además, la metodología de estudio del agua subterránea que utiliza la DGA y la mayoría de los proyectos de investigación en el país, se basa en el cálculo del **Balance Hidrológico** y la generación de modelos que simulan futuros escenarios de “*disponibilidad hídrica*”. Estas metodologías están siendo fuertemente cuestionadas por líneas de investigación de la Hidrogeología Moderna (ver Tóth, 1963; Freeze y Cherry, 1979; Carrillo-Rivera *et al.*, 2013), ya que presentan una visión muy limitada del sistema hidrogeológico, por lo que conducen a conclusiones y modelos errados, sobre los cuales la DGA administra y gestiona el agua.



Estos cuestionamientos a las bases teóricas y metodológicas del cuerpo técnico-científico encargado de generar información sobre el agua subterránea en Chile, serán abordados con mayor profundidad en el capítulo de Discusiones (sección 6.2).

Un estudio de la propiedad de agua subterránea del Acuífero del Río Petorca hasta el año 2012, realizado por Bujes (2015), señala graves falencias en el sistema de registro oficial: (a) alrededor de un tercio de los derechos de agua inscritos no reportan sus caudales de extracción; (b) un 74% de los derechos inscritos no informan el uso del agua extraída; (c) aproximadamente un 33% de los derechos carece de información geográfica (ubicación en coordenadas UTM); (d) los datos sobre la identidad del propietario muchas veces es confusa.

El escenario de desconocimiento e incertidumbre descrito se agrava al considerar las presiones políticas, manipulación y ocultamiento de la información impuestos por intereses económicos de los grupos políticos que sacan provecho del mercado del agua. Esta corrupción, a la vez, impide que los avances de la comunidad científica del país en materia del agua puedan efectivamente vincularse con las autoridades/instituciones del Estado para determinar su dinámica en el ambiente hidrogeológico y buscar soluciones reales a la problemática del agua.

Cabe mencionar que en el trabajo de campo de este estudio (enero de 2020 y febrero de 2021) se pudo constatar que, aun cuando la DOH instaló caudalímetros y equipos de medición de parámetros del agua en varios pozos de la red de APR, los dirigentes no tienen acceso a estos valiosos datos ya que sólo se pueden descargar en forma remota a través de una aplicación computacional específica, que ningún dirigente entrevistado ha podido utilizar, ya sea por no contar con un equipo celular requerido por la aplicación o por resultarles de alta complejidad. Al consultar por estos datos a las autoridades municipales y provinciales, declararon no tener acceso a ellos. Es decir, la millonaria inversión con fondo públicos para el registro y monitoreo de los pozos en Petorca parece ser una falsa pantalla de progreso tecnológico.

## **F. Infraestructura Hídrica**

En las áreas urbanizadas de Chile, el agua potable es suministrada por empresas sanitarias que pasaron a ser privadas a fines del siglo pasado. En el caso de Petorca, es **ESVAL** (Empresa Sanitaria de Valparaíso, Aconcagua y Litoral). En cambio, en las zonas rurales del país, donde a las empresas no se les hace atractivo invertir, se ha creado un sistema comunitario de abastecimiento de agua potable organizado en comités y cooperativas de **Agua Potable Rural (APR)**. Las APRs funcionan gracias al trabajo voluntario de sus socios, financiándose a través de la recaudación comunitaria de sus usuarios y fondos públicos. Sin embargo, estos aportes son insuficientes, la infraestructura hídrica tiene un limitado alcance y existe un escaso desarrollo técnico y tecnológico para enfrentar la crisis hídrica. Muchas de las inversiones que el Estado ha hecho en la construcción de pozos para las APRs de Petorca, no han servido de nada: al poco tiempo de su construcción muchos de ellos han quedado inutilizados, ya sea por una calidad deficiente del agua extraída o por agotamiento de los flujos subterráneos de agua más someros, dada la poca profundidad de perforación. Frente a este fracaso, los gobiernos de

turno han insistido (durante años) en subsanar la carencia de agua con la compra de agua a los entes privados que cuentan con derechos de agua y/o con la capacidad financiera para acceder con sus pozos a los flujos de agua subterránea más profundos, para luego distribuir el agua a las localidades rurales mediante camiones aljibe, con financiamiento fiscal. Es decir, la inversión pública en materia hídrica no está pensada en dar soluciones de fondo para devolver la autonomía hídrica a la población rural de Petorca, sino que va dirigida directamente al mercado del agua, en beneficio de la elite acaparadora.

Por su parte, las sociedades agrícolas viven una realidad muy diferente: no sólo cuentan con recursos propios para costear estudios técnicos pertinentes, perforaciones y mantenimiento de pozos profundos (donde todavía fluye agua subterránea), y una extensa red de canales y sistemas de riego; estas empresas han recibido cuantioso financiamiento público para el fomento del desarrollo tecnológico de los sistemas agrícolas y sus proyectos de infraestructura. Por ejemplo, el exministro Pérez-Yoma, perteneciente a la Sociedad Agrícola Los Graneros Ltda., recibió la suma de \$156,592,216 CLP (≈\$200,000 USD) por parte de la Comisión Nacional de Riego (CNR), en el año 1994, 1996 y 2010, “*para la expansión de la capacidad hídrica de la Sociedad Agrícola*” (Bolados *et al.* 2018). Cabe mencionar que esta sociedad agrícola fue sancionada en 2011 por usurpación de agua con la suma de \$825,260 CLP (≈ \$1,000 USD).

### **3.5. CONCLUSIONES PRELIMINARES**

Luego de analizar el modelo nacional de administración del agua, y al observar en campo la dinámica social en torno al agua en Petorca, fue posible caracterizar el escenario hidrosocial de este territorio, e identificar cómo se ha construido la vulnerabilidad hídrica de sus habitantes. La descomposición de la vulnerabilidad hídrica desde una perspectiva social, presenta una serie de evidencias que permiten contraargumentar el discurso de los gobiernos chilenos en turno, que señalan al cambio climático y la megasequía como los responsables de la grave crisis hídrica que afecta a Petorca y buena parte del país. De hecho, gracias a los fenómenos climáticos adversos presentados en las últimas décadas fue posible desenmascarar la causa de fondo: el modelo chileno de libre mercado, la versión más cruda del neoliberalismo, que ha convertido el agua en un recurso económico de propiedad privada.

A partir de las reflexiones surgidas en la revisión bibliográfica y en el ejercicio de identificar los diferentes componentes del espacio de vulnerabilidad hídrica en Petorca, es posible sintetizar este concepto como la condición que determina la susceptibilidad de un grupo humano a ser privados o limitados del goce y uso del agua, y su capacidad de prevenir, afrontar, manejar y recuperarse del impacto derivado de la afectación de sus fuentes de agua. Dicha afectación puede manifestarse como la alteración de la calidad y/o cantidad de agua que impide satisfacer los requerimientos de agua de la población, así como asegurar la permanencia de las fuentes de agua para las generaciones venideras y el sostenimiento de los ecosistemas. Las causas que provocan tales afectaciones al agua o la privación del acceso al agua, pueden originarse por

factores naturales, antrópicos o por una combinación de ambos. Dentro de los factores naturales se cuentan, por ejemplo, aspectos geológicos (componentes minerales de las rocas por las que circula el agua subterránea potencialmente tóxicos para la salud humana) y meteorológicos (sequías, variabilidad climática). Por su parte, los factores antrópicos guardan relación, por ejemplo, con eventos de contaminación del agua por mal manejo de residuos o accidentes; deficiencias en los sistemas de abastecimiento e infraestructura hídrica; deficiente y/o inequitativa administración y repartición del agua; deficiente legislación de protección ambiental y social (vulneración del derecho humano al agua y saneamiento); uso desmedido de las fuentes de agua; corrupción; desconocimiento del ciclo hidrológico.

A partir de ello, se concluye que la vulnerabilidad hídrica en Petorca tiene su origen en la estructura político-económica nacional, y las condiciones climáticas quedan subordinadas como un factor simplemente agravante. La vulnerabilidad hídrica en Petorca permanecerá y probablemente se agravará, mientras siga operando el actual modelo de gestión de agua, y la ideología neoliberal que entiende al agua como una mercancía.

Los resultados obtenidos a lo largo de este capítulo permiten caracterizar sintéticamente el modelo de administración y gestión del agua por los siguientes elementos: concentración de derechos de agua en un grupo selecto de políticos-empresarios; distribución inequitativa del agua; extracción indiscriminada de agua (superficial y subterránea); falta de transparencia, regulación y fiscalización; corrupción política y ausencia de democracia y gobernanza; carencia de personal calificado y de estudios hidrogeológicos (considerando el sistema completo hasta la roca basamento, véase sección 6.2) que generen información de dominio público; y una deficiente infraestructura hídrica. De esta forma, el Estado de Chile promueve y participa del mercado del agua, privilegiando el desarrollo económico de grupos políticos-empresarios, y atentando contra el sustento de los ecosistemas, el bienestar colectivo, el derecho humano al agua y la soberanía hídrica.

El modelo de gestión del agua (combinado con el agroexportador), gestado en dictadura y profundizado por los posteriores gobiernos en “democracia”, ha impactado profundamente en todos los elementos del sistema socio-ecológico, modificando el paisaje natural y cultural en todos sus niveles: agua, clima, suelo, biodiversidad y sociedad. Las comunidades locales se han visto forzadas a sostener el negocio del aguacate (palta), a costa del empobrecimiento y marginación de la población rural, debiendo abandonar sus ganados y cultivos (de escala familiar) por perder su acceso al agua. El caso de Petorca es un ejemplo más de acumulación por desposesión (Harvey, 2003) en Chile y América Latina, extinguiendo las prácticas agrícolas tradicionales y los modos de vida propios de este territorio.

Desde el punto de vista del Ciclo Hidrosocial, se observa que las dinámicas sociales alrededor del agua en Petorca se vieron profundamente afectadas por las alteraciones sucedidas en los patrones climáticos y las respuestas del agua (superficial y subterránea) en las últimas décadas, desvelándose las relaciones de poder y competencia entre los diferentes actores del sistema hidrosocial. En primera instancia, las perturbaciones a nivel del Ciclo hidrológico provocadas

por la sequía, generaron una serie de cambios en los modos de vida de los habitantes de Petorca y en las formas de organización social: cese de la agricultura y ganadería familiar, profundización de la pobreza, desmedro de la calidad de vida, pérdida de los servicios ecosistémicos, surgimiento de movimientos sociales para recuperar el acceso al agua, entre otros. Bajo este nuevo escenario socioambiental, el modelo de uso y gestión del agua promovió una serie de acciones que volvieron a afectar el Ciclo hidrológico, empeorando las consecuencias sobre las fuentes de agua (contaminación y agotamiento de los ríos y flujos subterráneos someros), lo cual irremediablemente repercutió de vuelta en la sociedad, agudizando los impactos negativos sobre las comunidades (y sobre los ecosistemas).

Por otro lado, el agua en la comuna de Petorca ha sido transformada (intervenida) de forma tal que se han “producido” diversos tipos de agua, con cualidades diferentes al agua original (natural), que esencialmente son agua cruda (que no ha sido potabilizada), agua potabilizada, agua virtual<sup>34</sup> y aguas residuales. Ello se ha llevado a cabo por medio de los siguientes procesos hidrosociales: (a) alumbramiento de agua subterránea en pozos; (b) tomas de agua y encausamiento desde ríos, esteros y manantiales; (c) conducción de agua a través de redes de distribución (el sistema más importante a nivel comunitario es el Sistema de Aducción de APRs); (d) acumulación de agua en piscinas para regadío; (e) transporte de agua cruda en camiones aljibe; (f) potabilización del agua para consumo humano, proceso a cargo de ESVAL (en el caso de poblaciones urbanizadas) y de las APRs (en el caso de poblaciones rurales); (g) desecho de aguas residuales: agua de retorno (agrícolas), aguas de lixiviación (minerías), aguas negras (población), líquidos percolados (rellenos sanitarios). La Fig. 22 ilustra sintéticamente los procesos y agentes hidrosociales, y los consiguientes tipos de “agua producida”.

La mediación del agua es posible gracias a la conjunción de capital, tecnología y fuerza de trabajo. En función de las capacidades que los diferentes usuarios tengan para acceder a estos tres factores, se generan desigualdades en el acceso y disfrute del agua; ello propicia la competencia por el agua entre los diversos usuarios. Ejemplo evidente de ello es la abismal disparidad observada en el capital, nivel tecnológico y fuerza de trabajo que disponen la población campesina o las organizaciones comunitarias de APR respecto a las empresas agrícolas o ESVAL (empresa sanitaria) para extraer agua subterránea, almacenarla y distribuirla. En Petorca, al igual que en el resto del país, el trinomio capital-tecnología-fuerza de trabajo se encuentra concentrado en una elite, amparado en un marco legislativo e institucional que prioriza su uso comercial y protege la propiedad privada sobre el agua. Por lo tanto, más que una “competencia por el acceso al agua” existe una **imposición de territorialidades hidrosociales** por parte de las empresas sanitarias y agrícolas sobre la población rural de Petorca. Esto responde a la imposición dada a nivel nacional, e incluso global, de la territorialidad hidrosocial neoliberal sobre las territorialidades tradicionales de carácter campesinas o indígenas, proceso legitimado por el Estado de Chile, que ha conllevado el despojo del agua de los grupos sometidos.

---

<sup>34</sup> Agua virtual: corresponde a la cantidad de agua que participa en el proceso de producción de servicios y productos, por ejemplo, el agua utilizada en la ganadería o en la agricultura, o aquella utilizada durante el procesamiento, fabricación, transporte y venta de productos.

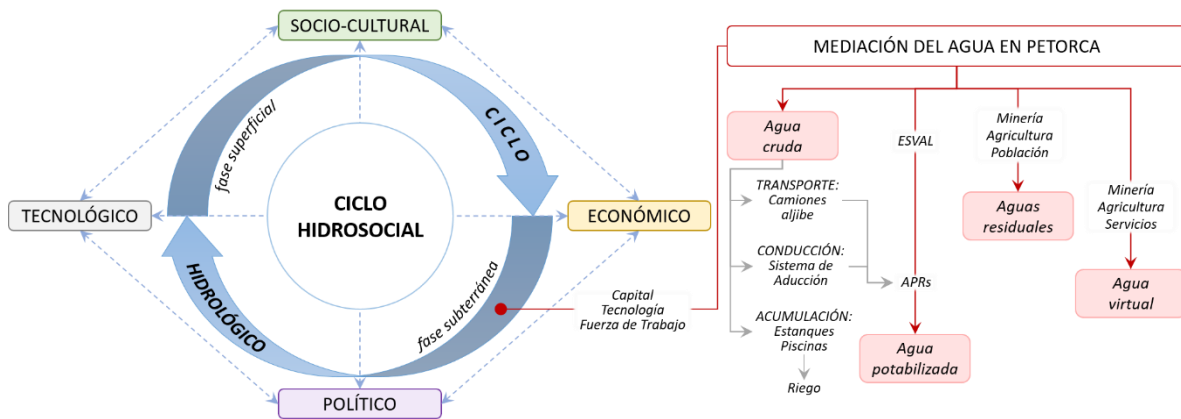


Fig. 22. Esquema ilustrativo de la interacción entre el Ciclo Hidrológico y las dimensiones sociales para dar como resultado el Ciclo Hidrosocial, y las formas de mediación del agua observadas en la comuna de Petorca, con los consiguientes tipos de agua producidas a través de diferentes procesos hidrosociales.

¿Cómo frenar y revertir esta situación? Las respuestas son diversas y generan una amplia discusión entre los diversos actores involucrados en el Ciclo Hidrosocial, pero todos los pobladores de Petorca consultados en el trabajo de campo (enero, 2020), y los expertos en materia de derechos humanos, coinciden en que el actual modelo de administración y gestión del agua profundiza y perpetúa sus niveles de vulnerabilidad social y pobreza. Por otro lado, hay una voz que se repite con fuerza, incluso a nivel nacional: “expropiación de los derechos de agua”, “fin al Código de Aguas y la Constitución de Pinochet<sup>35</sup>”.

Es de esperar que esta crisis socioambiental, junto con la actual emergencia sanitaria (Covid-19), sean resignificadas como una oportunidad para cuestionar qué entendemos por desarrollo, quiénes se han beneficiado de él y cuáles han sido los costos sociales y ambientales del supuesto desarrollo. En medio de un agitado escenario social que reclama la refundación de las bases constitucionales del país, para dar un término real a las herencias de la dictadura, el agua ha conseguido ser uno de los temas prioritarios en la redacción de la nueva Constitución de Chile. Es hora de liberar al agua de la propiedad privada.

<sup>35</sup> Refiriéndose a la dictadura liderada por Augusto Pinochet en Chile, entre 1973 y 1990.

## 4. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

A continuación será abordada la dimensión física del agua subterránea desde la perspectiva de la **Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea (TSFAS; Tóth, 1963)**, para conocer cómo varía su comportamiento, calidad y distribución a medida que circula por el medio geológico e interactúa con el resto de los componentes ambientales.

### 4.1. MARCO TEÓRICO

El agua que se infiltra en la superficie terrestre es almacenada en las rocas del subsuelo y transmitida a través de ellas por medio de porosidades, cavidades y estructuras, desde la zona de recarga hacia la de descarga, debido principalmente a la fuerza de gravedad, con velocidades desde centímetros a decenas de metros por año (Carrillo-Rivera *et al.*, 2007). Los parámetros de un régimen de agua subterránea están controlados por tres elementos: (i) Topografía: influye sobre el movimiento del agua y su distribución espacial, y los contornos del sistema de flujo. (ii) Estratigrafía: determina zonas de circulación del agua, el volumen y la evolución geoquímica del agua. (iii) Clima: condiciona la cantidad y distribución de suministro de agua a cada zona que alimentan los flujos subterráneos (Tóth, 2000).

La Hidrogeología Moderna (Ej: Tóth, 1963; Freeze y Cherry, 1979; Carrillo-Rivera *et al.*, 2013) ha aportado una visión más amplia y sistémica en el estudio del agua subterránea, complementando el concepto de “acuífero” con la **TSFAS**. Esta teoría fue propuesta por J. Tóth (1963), quien proporcionó evidencias geofísicas e hidrológicas para demostrar la interrelación del agua subterránea con el resto de los componentes del ambiente (ejemplo: rocas, suelo, vegetación), presentando luego fundamentos químicos, isotópicos, de vegetación y suelo, para probar la conexión hidráulica subterránea entre cuencas superficiales adyacentes.

La TSFAS considera la existencia de tres tipos de flujo de agua subterránea: local, intermedio y regional. Cada sistema de flujo tiene su propia zona de recarga, circulación y descarga; viajan a través de trayectos específicos, con distintas longitudes y profundidades de circulación, generalmente por diferentes unidades geológicas (Carrillo-Rivera y Cardona, 2012). Por tanto, cada sistema presenta diferente composición química e isotópica, edad y propiedades fisicoquímicas, determinados por el tiempo y condiciones de interacción entre el agua y el medio geológico. Los sistemas de flujo **local** se caracterizan por una trayectoria corta y somera. Los flujos **intermedios** alcanzan una trayectoria y profundidad mayor, pero descargan dentro de la misma cuenca donde se originaron. En cambio, los flujos **regionales** se originan en la parte más alta de la cuenca o divisoria de aguas, y descargan en la parte más baja de la cuenca o incluso fuera de ella, recorriendo trayectos de mayor longitud y a mayor profundidad.

El esquema de flujo subterráneo está compuesto por las zonas de recarga, tránsito y descarga. Una zona de recarga es aquella parte del relieve en la que el componente de flujo es descendente y el agua infiltrada alcanza la zona saturada. En cambio, en una zona de descarga el flujo es

ascendente y permite la salida de agua subterránea hacia la superficie (descargando en cursos fluviales, lagunas o en el mar). Entre la zona de recarga y descarga se desarrolla una zona de tránsito, donde el flujo de agua subterránea es esencialmente horizontal. El límite inferior del sistema hidrogeológico corresponde a la **roca basamento**, que se define como aquella unidad geológica constituida por rocas metamórficas y/o intrusivas, de naturaleza impermeable, que infrayace a la unidad por la que circulan los flujos regionales (Carmona *et al.*, 2017).

Las características contrastantes de cada ambiente geológico a través del cual circula el agua subterránea, le otorgan propiedades fisicoquímicas distintivas. Los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea (temperatura, humedad, oxígeno disuelto, potencial de óxido-reducción, pH y salinidad), y el tipo de suelo y vegetación son diferentes según se trate de una zona de recarga, circulación o descarga, por lo que estos referentes se utilizan para identificar dichas zonas del esquema de flujo y establecer la jerarquía de los sistemas de flujo.

La composición química e isotópica del agua subterránea en zonas de descarga permite conocer su naturaleza e historia, ya que provee información sobre la altura a la que el agua de lluvia fue infiltrada, el tipo de rocas por las que el agua circuló, la profundidad que alcanzó durante su recorrido y el tiempo de permanencia en el subsuelo (edad del agua) (Tóth, 2000).

La Fig. 23 ilustra el modelo de los SFAS, que consiste en una sección desde la superficie hasta la roca basamento, con la variación de indicadores químicos y fisicoquímicos del agua subterránea (en términos relativos a cada región), y sus manifestaciones superficiales (geomorfológicas, edafológicas, vegetales) en una cuenca regional.

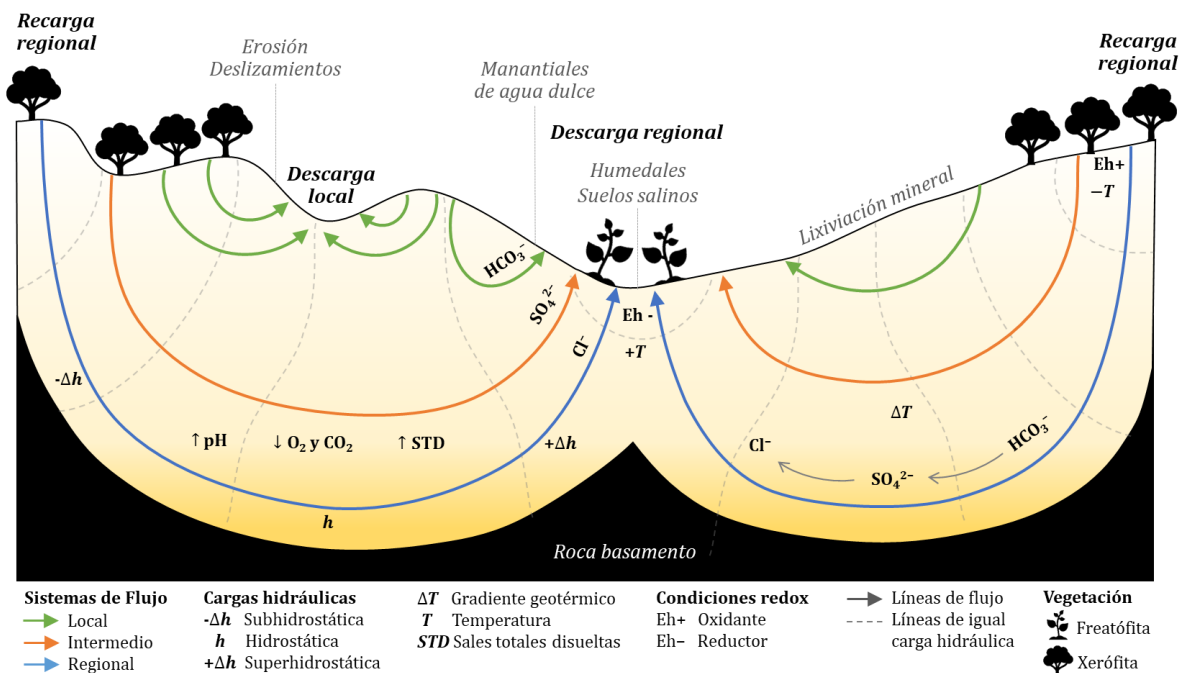


Fig. 23. Modelo de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea en una cuenca regional (Tóth, 1970), mostrando indicadores fisicoquímicos y ambientales. Modificado de Peñuela y Carrillo-Rivera (2012).



En condiciones de reciente infiltración, el agua tiende a ser ácida ( $\text{pH} < 7$ ), tiene baja temperatura, baja salinidad<sup>36</sup> (STD), un potencial de óxido-reducción (redox) oxidante ( $\text{Eh}^+$ ) y altas concentraciones de  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$  (aportados desde el suelo y la atmósfera). Conforme el flujo de agua va transitando a mayor profundidad, aumenta su temperatura debido al gradiente geotérmico, su pH crece (se hace más alcalino), las condiciones redox se hacen más reductoras ( $\text{Eh}^-$ ), y la salinidad aumenta debido a que el agua dispone de más tiempo y capacidad para disolver los minerales de las rocas.

La medición de la concentración de **cationes**, como *calcio* ( $\text{Ca}^{2+}$ ), *magnesio* ( $\text{Mg}^{2+}$ ), *sodio* ( $\text{Na}^+$ ), *potasio* ( $\text{K}^+$ ), y **aniones**, como *bicarbonato* ( $\text{HCO}_3^-$ ), *sulfato* ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), *cloruro* ( $\text{Cl}^-$ ), *nitrato* ( $\text{NO}_3^-$ ), permite inferir posibles orígenes y principales procesos geoquímicos del agua, ya que estos elementos son altamente sensibles a las condiciones de circulación del agua subterránea. Los factores que intervienen en la composición química (concentración de cationes y aniones) del agua subterránea son: condiciones del medio por el que circuló el agua, el tipo de material geológico (minerales) con el que el agua interactuó y el tiempo de residencia.

El agua recién infiltrada tiene altas concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$ , ya que resulta de la reacción del agua de lluvia que interactúa con el  $\text{CO}_2$  presente en el aire y el suelo, generando un pH ácido (exceso de  $\text{H}^+$ ) según la siguiente reacción:  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$ . Estas condiciones de pH favorecen la disolución de silicatos y carbonatos, y a medida que el agua subterránea va interactuando con los minerales del medio rocoso, los  $\text{H}^+$  se van agotando y la acidez va disminuyendo, a menos que el agua se encuentre en profundidad con una fuente carbonatada (ej. roca caliza). Si el agua permanece cerca de la superficie, puede mantener su acidez por la disponibilidad constante de  $\text{CO}_2$  para la generación de  $\text{H}^+$ . Por tanto, en una primera aproximación, las aguas “bicarbonatadas” se asocian a flujos de corta residencia (locales).

Una vez que se agotan las condiciones de acidez y de oxidación para la producción de  $\text{HCO}_3^-$ , es decir, cuando se alcanzan mayores profundidades, el ion estable es el sulfato ( $\text{SO}_4^-$ ). Este comportamiento ha permitido establecer la siguiente secuencia:  $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$ , que describe el aumento de la salinidad (STD) conforme el agua subterránea interactúa con el medio rocoso. Esta secuencia está determinada por la solubilidad y abundancia de las sales que componen el material por el que circula el agua: (a) la solubilidad de los carbonatos es mucho más baja que la de los sulfatos, y éstos son mucho menos solubles que los cloruros. Por ello, el agua que tiene una mayor trayectoria y tiempo de residencia en un ambiente subterráneo, presentará una mayor salinidad (altas concentraciones de  $\text{Cl}^-$ ). (b) El suelo es una fuente de bicarbonatos, los sulfatos son en general aportados por formaciones sedimentarias, y las sales cloruradas son las menos abundantes, ya que el  $\text{Cl}^-$  es un elemento conservativo (no reacciona con el medio, por lo tanto se acumula disuelto en el agua).

Por su parte, las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  son muy relevantes para reconocer, en conjunto con  $\text{SO}_4^-$  e iones de  $\text{Cl}$  y  $\text{Na}$ , contaminantes en el agua subterránea relacionados con actividades

---

<sup>36</sup> Se entiende por salinidad la suma de aniones y cationes disueltos en el agua; no guarda relación con el concepto de sal corriente ( $\text{NaCl}$ ).

agrícolas y agua residual. En condiciones naturales, el N está presente en el agua subterránea en bajísimas concentraciones (< 10 mg/l), cuya fuente es la materia orgánica presente en el suelo; sin embargo, el uso intensivo de fertilizantes (ejemplo: sulfato de amonio, fosfato de monoamonio, urea, amoníaco anhidro, y estiércol) supone una fuente adicional de este elemento. Bajo condiciones oxidantes (bajas profundidades), el N se asocia con el O formando NO<sub>3</sub> (proceso de nitrificación); esta especie es altamente soluble y móvil, lo que facilita su rápida infiltración y concentración en el agua subterránea (Freeze y Cherry, 1979).

La determinación de aniones y cationes mediante análisis químicos del agua subterránea, ayudan a definir procesos hidrogeoquímicos que apuntan a conocer su origen y evolución, así como también mezclas e interacciones entre diferentes fuentes (naturales y antrópicas) y de diferente composición. De esta forma, es posible identificar eventos de contaminación antropogénica, intrusión de agua salina, aportes termales de flujos regionales profundos, etc.

En cuanto a las manifestaciones superficiales, en las zonas de recarga se espera encontrar suelos pobremente desarrollados, con predominio de afloramientos rocosos fracturados y/o altamente permeables, y con **vegetación xerófit**a (adaptada a zonas de escasa disponibilidad de agua) que tiene raíces largas ya que el nivel freático se encuentra relativamente profundo. Por su parte, en zonas de descarga se espera encontrar suelos más desarrollados, con mayor contenido de materia orgánica, y **vegetación freatófit**a (requiere de una fuente de agua permanente) dado que el nivel freático se encuentra próximo a la superficie. En el caso de las zonas de descarga de flujos regionales, el agua presenta mayor temperatura (manantiales termales) y salinidad (alta conductividad eléctrica), menor contenido de oxígeno disuelto, valores redox más reductores y pH más alcalino. El suelo que recibe este tipo de descarga adquiere también estas propiedades, se encuentra permanentemente inundado y, por tanto, sustenta tipos de vegetación capaces de adaptarse a este tipo de suelo (vegetación halófit).

Por todo lo descrito, los diferentes sistemas de flujo (local, intermedio y regional) tienen distintos comportamientos y responden de distinta forma a un mismo régimen de extracción o de recarga, y por tanto, presentan diferentes grados de vulnerabilidad a cambios climáticos y otras afectaciones o fenómenos producidos en superficie. Aquí radica la importancia de definir la jerarquía de los sistemas de flujo, y la interacción entre ellos y con el resto de los componentes del ambiente. Esto es indispensable para diseñar estrategias adecuadas de protección y extracción de agua subterránea (Carrillo-Rivera y Ouyse, 2013), y así asegurar su disponibilidad presente y futura, en términos de calidad y cantidad.

Finalmente, para conocer el funcionamiento del agua subterránea y poder modelar el sistema hidrogeológico, se requiere conocer la siguiente información (Carmona *et al.*, 2017):

- *Agua subterránea*: evolución del nivel freático o estático; valor del potencial a diferente profundidad; localización de manantiales y cuerpos de agua; caudales de extracción; evolución espacio-temporal de la calidad fisicoquímica y temperatura del agua extraída.

- *Medio de circulación*: modelo de elevación del terreno; referente geológico y geomorfológico; tipos de material geológico, espesores y distribución en tres dimensiones, estructuras geológicas; profundidad y distribución de la roca basamento; valores del coeficiente de almacenamiento, conductividad hidráulica y porosidad.
- *Suelo y vegetación*: tipos, relaciones y distribución espacial del suelo y vegetación original, es decir, sin intervención humana.
- *Hidrología y climatología*: características y distribución de los cursos de agua superficiales, su interacción con los flujos subterráneos, caudal base en ríos permanentes; patrones climáticos, especialmente regímenes de precipitación.

## 4.2. METODOLOGÍA

En este trabajo se realizó un estudio hidrogeoquímico e isotópico a partir de 16 muestras de agua subterránea colectadas en 15 pozos (y pozos-noria) y 1 manantial (vertiente) de la comuna de Petorca en febrero de 2021, siguiendo un estricto protocolo de calibración, medición de parámetros fisicoquímicos y muestreo, que se detalla en el ANEXO 1 y 2. Para adquirir estos datos se llevó a cabo las siguientes tareas:

- **Medición en campo** de parámetros hidrológicos (caudal) y fisicoquímicos del agua subterránea (conductividad eléctrica, temperatura, potencial de óxido-reducción, pH y oxígeno disuelto), con equipos y sensores electrónicos previamente calibrados en cada sitio. Los puntos de muestreo y medición se definieron previamente con base en la información aportada por informantes clave en la Fase de Campo I.
- **Análisis de laboratorio**, para la determinación de aniones ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ), cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) y elementos traza. También se efectuó el análisis de isótopos estables ( $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$ ), que aportaron información sobre el origen y evolución temporal del agua subterránea. Los resultados obtenidos fueron tratados en programas como Excel, Diagrammes, EasyQuim y PHREEQC.

Cabe señalar que en este estudio no se utilizó un equipo multiparamétrico sino que cada parámetro fisicoquímico fue medido con un equipo diferente (marca Conductronic), con la finalidad de reducir la interferencia entre los sensores, y aumentar la estabilización y precisión de la medición. Además, el registro de datos se efectuó cada 10 min durante 40 min aproximadamente, luego de un mínimo de 15 min de actividad continua del pozo, con el objetivo de asegurar una respuesta fisicoquímica estable del agua subterránea y observar posibles manifestaciones de otros tipos de flujos. Bajo este mismo criterio, las muestras se tomaron una vez que los parámetros se encontraban estabilizados.

Por otro lado, se analizó las características climáticas e hidrográficas de la comuna de Petorca, y se recolectó diferentes capas de información (suelo y vegetación, piezometría, referente geológico y estructural), obtenidas de trabajos previos en la comuna de Petorca, para luego integrar estas capas en el software ArcGis y Google Earth Pro (según el formato de la

información adquirida) y así observar patrones y relaciones espaciales. Con base en indicadores superficiales (topografía, litología, vegetación, suelo, cuerpos de agua), se buscó identificar la distribución de zonas de recarga y descarga de agua subterránea, para conocer el esquema de flujo en la comuna. Finalmente, todos los datos generados y recabados fueron integrados para determinar la jerarquía de los sistemas de flujo de agua subterránea manifestados en la comuna de Petorca. Con base en esta interpretación, se buscó entender la relación entre los diferentes sistemas de flujo con el medio natural y social, para finalmente proponer una serie de consideraciones, desde el punto de vista hidrogeológico, que deben tenerse en cuenta en el mejoramiento de la gestión y protección del agua en la comuna de Petorca.

### 4.3. CARACTERÍSTICAS HIDROGRÁFICAS

La cuenca del Río Petorca se encuentra entre los paralelos 32° y 32°20' de latitud Sur, abarcando una superficie de 1,986 km<sup>2</sup>; limita al Norte con la cuenca de los ríos Choapa, Quilimarí y Estero Pupio, y por el Sur con la cuenca del Río Ligua. La cuenca del Río Petorca ha sido seccionada en 3 partes (DGA<sup>37</sup>): Petorca Alto (subcuencas Río Pedernal y Río El Sobrante), Petorca Medio (subcuencas Estero Las Palmas y Río Petorca) y Petorca Bajo (parte baja de la cuenca, excluida de este estudio) (Fig. 24). El Río Petorca nace de la confluencia de los ríos Pedernal y El Sobrante, en los alrededores de la ciudad de Chincolco. El Río Pedernal nace a los pies del portezuelo homónimo y en la falda sur del Cerro Pedernal, fluyendo de Norte a Sur en el sector NE de la cuenca; no registra escorrentía desde 1981 (Estación fluviométrica Chalaco). El Río El Sobrante se origina en el macizo montañoso andino, a una altura de 3,880 m s.n.m., escurriendo de Este a Oeste con un caudal que no ha superado 1.82 m<sup>3</sup>/s en la última década (Estación fluviométrica El Piadero, salida de la subcuenca El Sobrante). Fuente de información de estaciones fluviométricas: <https://camels.cr2.cl/>.

El Río Petorca tiene un régimen nivo-pluvial; fluye de Este a Oeste con una pendiente media de 3.22%, desembocando en el Océano Pacífico en el sector de Longotoma, junto al Río La Ligua, después de un trayecto de 72 km (considerando su inicio como Río El Sobrante). Los principales afluentes del Río Petorca son el Estero Las Palmas (comuna de Petorca) y el Estero Ossandón (comuna de La Ligua). En la estación fluviométrica Longotoma, en la salida de la cuenca del Río Petorca (fuera del área de estudio), se ha registrado un caudal inferior a 25.5 m<sup>3</sup>/s desde el año 2005 (<https://camels.cr2.cl/>).

La cuenca del Río Petorca es especialmente sensible a la reducción de precipitaciones, ya que a diferencia de otras cuencas alimentadas por glaciares, la cabecera del Río Petorca (El Sobrante), al igual que el Río La Ligua, no alcanza la cota glaciar. Las nacientes de la cuenca del Río Choapa, que limita por el E a la cuenca de Petorca y que drena hacia el NW, trunca la conexión del Río

---

<sup>37</sup> Delimitación oficial administrativa de cuencas y subcuencas de la Dirección General de Aguas, correspondiente al sistema del Banco Nacional de Aguas (BNA). Disponible en la Mapoteca Digital de la DGA: <https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx>

Petorca con el manto glaciar, evitando que este régimen alimente de forma más estable a la cuenca de Petorca. Por tanto, la recarga de las fuentes de agua dependen exclusivamente de lluvias y nieve en la época de invierno, las cuales han disminuido significativamente en las últimas dos décadas.

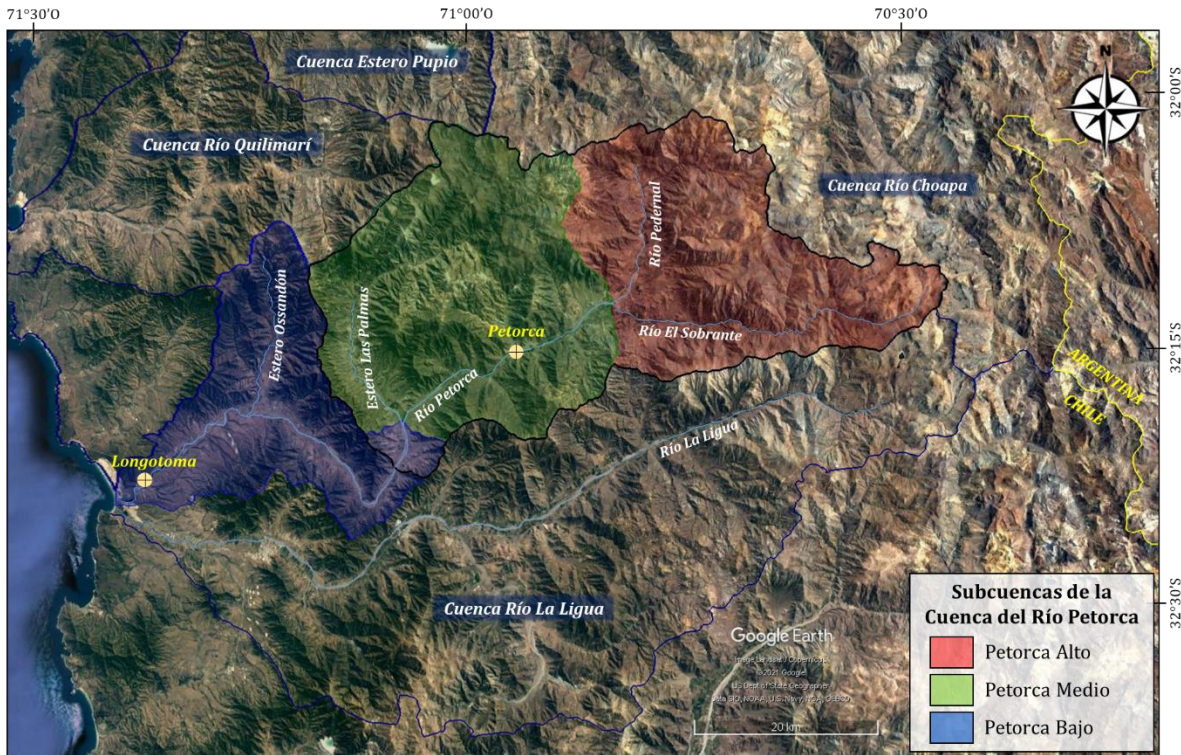


Fig. 24. Cuenca del Río Petorca, secciones y principales afluentes, junto con las cuencas adyacentes. En negro se enmarca la Comuna de Petorca. Fuente: Mapoteca Digital, Dirección General de Aguas.

#### 4.4. REFERENTE GEOLÓGICO

Los materiales geológicos constituyen el medio por el cual circula el agua subterránea, por ello, las características de estos materiales, que son propias de cada unidad de estudio, juegan un papel fundamental en el control de la distribución, velocidad de movimiento (en función de la permeabilidad de los diferentes materiales) y composición química del agua subterránea (en función del tiempo de interacción entre el agua y las rocas, y las condiciones fisicoquímicas imperantes). Conocer el referente geológico en un estudio de agua subterránea es esencial para elaborar adecuadas hipótesis de investigación y para interpretar de manera más acertada los datos hidrogeológicos e hidrogeoquímicos.

En el área de estudio se encuentran rocas con edades desde cretácicas a neógenas, dispuestas regionalmente en franjas semicontinuas de orientación aproximada N-S, sobre un basamento magmático-metamórfico del Paleozoico-Triásico (Levi, 1970). Estas secuencias dan cuenta de



la evolución del arco volcánico, asociado a la subducción de la placa de Nazca (antes Farallón y Aluk) bajo la Sudamericana, durante el Mesozoico y Cenozoico. El registro estratigráfico muestra una edad decreciente de las rocas de Oeste a Este, evidencia de la migración del arco volcánico en ese mismo sentido, desde la Cordillera de la Costa, en el margen occidental, hacia su actual posición en la parte alta de la Cordillera de Los Andes (Parada *et al.* 1988), fuera del área de estudio. El mapa geológico de la comuna de Petorca se muestra en la Fig. 25.

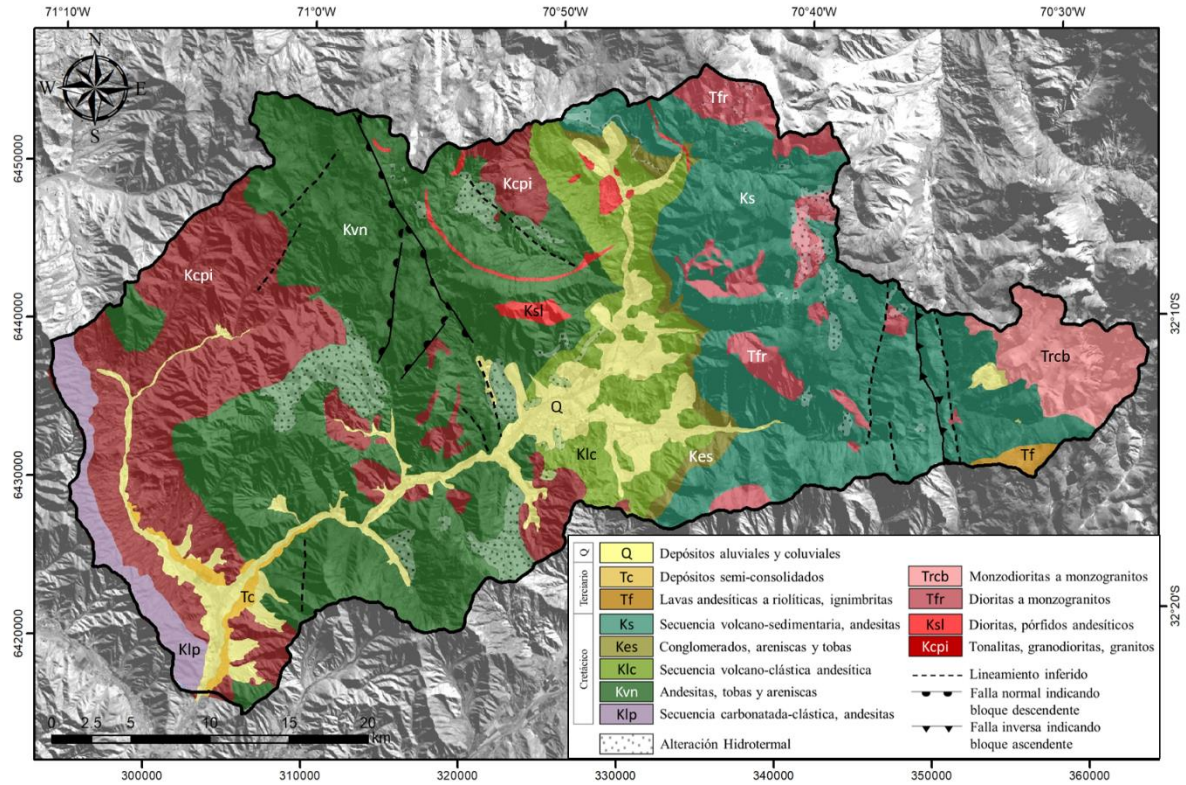


Fig. 25. Mapa geológico de la Comuna de Petorca, escala 1:10,000. Q: Depósitos cuaternarios. Tc: Fm. Confluencia (Mioceno-Plioceno). Tf: Fm. Farellones (Paleógeno). Ks: Fm. Salamanca (Cretácico Superior). Kes: U. El Sobrante (informal, Cretácico Superior). Klc: Fm. Las Chilcas (Cretácico Inferior a Superior). Kvn: Fm. Veta Negra (Cretácico Inferior). Klp: Fm. Lo Prado (Cretácico Inferior). Trcb: U. Río Cerro Blanco (Mioceno). Tfr: U. Fredes (Paleoceno-Eoceno). Ksl: U. San Lorenzo (Cretácico Superior). Kcpi: Complejo Plutónico Illapel (Cretácico Superior). Modificado de Pérez (2018), a partir de los trabajos de Rivano *et al.* (1993), Camus *et al.* (1986), Jara (2013) y Ferrando (2014). Archivos digitales (shapes) facilitados por R. Pérez.

#### 4.4.1. Rocas Estratificadas

La unidad más antigua que aflora en la comuna de Petorca es la **Formación Lo Prado** (Thomas, 1958), con la cual inicia el magmatismo cretácico en Chile Central. Aflora en la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, en el extremo Oeste del área de estudio. Corresponde a una secuencia marina cubierta por ignimbritas interestratificadas con rocas sedimentarias litorales y continentales, de edad Cretácico Inferior. Su Miembro Inferior (Patagua) está formado por calizas, limolitas, conglomerados, areniscas y lutitas calcáreas, con escasas intercalaciones



riolíticas y andesíticas; esta secuencia presenta pliegues volcados hacia el Este. Su Miembro Superior está compuesto por calizas, brechas y areniscas, intercaladas con potentes capas volcánicas, principalmente ignimbritas ácidas y, en menor cantidad, lavas básicas con textura ocoítica<sup>38</sup>. Se estima un espesor de 3,000 m para esta formación (Rivano, 1996).

Sobreyaciendo en concordancia a la unidad anterior, se encuentra la **Formación Veta Negra** (Thomas, 1958), de edad Cretácico Inferior, que consiste en una sucesión de flujos volcánicos continentales, de composición básica a intermedia, con intercalaciones sedimentarias subordinadas. Su Miembro Inferior Purehue (fuera del área de estudio) está constituido por andesitas frecuentemente brechosas y/o vesiculares, y hacia el techo predominan capas rojizas de areniscas, conglomerados y brechas; tiene un espesor variable de 350 a 2,000 m. El Miembro Superior Ocoa (aflora en el área de estudio), está formado principalmente por ocoítas dispuestas en potentes estratos de 10-30 m, con intercalaciones menores de tobas y areniscas; tiene un espesor de 2,500 a 3,000 m (Rivano, 1996).

Sobreyaciendo a esta unidad se dispone una secuencia volcano-sedimentaria continental, correspondiente a la **Formación Las Chilcas** (Thomas, 1958), de edad Cretácica Inferior a Superior. Presenta marcadas variaciones laterales de facies, con un espesor máximo de 3,500 m. Está compuesta por 4 miembros: (1) Pitipeumo (miembro inferior), de 400 a 1,000 m de espesor, conformado por areniscas intercaladas con niveles conglomerádicos, brechas, lavas andesíticas y dacíticas; (2) Tabón, con brechas y conglomerados; (3) Ñilhue, con calizas; (4) El Calvario (miembro superior), con 900-2,000 m de potencia, formado por brechas andesíticas, andesitas intercaladas con niveles conglomerádicos. Esta unidad infrayace a la Formación Salamanca (Jara y Charrier, 2014) y Lo Valle (unidad considerada por algunos autores como la sección superior de la Formación Las Chilcas; Thomas, 1958; Boyce 2015).

La **Formación Salamanca** (Rivano y Sepúlveda, 1991), de edad Cretácico Superior, es una secuencia volcánica constituida por lavas, tobas y brechas andesíticas, con intercalaciones riolíticas. Presenta dos miembros: (1) Miembro Santa Virginia (inferior), con predominio de conglomerados, areniscas rojas y escasas fangolitas y calizas intercaladas. (2) Miembro Río Manque (superior), donde predominan brechas andesíticas a dacíticas, con intercalaciones menores de conglomerados, areniscas y calizas.

En el borde oriental de la zona de estudio, al Este de la Zona de Falla Pocuro, se encuentra la **Formación Farellones** (Thiele, 1980), de edad Mioceno, sobreyaciendo a la Formación Las Chilcas (Rivano *et al.*, 1993; Boyce, 2015), con un espesor estimado en la zona de 2,150 m (Campbell, 2005). Corresponde a una secuencia volcánica continental predominantemente félsica, distinguiéndose tres miembros: (1) Miembro Inferior, con tobas e ignimbritas riolíticas a dacíticas, y depósitos lacustres intercalados. (2) Miembro Medio, compuesto de lavas

---

<sup>38</sup>Ocoíta: roca volcánica definida en la localidad de Ocoa (Región de Valparaíso), caracterizada por presentar una textura porfídica gruesa, con fenocristales de plagioclasa que sobrepasan los 2 cm de largo, y una masa fundamental microcristalina.

andesítico-basálticas, dacitas y conglomerados. (3) Miembro Superior, con lavas andesítico-basálticas intruidas por domos riódacíticos (Rivano *et al.*, 1990).

En el borde occidental se dispone la **Formación Confluencia** (Rivano y Sepúlveda, 1991) del Mioceno-Plioceno, sobreyaciendo a las unidades cretácicas. Corresponde a depósitos continentales semiconsolidados, de origen fluvio-aluvial, constituidos por niveles de gravas, arenas y limos. Estas secuencias, de 50 a 100 m de espesor, están distribuidas en las terrazas altas de los valles fluviales, parcialmente concordantes con el sistema hidrográfico actual (Rivano, 1996).

La unidad más reciente está representada por los **depósitos cuaternarios** no consolidados, de origen aluvial y coluvial, que se encuentran rellenando los valles y depresiones de la zona. En ocasiones, se presentan formando conos de deyección torrencial en las laderas de los cerros, íntimamente relacionados a la dinámica climática (Rivano, 1996).

#### 4.4.2. Rocas Intrusivas

Los cuerpos intrusivos presentes en el área de estudio pertenecen a franjas regionales de orientación Norte-Sur en Chile Central, vinculados al magmatismo de subducción, que disminuyen su edad de Oeste a Este.

La unidad más antigua y de mayor extensión en la zona de estudio es el **Complejo Plutónico Illapel** (Rivano *et al.*, 1985), que cuenta con dimensiones batolíticas. Este complejo se emplazó durante el Cretácico Superior en las secuencias volcánicas y sedimentarias del Cretácico Inferior, generando una zona de skarn en el contacto con la Formación Lo Prado, con amplio desarrollo de variados tipos de granate (Rivano, 1996). En el área de estudio se distinguen tres de sus cuatro unidades, que representan sus diferentes pulsos magmáticos: (1) Unidad Trondhjemitica (110 – 99 Ma), con trondhjemitas<sup>39</sup> y leucogranitos con facies locales de tonalitas (Ferrando, 2014), que afloran en el sector central del complejo. Un enjambre de diques máficos syn- y post-magmáticos (Hidalgo, 2011) intruyen a los granitoides de la unidad. (2) Unidad Tonalítica Principal (102 – 98 Ma), conformada por tonalitas con enclaves máficos y granodioritas subordinadas, que afloran en el borde occidental del complejo. (3) Unidad Granodiorítica (87 Ma), con granodioritas ubicadas en el borde oriental del complejo.

En la parte central del área de estudio se encuentra la **Unidad San Lorenzo** (Rivano *et al.*, 1985), de edad Cretácico Superior (86 – 79 Ma), intruyendo a las formaciones Veta Negra y Salamanca. Está conformada por pequeños cuerpos dioríticos, pórfidos andesíticos y andesitas de grano fino. Destaca una estructura circular dacítica (80-79 Ma) en el sector de Morro Hediondo, emplazada en la Formación Salamanca, interpretada como una paleocaldera excepcionalmente conservada, vinculada a la génesis de yacimientos metálicos presentes en esa formación (Rivano, 1996).

---

<sup>39</sup> Trondhjemitita: roca plutónica compuesta de cuarzo y plagioclasa, y biotita subordinada. Corresponde a una "leucotonalita", una variedad de tonalita caracterizada por la ausencia de hornblenda.

Más al oriente, al Oeste de la Falla Pocuro, se presenta la **Unidad Fredes** (Rivano *et al.*, 1985), de edad Paleoceno-Eoceno, que intruye a la Formación Salamanca. La conforman stocks dioríticos y cuarzdioríticos, con granodioritas, tonalitas y monzogranitos subordinados (Rivano, 1996).

Por último, en el borde oriental de la zona de estudio, se encuentra la **Superunidad Río Chicharra** (Rivano *et al.*, 1985), al Este y sobre la Falla Pocuro, emplazada en la Formación Salamanca durante el Mioceno (19 – 15 Ma). De sus tres unidades, sólo aflora en la zona la **Unidad Río Cerro Blanco**, constituida por monzodioritas, monzonitas cuarcíferas, monzogranitos y granodioritas (Rivano, 1996).

Cabe mencionar la presencia de extensas zonas de **alteración hidrotermal** (facies argílica avanzada<sup>40</sup> y, en menor grado, silicificación<sup>41</sup>), con edades entre 109 a 81 Ma, genéticamente asociadas a los intrusivos del Cretácico Superior y a los yacimientos polimetálicos epitermales (Au, Ag, Cu, Pb y Zn) emplazados en las secuencias volcánicas cretácicas (Fig. 27). Esta mineralización se presenta como chimeneas de brecha (ejemplo: Mina Dulcinea, Morro Hediondo), rellenando vetas y fallas, y en forma diseminada. En el Distrito El Bronce, la mineralización está caracterizada (en orden de abundancia) por pirita, esfalerita, calcopirita, galena, tenantita-tetraedrita, bornita, arsenopirita, pirrotita, hematita y magnetita. La ganga está compuesta por cuarzo, ankerita, siderita y barita (Camus *et al.*, 1986).

#### 4.4.3. Estructuras Geológicas

En la zona de estudio se distinguen dos dominios estructurales (Fig. 26), con rumbo aproximado Norte-Sur:

1) **Zona de Falla Pocuro**, ubicada en la parte oriental de la zona de estudio, con dimensiones regionales (se extiende por lo menos entre los 31° y 34°S; Rivano, 1996). Está compuesta por una serie de fallas normales, provocando un alzamiento relativo del bloque oriental de 2,000 m aproximadamente (Aguirre, 1960), que afecta a las unidades del Cretácico Superior. Sin embargo, la escasa presencia de niveles estratigráficos guías ha despertado un debate respecto a su movimiento relativo (Moscoso *et al.*, 1982) y su posible inversión tectónica (Jara y Charrier, 2014), además de su periodo de actividad, que podría extenderse hasta el Mioceno (Fock *et al.*, 2006) o incluso el Cuaternario (Troncoso *et al.*, 2014).

---

<sup>40</sup> Alteración Argílica Avanzada: destrucción total de feldespatos por un ataque de hidrólisis intensivo, generando caolinita y/o alunita. Gran parte de los minerales son transformados a dickita, caolinita, pirofilita, diásporo, alunita y cuarzo. También se puede encontrar jarosita y pirita. En casos extremos la roca puede ser transformada a una masa de sílice oquerosa residual (“*vuggy silica*”). Esta alteración se da en un amplio rango de temperatura pero a condiciones de pH entre 1 y 3.5. Sobre los 350°C puede coexistir cuarzo con andalucita. Bajo pH = 2 domina el cuarzo, mientras que la alunita se da a pH sobre 2.

<sup>41</sup> Silicificación: alteración total de la mineralogía original, donde la roca queda convertida en una masa silíceas. Representa el mayor grado de hidrólisis posible.

2) **Sistema de fallas Quebrada de Castro, El Bronce y Petorca-El Durazno**, ubicado al Norte de la ciudad de Petorca, inscrito en el Distrito El Bronce, se encuentra afectando a las rocas del Cretácico Inferior (Formación Cerro Morado). El sistema Quebrada de Castro corresponde a un lineamiento regional que se extiende entre los 31° y 33°S, con rumbo N22°W, integrado por un conjunto de fallas subparalelas dextrales, con menor componente transpresivo. El lineamiento Petorca-El Durazno es paralelo a la estructura anterior hacia el Suroeste, con similares características. El sistema Quebrada El Bronce está constituido por una serie de fallas tensionales, diques y vetas con dirección N-S y NE-SW, que comunican las dos estructuras regionales mencionadas (Camus *et al.*, 1991). Alrededor de la Caldera Morro Hediondo, existen estructuras concéntricas y radiales a la caldera (Camus *et al.*, 1986).

Por otro lado, las rocas volcanoclásticas mesozoicas se encuentran suavemente plegadas, con un amplio radio de curvatura (de centenares de metros hasta kilómetros), originando monoclinales que mantean hacia el Este en la parte más costera, y que gradan a relieves subhorizontales a medida que se avanza hacia la Cordillera de Los Andes (Rivano, 1996).

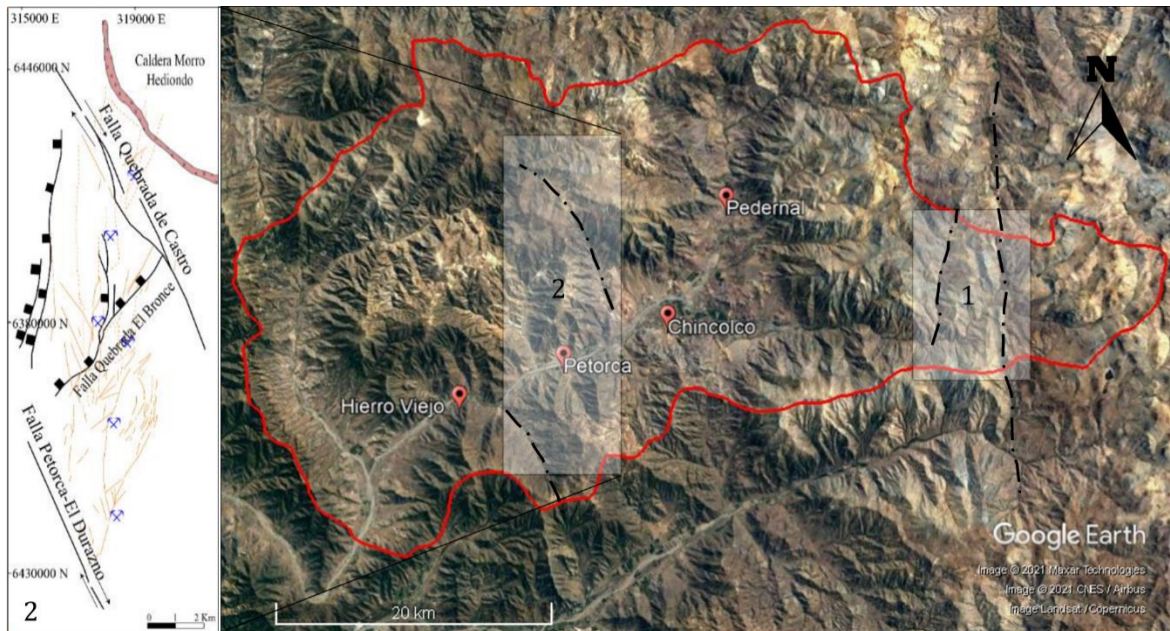


Fig. 26. Dominios estructurales en la Comuna de Petorca: (1) Zona de Falla Pocuro y (2) Sistema de Fallas Quebrada de Castro, El Bronce y Petorca-El Durazno, ampliado en esquema izquierdo (elaborado por Pérez, 2018; basado en Camus *et al.*, 1991).



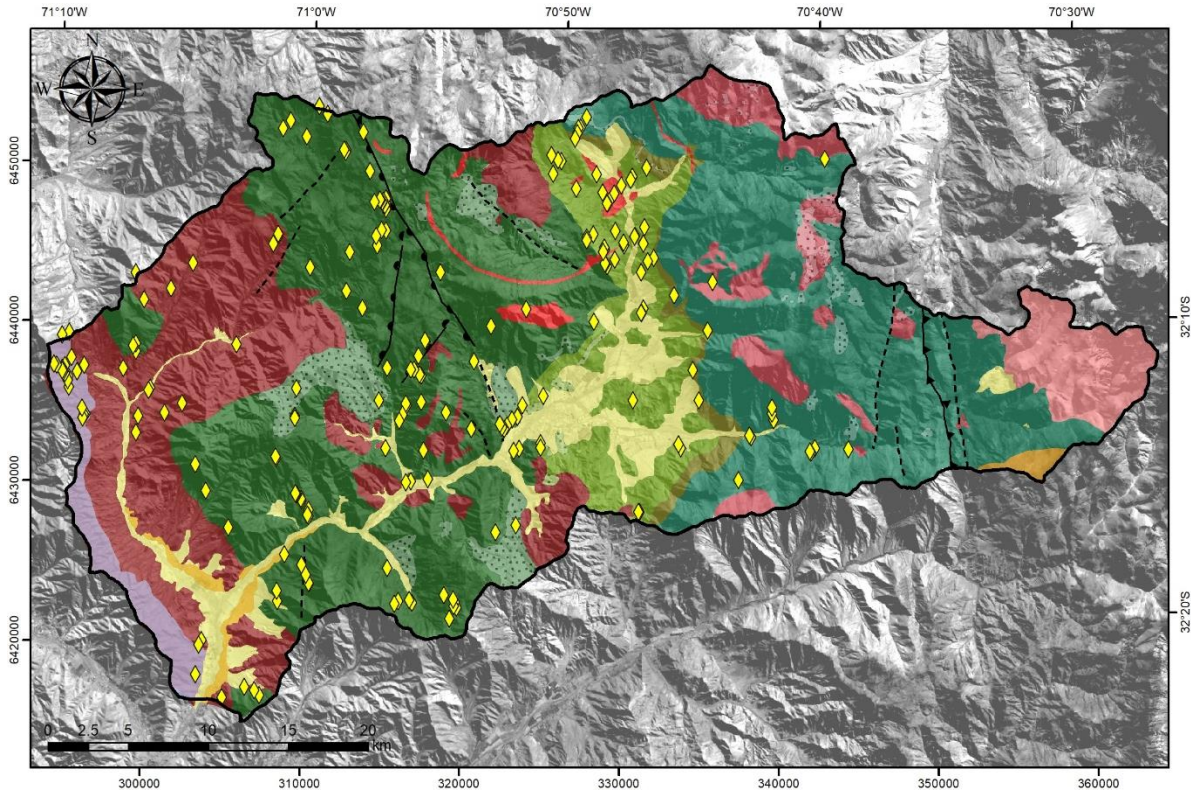


Fig. 27. Ubicación de labores mineras (rombos amarillos) donde se extrae o se ha extraído menas de Cu, Au y Ag. Archivos digitales facilitados por R. Pérez.

#### 4.5. REFERENTE GEOMORFOLÓGICO

Las unidades morfoestructurales presentes en la zona de estudio corresponden a los dominios de la Cordillera de la Costa y la Cordillera de Los Andes. La parte media y baja de la cuenca del Río Petorca se inscribe en los Cordones Transversales, mientras que la parte alta de la cuenca en las Sierras Transversales del Tronco Maestro Andino (Börgel, 1983). Se trata de un ambiente precordillerano y de montaña media, modelado principalmente por agentes fluviales, y también por movimientos tectónicos propios de la dinámica andina. En la Fig. 28 se muestra el modelo de elevación de terreno de la cuenca.

En la comuna de Petorca se encuentran morfologías típicas de un sistema fluvial, como valles, llanuras de inundación, terrazas fluviales y abanicos aluviales, así como también depósitos de remociones en masa que han sido parcialmente cubiertos por los depósitos fluviales más recientes (Fig. 29). Los sedimentos aluviales, coluviales y los depósitos que han rellenado estos valles se originaron por la acción de los actuales cursos de agua; están formados por acumulaciones de gravas y bloques pobremente estratificados, y por arenas y limos con buena estratificación, de composición predominantemente volcánica y plutónica, y menor proporción de

rocas sedimentarias. Se trata de depósitos efímeros que suelen evolucionar anualmente según la abundancia e intensidad de las precipitaciones (Rivano, 1996).

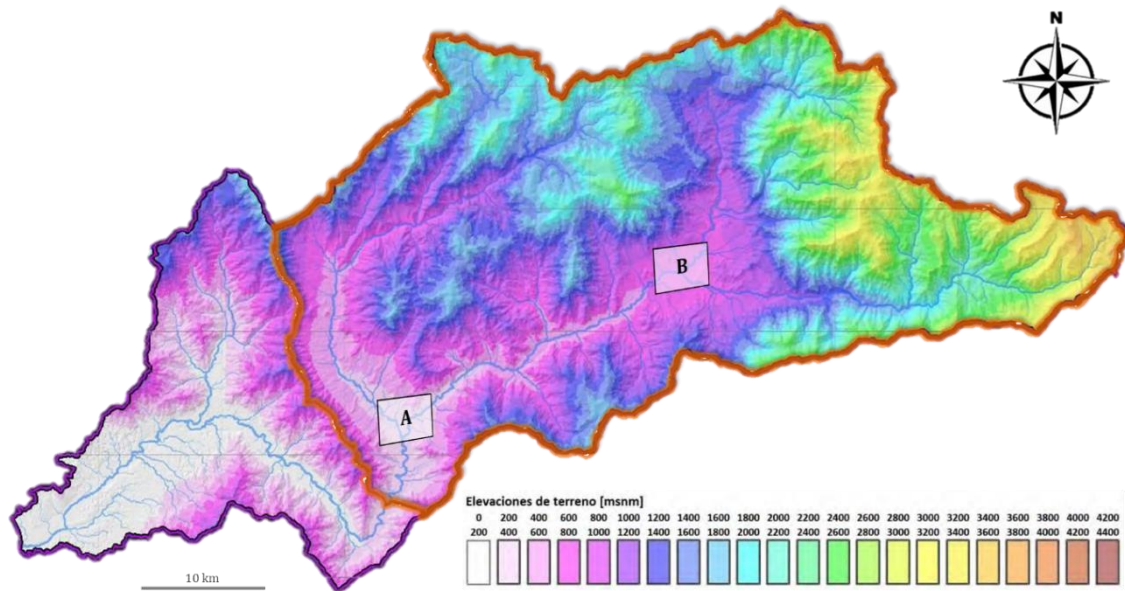


Fig. 28. Modelo de elevación de terreno de la Cuenca del Río Petorca y red hidrográfica, indicando la ubicación de la Fig. 29 A y B. Comuna de Petorca en contorno naranja. Modificado de AC Ingenieros (2019).

Las principales unidades geomorfológicas son las siguientes:

- Estribaciones de la Cordillera de Los Andes: macizos cordilleranos andinos que ingresan hacia el poniente, sobre los 2,500 m de altura. Se caracterizan por la fuerte pendiente de sus laderas (sobre 50°), que favorecen procesos de remociones en masa o transporte de material por laderas, formando escombreras de rodados (guijarros y gravas) a los pies de los escarpes.
- Lechos fluviales: están cubiertos por depósitos de rodados, arena y sedimentos finos; presentan formas anastomosadas y amplias barras que frecuentemente han sido pobladas por vegetación.
- Llanuras de inundación: se presentan amplias llanuras fluviales en las confluencias de los ríos, donde existe un activo aporte de material detrítico. Así se observa en el sector de Chincolco, donde se unen los ríos Pedernal y El Sobrante para dar origen al Río Petorca, y más hacia el Oeste, en Manuel Montt, donde confluye el Estero Las Palmas y el Río Petorca.
- Terrazas fluviales: acumulaciones semiconsolidadas de gravas y arenas situadas en uno o en ambos costados de los lechos de los ríos, que se distinguen del relleno fluvial por encontrarse topográficamente más altos; presentan un horizonte discontinuo de suelo.
- Abanicos aluviales: depósitos de material aluvial provenientes de la erosión de los cordones montañosos. Se emplazan en el piedemonte formado entre las terrazas fluviales actuales y los cordones montañosos, lo cual suaviza el relieve y la pendiente (entre 1 y 8°), observándose varias generaciones de abanicos que se superponen unos sobre otros. Rivano (1996) identifica conos de deyección torrencial y escombros de falda dentro de la comuna. Estos abanicos han sido ocupados para la agricultura y asentamientos humanos.



- Depósitos de colapso gravitacional: deslizamientos en masa, generados por la inestabilidad del relieve asociada a la actividad tectónica local y regional (Zona de Falla Pocuro). En general, estos depósitos se encuentran estabilizados y colonizados por vegetación.

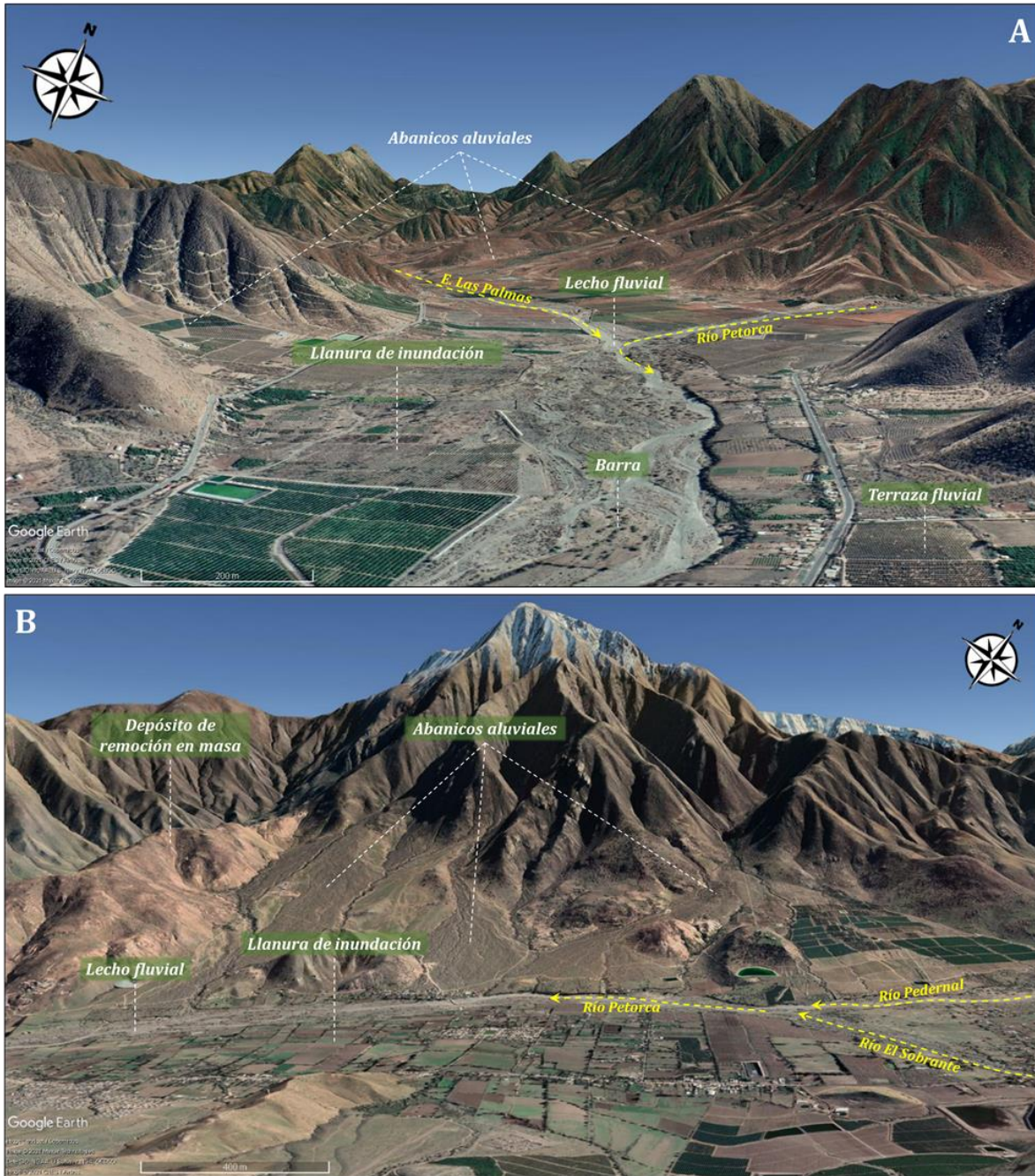


Fig. 29. Imágenes de Google Earth mostrando morfologías fluviales en el Valle de Petorca (ubicación en Fig. 28. A) Sector de Manuel Montt, confluencia del Río Petorca y Estero Las Palmas. B) Sector de Chincolco, confluencia de los ríos Pedernal, El Sobrante y Petorca.

#### 4.6. CLIMA, VEGETACIÓN Y SUELO

En la Zona Central de Chile se presenta un clima mediterráneo, caracterizado por veranos secos y calurosos, e inviernos cortos, fríos y lluviosos. Existe una marcada estacionalidad de los parámetros climáticos, controlada por influencias oceánicas (Anticiclón del Pacífico), el relieve y la continentalidad. Conforme el territorio se aleja de la costa y aumenta la altitud hacia la Cordillera de Los Andes, la temperatura disminuye y la precipitación aumenta. En Petorca, la temperatura presenta una importante oscilación térmica diaria, con temperaturas media anuales de 14.6°C (Mansilla, 2007). Las precipitaciones también manifiestan una estacionalidad, con máximos valores de 67.86 mm en julio y una mínima de 0.33 mm en febrero (Estaciones El Trapiche - Hierro Viejo, 2005).

En la comuna de Petorca se presentan 4 tipos de **bioclimas**<sup>42</sup> (Fig. 30; Luebert y Pliscoff, 2012):

- A. Bioclima de Interior: Se desarrolla en los sectores más bajos. Las temperaturas son moderadas (media anual promedio de 14.9°C), con una amplitud térmica anual promedio de 8.6°C, y las precipitaciones alcanzan los valores más bajos para la región (media anual de 304 mm). La vegetación es un mosaico de bosques y matorrales esclerófilos dominados por *Cryptocarya alba* (peumo), *Lithrea caustica* (litre) y *Quillaja saponaria* (quillay), y de bosques y matorrales espinosos de *Acacia caven* (espino) (Fig. 33A), que alcanzan su máxima expresión en este bioclima.
- B. Bioclima de Serranías Interiores: ocupa las áreas montañosas tanto en la Cordillera de la Costa como en Los Andes, y se desarrolla en altitudes entre 600 y 2,000 m. Se caracteriza por temperaturas moderadas a bajas (media anual de 12.1°C), con una amplitud térmica anual promedio de 8.9°C y precipitaciones relativamente moderadas para la región (media anual promedio de 377 mm). La vegetación predominante corresponde a bosques y matorrales esclerófilos, generalmente dominados por *Cryptocarya alba* (peumo), *Lithrea caustica* (litre) y *Quillaja saponaria* (quillay), así como por *Kageneckia angustifolia* (olivillo).
- C. Bioclima Preandino: se desarrolla en elevaciones entre 1,500 y 2,800 m, principalmente en la Cordillera de Los Andes y en algunos sectores altos de la Cordillera de la Costa. Se caracteriza por bajas temperaturas y alta continentalidad (temperatura media anual promedio de 8.8°C), con una amplitud térmica anual promedio de 9.2°C y lluvias más abundantes (precipitación media anual promedio de 367 mm). La vegetación predominante corresponde a matorrales bajos dominados por *Chuquiraga oppositifolia* (hierba blanca) y marginalmente a bosques esclerófilos de *Kageneckia angustifolia* (olivillo). Matorrales espinosos de *Puya coerulea* (chagual) (Fig. 33C) también se encuentran presentes.
- D. Bioclima Andino: se desarrolla sobre los 2,600 m de altura, donde se presentan bajas temperaturas y alta continentalidad (temperatura media anual promedio de 4.2°C). Las precipitaciones son más abundantes en la Cordillera de Los Andes (precipitación media anual promedio de 401 mm). La vegetación dominante son matorrales bajos de *Berberis*

---

<sup>42</sup> Bioclima: “cúmulo de factores climáticos que tienen alguna influencia sobre la biosfera” (Rodríguez et al., 2008). “Los bioclimas se caracterizan en términos de sus parámetros climáticos y vegetación zonal dominante” (Luebert y Pliscoff, 2012).

*empetrifolia* (uva de la cordillera, palo amarillo) y *Laretia acaulis* (llareta), pajonales dominados por *Stipa chrysophylla* (coirón), y herbazales altoandinos. Las zonas de mayor elevación están desprovistas de vegetación (Fig. 33E).

Sin embargo, los patrones climáticos descritos se han visto alterados. Desde el año 2010 hasta la fecha, se ha presentado una secuencia ininterrumpida de sequías, con déficits anuales de precipitación entre 25 y 45%, por lo que se ha denominado la **Mega Sequía de Chile Central** (CR2, 2015; Garreaud *et al.*, 2019) debido a su duración temporal y gran extensión espacial, sin precedentes en el registro histórico. Entre los efectos a escala regional están la disminución del manto de nieve andina, del agua subterránea en todo el centro de Chile, y la reducción de hasta un 90% de la descarga media de los ríos en el mar, lo que implica un limitado aporte de nutrientes en los ecosistemas costeros (Garreaud *et al.*, 2019).



Fig. 30. Bioclimas de la región de Valparaíso, modificado de Luebert y Plissock (2012).

Los diferentes tipos de suelo y vegetación (originales, sin alteración antrópica) están íntimamente relacionados con los tipos de sistemas de flujo de agua subterránea que se manifiestan en un área determinada; esto porque las características del agua subterránea (como su composición química, salinidad, potencial redox, temperatura y pH) determinan fuertemente las propiedades del suelo en las zonas de descarga, y ello configura el tipo de vegetación que puede crecer bajo esas condiciones. Además, la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea en su recorrido, determina el tipo y extensión de las raíces que deben desarrollar las diferentes especies vegetales para alcanzar el agua. Por ejemplo, en zonas de descarga de agua subterránea sólo pueden crecer aquellos tipos vegetales adaptados a condiciones de anegamiento. Por lo tanto, la diversidad y distribución espacial de los suelos y vegetación constituye una valiosa pista para identificar zonas de recarga-tránsito-descarga y el tipo de sistema de flujo de agua subterránea que está interactuando con el medio natural (estas manifestaciones superficiales serán abordadas con más detalle en la sección 4.8).

La vegetación de la comuna de Petorca se clasifica como estepárica seca, con pastos de temporada y vegetación rala (poco poblada). Existe una clara diferencia en la vegetación según las laderas de exposición: en las de exposición sur las laderas son sombrías y presentan escurrimiento de vertientes, vegetación más densa y es de tipo **esclerófila** (o mediterránea), la cual posee hojas duras y perenne (permanentes) y está adaptada a los largos periodos de calor



y sequedad de los climas mediterráneos. Corresponde a los bosques intervenidos de litres, boldos y quillayes. Mientras que en las laderas de exposición norte (mayor exposición a la radiación solar) la vegetación es reducida en individuos así como en especies. Destaca la presencia de vegetación **xerófit**a (especies adaptadas a condiciones de sequedad) con arbustos espinosos o de hojas largas y angostas como romerillo, colliguayes, chaguales y diferentes especies de cactáceas (*Echinopsis chilensis*, *E. conquimbanus* y *Neoporteria spp*) (Mansilla, 2007) (Fig. 33D). En las quebradas de Las Palmas y Frutillar (sector NW de la comuna) aún quedan unos pocos ejemplares de *Jubaea chilensis* (palma chilena) (Fig. 33B), especie endémica milenaria de alto valor ambiental y que actualmente está en peligro de extinción. La distribución de la vegetación se puede observar en la Fig. 31.

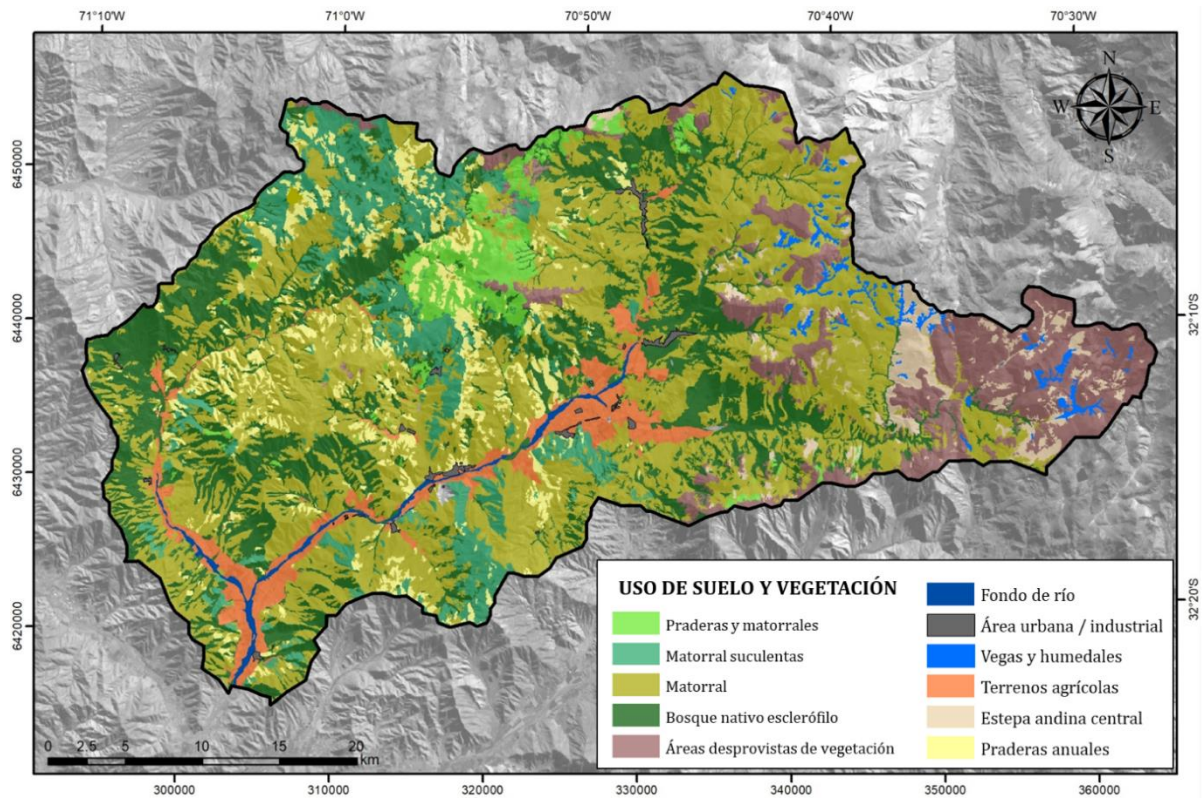


Fig. 31. Mapa de uso de suelo y vegetación de la Comuna de Petorca. Modificado de archivos (shapes) del CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales).

Los suelos de biomas de esclerófilos son poco evolucionados y poco profundos, suelen acumular calcio y óxidos de hierro, y la descomposición de materia orgánica es lenta y adaptada al ciclo de lluvias (Alcaraz, 2012). Donde el relieve es abrupto y montañoso, y habita el matorral esclerófilo andino (Región de la Estepa Alto-Andina), son frecuentes los litosoles<sup>43</sup>, otorgando al paisaje un aspecto de desierto de altitud. Los matorrales y bosques espinosos (Región del

<sup>43</sup> Litosol (leptosols): Suelos muy delgados desarrollados a escasa profundidad de la roca, muy pedregosos, con enrizamiento limitado (WRB, 2015).

Matorral y del Bosque Esclerófilo) suelen desarrollarse sobre vertisoles<sup>44</sup>, caracterizados por abundante arcilla y alta pedregosidad, típicamente desarrollados en pendientes inclinadas de depósitos de coluvios en las faldas de sectores montañosos (Salazar, 1999). Los suelos ocupados para la agricultura suelen desarrollarse sobre terrazas y llanuras fluviales (bolones, gravas y arenas), correspondientes a aridisoles<sup>45</sup> y alfisoles<sup>46</sup> (DRH, 2016), invadiendo incluso los depósitos coluviales con alta pendiente.

No se pudo obtener en línea un mapa de tipos de suelos de la comuna de Petorca, en la web sólo está disponible un visualizador SIG del CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales) de la Región de Valparaíso, donde se indica la distribución de la aptitud de suelos para la agricultura (Fig. 32), pero no permite separar las propiedades de las diferentes clases. Por último, indica sin dudas que los suelos del Valle de Petorca, en general, no son naturalmente aptos para el cultivo de árboles frutícolas, y su uso intensivo desde la década del 90 para la producción de aguacate tendrá consecuencias irreparables en la calidad de esos suelos.

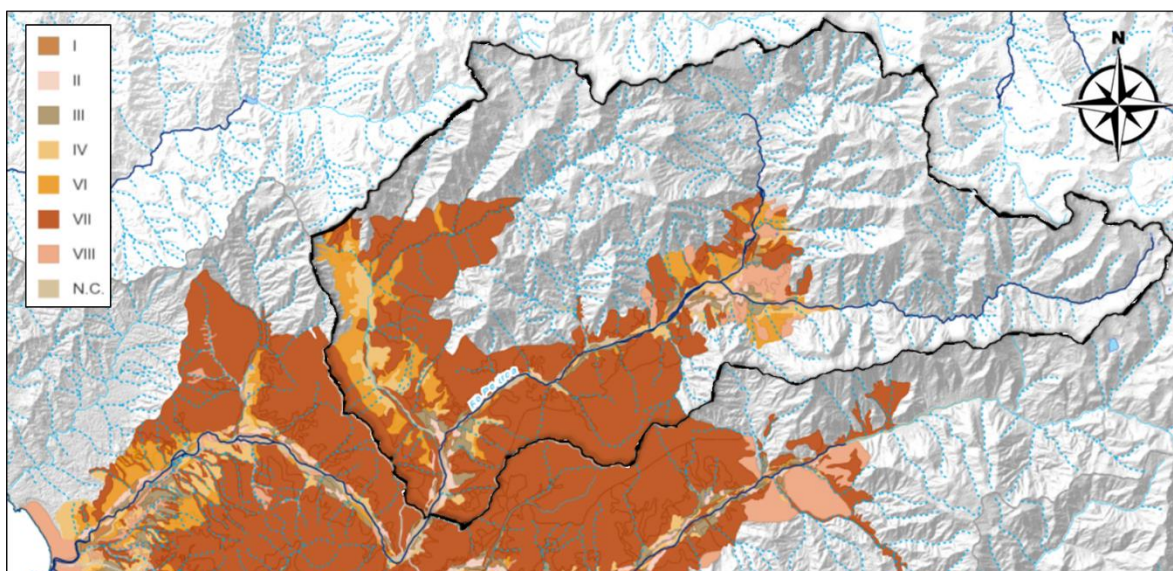


Fig. 32. Mapa de clases de capacidad de usos de suelo adaptados para cultivos, explicación en Tabla 4.1. Extraído del Visualizador SIG Región de Valparaíso (Merlet et al., 2018).

<sup>44</sup> Vertisoles (vertisols): Suelos con enrizamiento limitado, formados en condiciones alternas de sequía-humedad, alta proporción de arcillas expandibles revueltas (WRB, 2015).

<sup>45</sup> Aridisoles (aridisols): Se forman en zonas áridas, presentan escaso contenido orgánico y baja producción vegetativa (USDA, 1999).

<sup>46</sup> Alfisoles (alfisols): Se forman en zonas semiáridas a húmedas, presentan un epipedon ochric, un horizonte argílico y una saturación de bases media a alta. Contienen Al y Fe (USDA, 1999).

Tabla 4.1. Clases de capacidades de usos de suelo (distribución en Fig. 32). Fuente: CIREN (1997).

Clase	Aptitud para cultivo	Propiedades
I	Sin limitaciones, se adaptan a cultivos intensivos	Suelos casi planos, profundos, bien drenados, buena retención de humedad, naturalmente fértiles
II	Ligeras limitaciones o requieren moderadas prácticas de conservación	Suelos planos con ligeras pendientes, profundos o moderadamente profundos, buena permeabilidad drenaje, texturas favorables que pueden contener más arcilla o arena que la Clase I. Ligera a moderada salinidad o sodicidad
III	Moderadas limitaciones, requieren prácticas de conservación y manejo	Suelos delgados, en relieve moderadamente inclinado, alta susceptibilidad a la erosión. Suelos tipo hardpan <sup>47</sup> , fragipan <sup>48</sup> , etc., que limita el almacenamiento de agua. Baja permeabilidad, baja fertilidad e inundables.
IV	Severas limitaciones, requieren cuidadosas prácticas de manejo y conservación	Suelos delgados sobre pendientes pronunciadas y relieve moderadamente ondulado y disectado. Tienen baja capacidad de retención de agua, se inundan después del drenaje, y presentan severa susceptibilidad a la erosión
V	No aptos para cultivos, sólo cultivos especiales, uso limitado para praderas naturales o forestales.	Suelos pedregosos y/o rocosos, casi planos o en pie de monte. Condicionados a inundaciones frecuentes y prolongadas o salinidad excesiva. Demasiado húmedos o inundados pero susceptibles de ser drenados, Presentan escaso o nulo riesgo de erosión. Favorable para turbas, pantanos, etc.
VI	Inadecuados para cultivos, uso limitado a pastos y forestales. Limitación climática.	Suelo con pedregosidad excesiva, con zona radicular poco profunda, excesiva humedad o anegamientos, baja capacidad de retención de humedad, alto contenido de sales o sodio. Pendiente pronunciada, severamente susceptibles a erosión
VII	Severa limitación para cultivo, uso limitado a pastoreo y forestal	Suelo con propiedades más desarrolladas que la clase VI
VIII	Sin valor agrícola, ganadero o forestal	Uso limitado para la vida silvestre o protección de hoyas hidrográficas.

Actualmente, la vegetación nativa se encuentra degradada por acción antrópica, debido a la tala durante el siglo XVIII y XIX destinada a la actividad minera y con fines habitacionales, así como también por el ganado caprino. Más recientemente, ha sido gravemente afectada por intensas sequías y desplazada por monocultivos principalmente de paltos (aguacate), y también cítricos y nogales, emplazados en el lecho de los ríos (actualmente secos), llanuras de inundación y en las laderas de los cerros aledaños a estos ríos. Esto ha favorecido las condiciones para procesos de erosión del suelo, agravando el retroceso vegetativo causado por los eventos de sequía, y retroalimentando la disminución de precipitaciones a escala local.

<sup>47</sup> Hardpan: capa dura o densa del suelo, bajo las cuales hay suelo permeable. Está constituida por carbonatos, hierro o silicatos, que cementan las partículas del suelo.

<sup>48</sup> Fragipan: tipo de hardpan constituido por una capa densa, compacta y cementada de limo y arena fina, que impide el movimiento de agua. es duro cuando está seco y frágil cuando está mojado.





*Fig. 33. Diferentes ambientes de desarrollo de suelo y vegetación. A) Espino, sector Hierro Viejo (Vladimir Vicencio, 2017). B) Palma chilena, sector Las Palmas (V. Vicencio, 2017). C) Chagual, sector Hierro Viejo (V. Vicencio, 2018). D) Cactáceas y matorrales en aridisoles, Valle Pedernal (V. Vicencio, 2017). E) Escaso o nulo desarrollo de suelo y vegetación en sectores elevados, Valle de Los Olmos (Marxel De la Fuente, 2021)*

#### 4.7. ANTECEDENTES HIDROGEOLÓGICOS

En la comuna de Petorca se han llevado a cabo múltiples estudios hidrogeológicos, en el ámbito de investigación académica así como también con fines técnicos por las entidades administradoras del agua. Sin embargo, todos ellos se enmarcan en la lógica conceptual de “acuífero” y su evaluación mediante el Balance Hidrológico, y/o apuntan a conocer la calidad del agua subterránea, con un enfoque diferente a la Teoría de los Sistemas de Flujos de Agua Subterránea (Tóth, 1963). Es decir, no se considera la interconexión subterránea de las cuencas superficiales, ni la profundidad a la roca basamento como el espesor real del sistema hidrogeológico, y los límites de los modelos son arbitrarios y/o administrativos. De todas formas aportan valiosa información para el territorio y este estudio. Los supuestos y bases teóricas utilizados en los modelos de los trabajos revisados serán discutidos en la sección 6.2. En el “**Acuífero del Río Petorca**” se reconocen dos unidades: (1) depósitos antiguos con un espesor máximo de 130 m, con niveles compactados de limos y arcillas que forman un “*acuífero pobre*”; y (2) depósitos recientes, situados en los primeros 5 a 30 m, que constituyen un “*acuífero libre*”, formados por material fluvial grueso (gravas y arena) y menor presencia de limos y arcillas (CNR, 1979). Otros estudios indican que la capa más reciente tendría un espesor de 8 a 25 m (Cade-Idepe Consultores, 2004), o incluso que no existe una diferenciación de acuíferos, y que en los rellenos del Río Petorca se han desarrollado “*napas predominantemente libres*” con variaciones estratigráficas locales (GCF Ingenieros, 2011).

El Proyecto Aconcagua de la CNR (1995) incluyó el Estudio de los Recursos Hídricos Subterráneos de la cuenca de Petorca, donde se distingue el “Acuífero Río Petorca” (entre la desembocadura y la junta con el Estero Las Palmas) y el “Acuífero Río Petorca Interior” (aguas arriba del Estero Las Palmas) (Fig. 34); los acuíferos están limitados por los interfluvios superficiales. Al acuífero interior (que mayormente abarca el área de estudio del presente trabajo) se le describe como un acuífero freático formado por gravas y arenas, y variable contenido de limo y arcillas; cuenta con un ancho promedio de 800 m y un espesor medio de 60 a 80 m. Se reportan valores de Transmisividad promedio de 500 m<sup>3</sup>/día /m (entre Polcura y Estero Las Palmas), y de 200 m<sup>3</sup>/día /m en la confluencia del Estero Las Palmas, por aporte de material fino. Informan un caudal específico entre 1 y 12 l/s/m, y un coeficiente de almacenamiento estimado entre 10 y 15%, con lo que han calculado un volumen de agua almacenada de 100 a 150 millones de m<sup>3</sup> para el Acuífero Río Petorca Interior. La profundidad del nivel de saturación no sobrepasa los 5 metros y se presentan afloramientos en el sector de Longotoma (cerca de la costa). El agua subterránea tiende a ser bicarbonatada-cálcica, con una marcada tendencia sódica-sulfatada. Se reportan valores de STD de 500 ppm a la salida del estero Las Palmas, mientras que aguas arriba es de 300 ppm y aguas abajo, de 350 ppm.

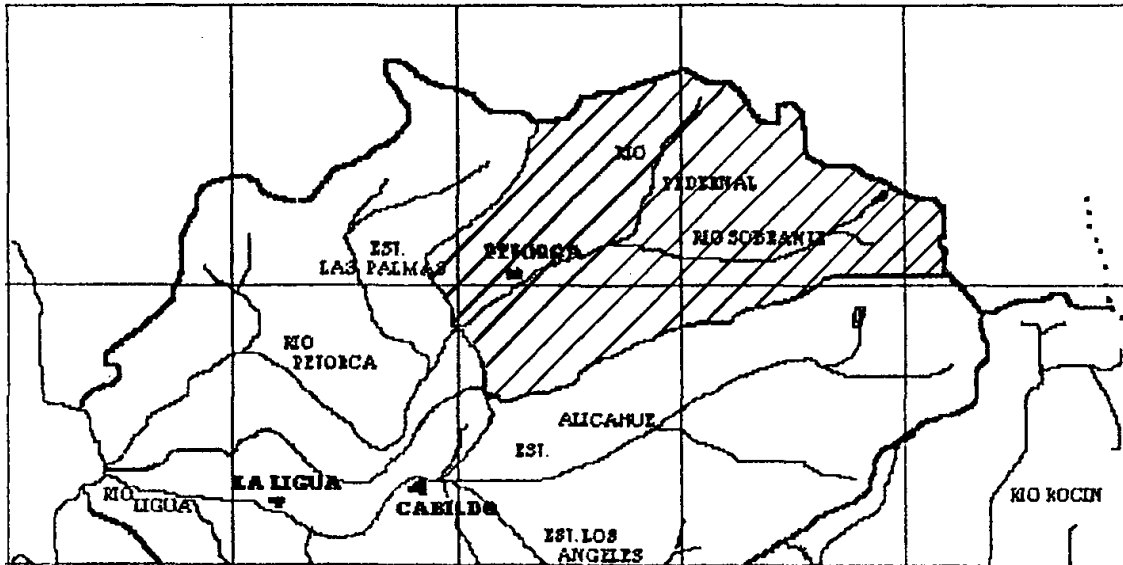


Fig. 34. Sector Petorca Interior (zona achurada) definido en el Proyecto Aconcagua de la CNR (1995).

Respecto a la relación río-acuífero, se indica que “un escaso espesor y una permeabilidad relativamente alta concentrada en la parte superior, producen una estrecha comunicación entre río y acuífero. Esta comunicación se refleja en una constante tendencia a la nivelación del acuífero con el río, provocando a lo largo del valle frecuentes recargas y descargas. Como consecuencia de lo anterior principalmente del pequeño volumen de regulación se pierden las ventajas más relevantes que poseen los embalses subterráneos” (pág. 1.3.37). Los autores realizaron un mapa piezométrico que establece que el sentido de escurrimiento es sensiblemente paralelo al escurrimiento del Río Petorca, aunque reconocen que existe limitada información hidrogeológica y deficiente calidad de los datos (CNR, 1995).

GCF Ingenieros (2011) realizaron un estudio (encargado por la CNR) para evaluar el potencial hidrogeológico de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca, con un modelo de flujo subterráneo, apoyándose en perfiles gravimétricos y sondeos electromagnéticos transitorios (TEM), y con base en los registros climáticos, piezométricos y de derechos de agua de la DGA. Declaran que “las componentes del flujo impuestas en el modelo (bombeo y recarga) presentan un nivel de incertidumbre en su cuantificación, que no es posible mejorar con la información disponible” (pág. 167). Aun así, es posible rescatar algunas conclusiones: “Evidentemente el sistema estudiado no se encuentra en equilibrio. La explotación de agua subterránea creciente, ha generado un vaciamiento gradual del agua almacenada. La extracción actual estimada alcanza a aproximadamente 1,600 l/s como promedio anual y la recarga proveniente de las lluvias y el riego es, en promedio, de aproximadamente 870 l/s. La diferencia es cubierta por el agua almacenada y los aportes río-napa. En términos prácticos, en un futuro cercano el nivel creciente de explotación de los acuíferos comenzará a generar problemas locales, puesto que en algunos sectores el descenso de los niveles secará las captaciones más someras y reducirá el rendimiento de los pozos más profundos. Actualmente, sin embargo, los niveles medidos en los pozos de control muestran que la situación aún no es crítica, y en la mayoría de los pozos de monitoreo de la DGA



*aún se advierte una estacionalidad de los niveles, sin que se aprecie una marcada tendencia al descenso que dé una señal de agotamiento” (pág. 167). Se reconoce que “la red de la DGA es limitada y no cubre todos los sectores que interesa estudiar, por lo que podrían existir áreas críticas que no son evidenciadas por los niveles medidos en los pozos de la DGA” (pág. 167).*

El estudio geofísico fue realizado por Geodatos, con el fin de determinar la interfaz sedimentos-basamento y estimar la profundidad de la roca basal (gravimetría) y establecer las características de resistividad de sub-superficie que puedan relacionarse con información geológica de interés para la exploración hidrogeológica subterránea (TEM). Se definieron 6 unidades geoelectricas, según los valores de resistividad obtenidos: *“Las unidades 3, 4 y 5, son las que pueden corresponder a un posible acuífero de buena permeabilidad, la unidad 2 eventualmente podría corresponder a un acuífero secundario, las unidades 1 y 6, corresponden a estratos impermeables”*. Notar que los pozos de control no superan los 50 m de profundidad, y que la roca considerada como “basamento” se encuentra a una profundidad de 100 a 250 m, inmediatamente debajo de los depósitos aluviales.

Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. (2014) realizaron una modelación hidrogeológica de los acuíferos de La Ligua y Petorca (Fig. 60A) para evaluar la pertinencia de establecer una nueva sectorización acuífera para estas cuencas. Indican lo siguiente: *“Dada la linealidad de los acuíferos de Ligua y Petorca, la división de la cuenca en subcuencas constituye una adecuada sectorización acuífera... la delimitación obedece a los principales aportes superficiales por tramo; éstos coinciden con entradas subterráneas, dado que los cauces con más desarrollo, tienen rellenos asociados”*. La sectorización acuífera propuesta se generó procurando agrupar sectores con características hidrogeológicas semejantes según los resultados obtenidos en la modelación, donde se consideró: descensos de niveles piezométricos en distintos escenarios (pozos de control de la DGA), densidad de captaciones de agua subterránea y la red de drenaje superficial. De esta forma se definieron los 5 sectores en la cuenca del Río Petorca que aún rigen la base administrativa del agua subterránea (Fig. 9).

El Departamento de Recursos Hídricos de la UdeC (DRH, 2016) realizó un estudio básico de diagnóstico para desarrollar un plan de riego en las cuencas de La Ligua y Petorca, donde se señala lo siguiente: *“Desde el punto de vista hidrogeológico, en la mayor parte del territorio existen formaciones de roca asociadas a bajos valores de permeabilidad. En el valle de los esteros se presentan rellenos permeables que forman acuíferos, ubicados alrededor del cauce del río Petorca y en la desembocadura. En el valle, se presenta un acuífero libre que se desarrolla prácticamente a lo largo de todo el valle principal del río Petorca. Los rellenos, de espesores variables entre 8 a 25 metros, están constituidos por sedimentos granulares, desde bolones hasta arenas finas, con frecuente presencia de estratos de arcilla” (pág. 222). “El resto de la cuenca no presenta ocurrencia significativa de aguas subterráneas puesto que la permeabilidad es nula o muy baja, con la excepción de pequeñas quebradas o vertientes que existan y que drenan hacia el valle... Se destaca que, debido al escaso grosor del acuífero libre y su alta permeabilidad, concentrada en la porción superior de la formación, existe una alta interacción entre aguas superficiales y subterráneas. Esta interacción se manifiesta en*

*rápidas respuestas de los niveles de aguas subterráneas a las variaciones de escorrentía superficial, y a la existencia de numerosas vertientes en los mismos cauces de los ríos. La recarga del acuífero no confinado está ligada a los caudales del río Petorca, a la descarga de sus afluentes y aportes desde quebradas adyacentes... en la zona confinada, el acuífero Petorca interactúa con el acuífero del río La Ligua, el cual se confina a partir de la localidad del mismo nombre hasta su extremo Oeste donde confluyeron el acuífero del río Petorca” (pág. 229). “Se puede observar que en el extremo este de la cuenca del Río Petorca existen estratos geológicos de baja permeabilidad y un área de menor magnitud con alta permeabilidad localizada en el sector bajo del río Pedernal en el sector de Calle Larga y otra en el sector de Petorca. La Cordillera de la Costa presenta una muy baja permeabilidad, mientras que la depresión intermedia presenta valles con permeabilidades mayores en las cercanías al río Petorca al igual que en el borde costero. Por lo tanto, las áreas en las que ocurre el agua subterránea se ubican mayoritariamente alrededor del cauce del río Petorca y su desembocadura, así como también en las partes bajas de los ríos Pedernal y Sobrante” (pág. 230). Por otro lado, respecto a la calidad del agua (superficial) se menciona que las concentraciones de los plaguicidas clorotalonil, 2, Dicloflop-Motil y Artrazina+S-Metalocloro, sobrepasan los límites máximos de calidad ambiental.*

AC Ingenieros (2019) llevaron a cabo una actualización de la modelación numérica del acuífero de Petorca, encargado por la DGA, para evaluar si las condiciones existentes (actualizadas) justifican la declaración del acuífero como zona de prohibición, y fundamentar la reducción temporal del ejercicio de los derechos de aprovechamiento de agua subterránea. Se elaboraron modelos de distribución de precipitaciones, análisis de datos fluviométricos históricos, y una modelación geológica numérica para determinar la recarga según permeabilidades verticales. El modelo conceptual considera que en los bordes (límites de la cuenca) los flujos de entrada son nulos, y los cálculos para el Balance Hidrológico se basan en estimaciones de volúmenes de extracción de agua subterránea según los caudales otorgados por la DGA. Las conclusiones más relevantes fueron: *“La componente más determinante en el estado de los acuíferos es la explotación del agua subterránea, la que pasó de un promedio (por período) de 421 l/s (1979-1993) a 1431 l/s (1994-2008) y posteriormente, a 2673 l/s (2009-2018)”* (pág. 97). Estas extracciones exceden la capacidad natural de recarga del acuífero. Para la cuenca del Río Petorca, sugieren que se debe reducir la extracción en un 41% para la preservación del *“embalse subterráneo”*.

Rybertt (2019), en su trabajo de tesis, se propuso definir el modelo conceptual hidrogeológico del funcionamiento del acuífero de Petorca en el sector alto de la cuenca homónima, estableciendo su hidrodinámica y piezometría, evolución hidroquímica del agua subterránea y el Balance Hidrológico del acuífero, con base en el monitoreo de 41 pozos. Obtuvo datos piezométricos y fisicoquímicos mediante un equipo multiparámetro, y estableció que la geometría del acuífero se encuentra principalmente controlada por fallas N-S a NW-SE (Sistema Hierro Viejo – Los Tornos y Sistema Quebrada de Castro), que forman un descenso del “basamento” y, por lo tanto, el relleno fluvio-aluvial tendría un mayor espesor. La cartografía piezométrica realizada por Rybertt, utilizada en el presente estudio como referencia (Fig. 52),

consideró las laderas de los cerros como fronteras impermeables, por lo que la dirección de flujo del agua subterránea resultó paralela a los flujos superficiales. Destaca el sector entre la Ñipa y Hierro Viejo, donde el nivel piezométrico supera la cota superficial, generándose una “piscina natural”. El resto de los lugares visitados (cuenca Pedernal, El Sobrante y Petorca hasta M. Montt) se encuentran sin flujo superficial, excepto en la cabecera de las subcuencas. Respecto a la caracterización hidroquímica, con base en datos recopilados de la DGA, en El Sobrante existen aguas bicarbonatadas cálcicas, en Pedernal bicarbonatadas-sulfatadas sódicas, y en Petorca bicarbonatadas cálcico-sódicas. Los registros en Pedegua muestran un descenso del nivel estático desde 3 a más de 20 m, entre los años 2013 y 2018.

#### 4.8. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE RECARGA Y DESCARGA

La manifestación superficial de una **zona de descarga** más evidente es la presencia de cuerpos de agua superficial de carácter perenne, es decir, se mantiene activo durante todo el año independiente de los ciclos climáticos estacionales. Estos cuerpos logran sobrevivir a las épocas de escasez de precipitaciones gracias al aporte continuo del agua subterránea (flujo base). Dentro de estas manifestaciones se incluyen la presencia permanente de agua, zonas de anegamiento, inundaciones, manantiales (vertientes) y presencia de lodo (Kachadourian-Marras *et al.*, 2020). Las zonas de descarga proporcionan las evidencias más adecuadas para identificar los sistemas de flujo de agua subterránea, ya que al finalizar su recorrido el agua ha adquirido concentraciones químicas indicativas y una serie de propiedades fisicoquímicas (temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto y potencial redox) que son traspasadas a los suelos en la zona de descarga. La manifestación en superficie de las zonas de descarga de flujos regionales es más evidente respecto a los otros tipos de flujos (intermedios y locales), ya que el agua ha tenido más tiempo y espacio para interactuar con el material geológico. Por ejemplo, los suelos asociados a descargas regionales están permanentemente inundados (gleysoles), son especialmente salinos y alcalinos, bien desarrollados, con alto contenido de materia orgánica y pueden presentar rasgos hidromórficos (moteados y concreciones de Fe y Mn); la vegetación es freatófita y hasta halófila (tolerante a alto contenido de sales) (Peñuela y Carrillo-Rivera, 2012).

En cambio, las **zonas de recarga** son más difíciles de identificar por la escasez de evidencias superficiales. Se pueden utilizar indicadores como zonas topográficamente elevadas, rocas aflorantes con alta conductividad hidráulica, y alta profundidad del nivel freático. Los suelos son más ácidos, poco salinos, pobremente desarrollados y con baja proporción de materia orgánica. La vegetación adaptada a este tipo de ambiente es xerófila (con bajos requerimientos de agua) y con largas raíces para alcanzar el nivel freático que se encuentra a grandes profundidades (Peñuela y Carrillo-Rivera, 2012).

En síntesis, al aplicar la TSFAG para diferenciar zonas de recarga y descarga, surgen los siguientes indicadores:



Tabla 4.2. Indicadores para diferenciar zonas de recarga y descarga de agua subterránea. Basado en los trabajos de Peñuela y Carrillo-Rivera (2012) y Kachadourian-Marras et al. (2020).

Indicador	Zona de Recarga	Zona de Descarga
Topoformas	Zonas topográficamente altas	Zonas topográficamente bajas
Nivel freático	Profundo	Somero
Cuerpos de agua	Ausencia de cuerpos de agua	Presencia de cuerpos de agua, manantiales, áreas permanentemente inundadas
Rasgos litológicos	Rocas con alta permeabilidad y conductividad hidráulica, presencia de fallas y fracturas	Predominio de suelos, rocas altamente meteorizadas
Suelo	Suelos pobremente desarrollados, ácidos, con baja salinidad y materia orgánica	Suelos permanentemente inundados (gleysoles), bien desarrollados, más salinos y alcalinos, con alto contenido de materia orgánica
Vegetación	Xerófita	Freatófita, halófila

En el presente estudio se pudo observar lo siguiente:

Respecto a la presencia de vegas y humedales en la parte oriental de la comuna de Petorca, no fue posible acceder a ellos para identificar sus características; sin embargo, estos cuerpos están clasificados como continentales palustres (es decir, de agua dulce) y emergentes (con vegetación que sobresale del agua) (Edáfica, 2020). Por tanto, es probable que correspondan a zonas de descarga de flujos locales (delimitadas en azul en la Fig. 35).

Además, las vertientes o manantiales indican zonas de descarga, que a juzgar por la baja temperatura del agua y su intermitencia controlada por patrones climáticos (estaciones lluviosas), se infiere que corresponden a descargas de flujos locales. Aquellos manantiales indicados por los informantes consultados durante el trabajo de campo (enero, 2020) se muestran como puntos azules en la Fig. 35.

En los trabajos revisados en la sección 4.7 se sugiere que los fondos de los valles fluviales representan zonas de recarga así como de descarga de agua subterránea (delimitado en amarillo en la Fig. 35), ya que los depósitos fluviales permiten una fluida comunicación entre los ríos y los flujos subterráneos. En dichos trabajos se indica que la dirección del flujo subterráneo es paralelo al curso de los ríos; sin embargo, todos los datos piezométricos provienen de las cajas de los ríos, llanuras de inundación o terrazas fluviales, por tanto, se desconoce el movimiento del agua fuera de estos sectores. Por otro lado, según información recabada en la Fase I del trabajo de campo (enero, 2020), trabajadores mineros han reportado la existencia de abundante agua que brota desde las paredes rocosas en las partes altas de los cerros, donde es probable que existe un factor estructural (fallas y fracturas) que facilita la circulación de agua.

En relación a los indicadores de vegetación, en este estudio no fueron de mucha utilidad ya que toda la vegetación (original) presente es xerófita, es decir, está adaptada a condiciones de aridez. Un dato que puede resultar útil es la profundidad que pueden alcanzar las raíces de algunos árboles del bosque esclerófilo Zona Central de Chile, como *Lithrea caustica* (litre) con

5 m, y *Quillaja saponaria* (quillay) con 7-8 m (Giliberto y Estay, 1978), lo que representa una aproximación de la profundidad a la que se encontraría el nivel freático (color verde en Fig. 35). El resto de la vegetación presente desarrolla raíces someras.

Por su parte, la información de la distribución de los tipos de suelo (Fig. 35) es insuficiente para diferenciar zonas de recarga y descarga, ni menos asociarlas a una determinada jerarquía de flujo de agua subterránea. Por último, las zonas desprovistas de vegetación, que se encuentran preferentemente en los sectores topográficamente elevados, donde prácticamente no hay desarrollo de suelo y la roca se encuentra expuesta, representan zonas de recarga (delimitadas en rojo en la Fig. 35), donde la infiltración del agua es probablemente facilitada por los sistemas de fracturamiento y fallamiento.

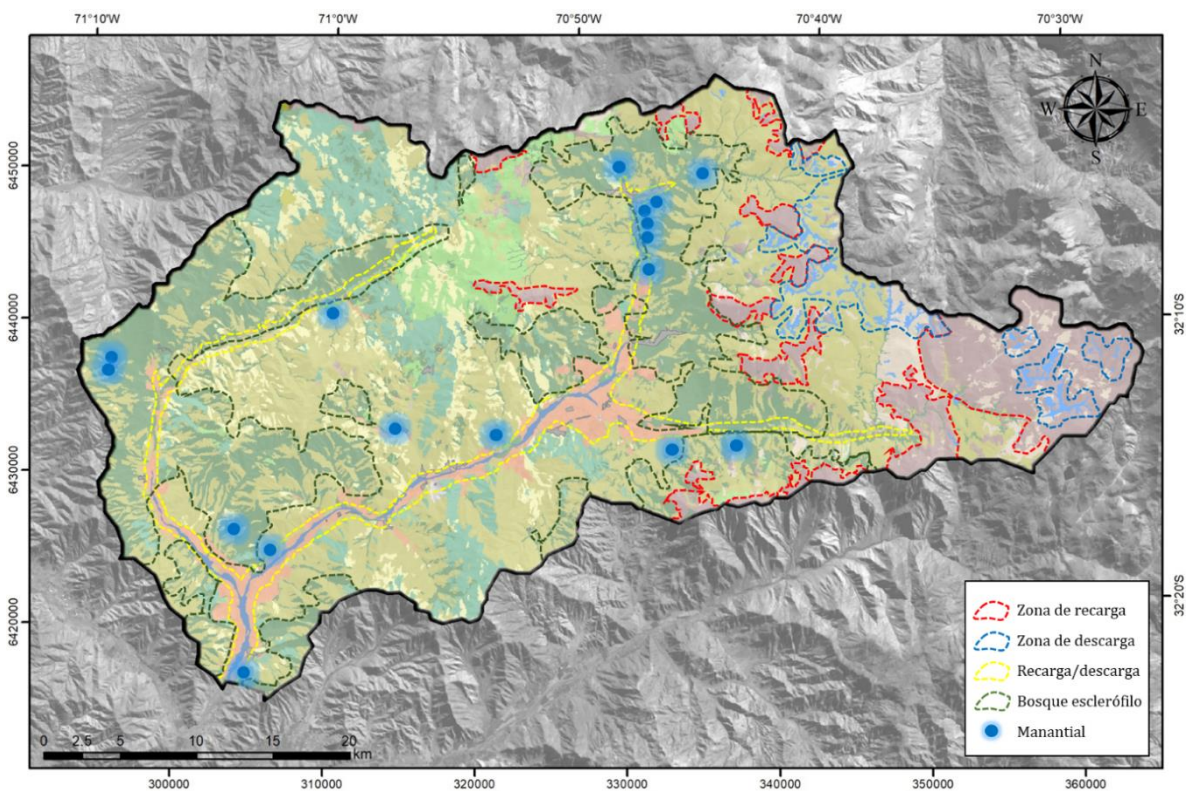


Fig. 35. Delimitación de zonas de recarga y descarga con base en la Fig. 31. Los manantiales (vertientes) mostrados son aquellos indicados por informantes en la Fase I del trabajo de campo (enero, 2020).

#### 4.9. IDENTIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Con el fin de identificar los sistemas de flujo de agua subterránea (SFAS) que se manifiestan en la comuna de Petorca, y conocer los procesos y condiciones presentes en su recorrido, se realizó la medición en campo de parámetros fisicoquímicos del agua y la toma de muestras para posterior análisis en laboratorio, con el fin de determinar su composición química e isotópica. En febrero de 2021 se recolectó un total de 16 muestras en 15 pozos y 1 manantial (P07), incluyendo 2 muestras externas a la zona de estudio (P02 y P03, pertenecientes a la cuenca del Río La Ligua) para comparación, y 2 muestras duplicadas (P01 = P05 y P11 = P12) para controlar la certeza de los resultados entregados por los laboratorios. Los puntos de medición y muestreo se exhiben en la Fig. 36.

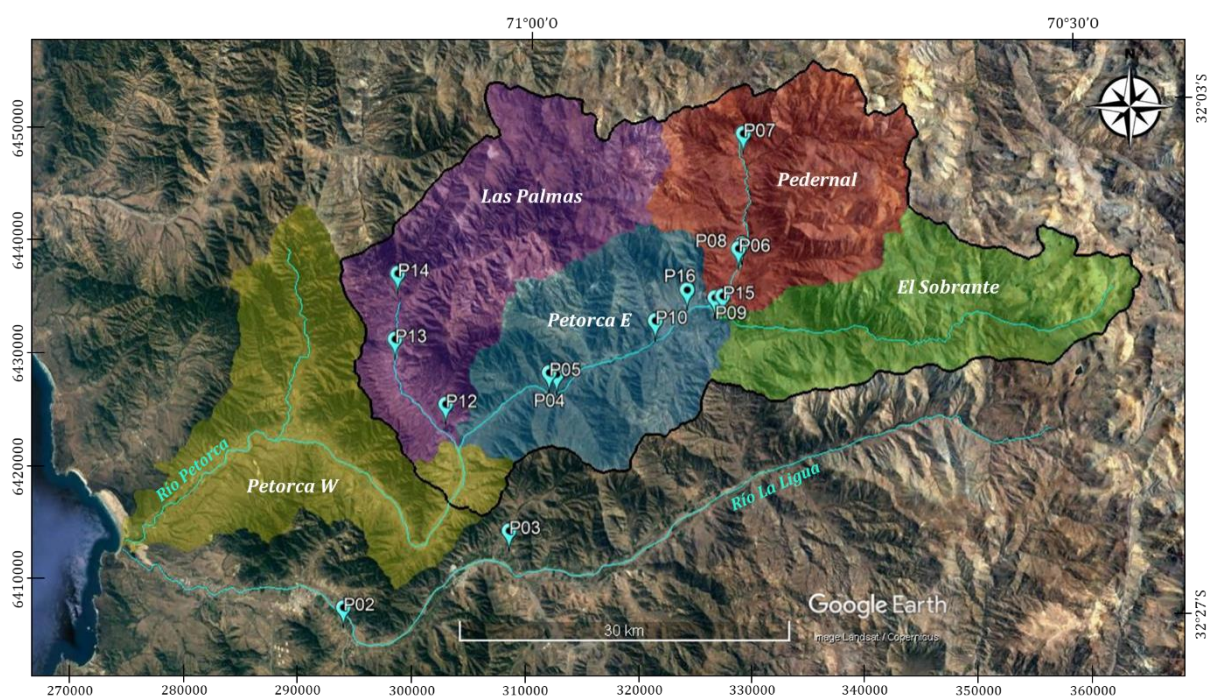


Fig. 36. Ubicación de los puntos de muestreo (febrero, 2021), distribuidos en los sectores acuíferos (DGA, 2014) de la cuenca de Petorca; coordenadas en la Tabla 4.3. En negro se delimita la Comuna de Petorca.

Tabla 4.3. Identificación de los puntos de muestreo y coordenadas UTM (datum WGS 84, zona 19H).

Punto	E	N	m s.n.m.	Prof. pozo	Localidad	Sector acuífero (DGA)
P02	294317	6405033	91	21 m	El Carmen	Río La Ligua Pueblo
P03	309502	6412410	225	60 m	Los Molinos	Río La Ligua Cabildo
P04	313650	6426697	441	41 m	La Ñipa	Río Petorca Oriente
P05=P1	312959	6426843	454	120 m	El Peñón	Río Petorca Oriente
P06	329914	6438314	739	80 m	Calle Larga	Río Pedernal
P07	330037	6448399	1062	(manantial)	Pedernal	Río Pedernal
P08	330217	6438730	752	48 m	Chalaco	Río Pedernal
P09	327873	6433873	688	80 m	Chincolco	Río del Sobrante

P10	322483	6431670	574	18 m	Río Tinto	Río Petorca Oriente
P11=P12	303527	6423804	329	23 m	Sta. Julia	Estero Las Palmas
P13	298918	6429599	441	no informado	Palquico	Estero Las Palmas
P14	299111	6435504	563	42 m	Las Palmas	Estero Las Palmas
P15	328581	6434034	650	85 m	V. Los Olmos	Río del Sobrante
P16	325327	6434498	617	70 m	Los Comunes	Río Petorca Oriente

#### 4.9.1. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS MEDIDOS EN CAMPO

Para determinar y caracterizar los SFAS de un área determinada, se requiere conocer la variación y distribución de los parámetros físicoquímicos del agua subterránea, como lo son la temperatura del agua, el pH, el potencial redox, conductividad eléctrica, concentración de oxígeno disuelto y alcalinidad. Tal como se exhibe en el marco teórico (sección 4.1; Fig. 23), estos parámetros dependen fuertemente de las condiciones del medio de circulación y, por consiguiente, pueden variar significativamente una vez que el agua subterránea entra en contacto con la atmósfera. Por tal motivo, es indispensable que su medición se realice en campo, al momento de tomar las muestras que serán analizadas en laboratorio, para asegurar que los valores sean lo más cercano posible a las condiciones originales del agua. La metodología de calibración de los equipos (Fig. 38) y medición en campo se detalla en el ANEXO 1. A continuación se indica una breve descripción de cada parámetro medido.

- **Temperatura del agua subterránea (T):** está determinada por el gradiente geotérmico presente durante su recorrido subterráneo. A mayor profundidad, mayor temperatura alcanzará el agua. Se debe registrar, además, la temperatura ambiental.
- **pH:** indicador químico de la concentración de iones de hidrógeno ( $H^+$ ) en una solución, lo cual determina su capacidad para neutralizar ácidos. Una solución es ácida si su pH es menor a 7, o alcalina si su pH es mayor a 7. El agua subterránea recientemente infiltrada tiene un pH ligeramente ácido, y tenderá a hacerse más alcalina mientras permanezca por más tiempo en ambiente subterráneo.
- **Potencial óxido-reducción (Eh):** medida de la energía de una reacción de óxido-reducción (donde ocurre una transferencia de electrones) que puede convertirse en energía eléctrica. El Eh es positivo en un ambiente oxidante (presencia de oxígeno libre), y negativo en un ambiente reductor (ausencia de oxígeno libre). Estas variaciones influyen en la solubilidad/precipitación de los minerales, por tanto, determinan qué minerales pueden disolverse del medio rocoso para integrarse al agua subterránea, y qué minerales pueden precipitar o separarse del agua.
- **Oxígeno disuelto (O.D.):** concentración de oxígeno gaseoso disuelto en el agua. El O.D. disminuye conforme el agua subterránea se aleja de la influencia atmosférica al circular a mayor profundidad.
- **Conductividad eléctrica (C.E.):** capacidad del agua para conducir un flujo de corriente eléctrica. Es el recíproco de la resistencia en ohmios medida entre caras opuestas de un  $cm^3$  de una solución acuosa a una temperatura específica. Esta propiedad es proporcional a la



concentración de iones disueltos en el agua, ya que son los que pueden transferir corrientes eléctricas en un medio acuoso. Por ello, permite inferir de manera indirecta la salinidad del agua (STD = sólidos totales disueltos), la cual se espera que sea mayor cuanto mayor sea la capacidad del agua para disolver los minerales de las rocas por las que circula. Este proceso es facilitado por factores como alta T y bajo pH, y tiempo suficiente de interacción agua-roca.

Los parámetros fisicoquímicos medidos en campo se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Parámetros fisicoquímicos medidos en campo. T: temperatura del agua, Eh: potencial de óxido-reducción, O.D.: oxígeno disuelto, C.E.: conductividad eléctrica.

Punto	Localidad	T (°C)	Eh (mV)	O.D. (%)	O.D. (mg/l)	C.E. (µS/cm)	pH
P02	El Carmen	24.7	221	66	6.1	557	6.5
P03	El Molino	23.5	147	48	3.9	629	6.97
P04	La Ñipa	20.7	162	54	4.9	227	7.02
P05	El Peñón	21.8	177	59	5.1	758	6.80
P06	Calle Larga	18.2	20	67	6.3	105	6.68
P07	Pedernal	32.4	155	85	5.9	353	7.62
P08	Chalaco	23.7	66	59	4.9	405	6.56
P09	Chincolco	20.8	192	45	4.0	486	6.80
P10	Río Tinto	18.2	122	54	5.0	668	6.64
P12	Sta. Julia	18.9	166	82	7.4	486	6.66
P13	Palquico	23.0	153	122	9.9	618	6.67
P14	Las Palmas	21.6	159	45	4.0	675	6.48
P15	V. Los Olmos	20.3	140	63	5.7	447	6.39
P16	Los Comunes	21.9	-5	83	7.3	474	6.79

La distribución de las muestras agrupadas en rangos de temperatura (Tabla 4.5) se exhibe en la Fig. 37. La temperatura más alta observada (32 °C) corresponde a la muestra tomada en la localidad de Pedernal (P07); sin embargo, esta muestra proviene de un manantial encausado por una tubería de pvc por varias decenas de metros, por lo que es probable que la temperatura esté sobrevalorada. Dado que no fue posible acceder directamente al manantial, se decidió de todas formas tomar una muestra y medir parámetros para obtener una aproximación a la única muestra de manantial accesible en este estudio.

Las temperaturas más bajas (18-19 °C) se manifestaron en los pozos de Río Tinto (10), Calle Larga (P06) y Santa Julia (P12), mientras que las muestras de Palquico (P13), Chalaco (P08) y La Ligua (P02 y P03; fuera del área de estudio) presentan mayor rango de temperatura (23-25 °C). La temperatura es un importante criterio para definir jerarquías de sistemas de flujo de agua subterránea, que sugiere que las muestras más frías corresponden a flujos más jóvenes y someros, mientras que las más cálidas provienen de flujos más longevos y profundos. Este criterio será complementado luego con la química del agua en el capítulo siguiente; sin embargo, los contrastes de temperatura no son significativos y sus bajos valores sugieren la presencia de sistemas de flujo de tipo local.



Tabla 4.5. Agrupación de muestras según rangos de temperatura (distribución en Fig. 37).

Muestra	Localidad	Sector acuífero DGA	T (°C)
P10	Río Tinto	Petorca	18 - 19
P06	Calle Larga	Pedernal	
P12	Sta. Julia	Las Palmas	
P15	Valle Los Olmos	El Sobrante	20 - 22
P04	La Ñipa	Petorca	
P09	Chincolco	El Sobrante	
P14	Las Palmas	Las Palmas	
P05	El Peñón	Petorca	
P16	Los Comunes	Petorca	
P13	Palquico	Las Palmas	23 - 25
P03	El Molino	La Ligua	
P08	Chalaco	Pedernal	
P02	El Carmen	La Ligua	
P07	Pedernal	Pedernal	> 30*

\*probablemente alterada

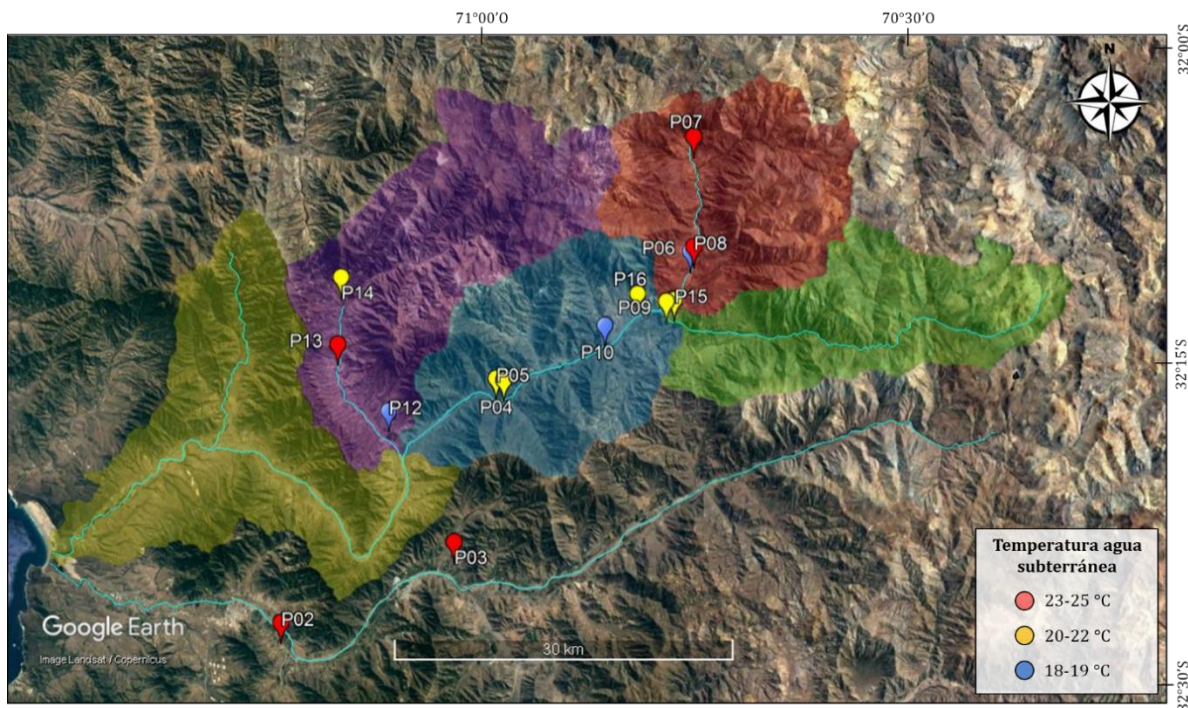


Fig. 37. Distribución de la temperatura del agua subterránea. Los valores de cada punto de muestreo se encuentran en la Tabla 4.5.

Destaca el ambiente ligeramente reductor identificado en el pozo de APR Los Comunes (P16: Eh = -5 mV), cuya profundidad es de 70 m. Cabe mencionar que este pozo no se encuentra en funcionamiento para abastecimiento de agua potable por presentar inadecuada calidad del agua, y que fue puesto en funcionamiento para efectos de este estudio. Antes de comenzar a medir, se hizo funcionar por 30 min, donde se observó una coloración roja del agua, abundante

aire y sedimentos en suspensión, un flujo intermitente y presión inestable, y un olor que sugiere presencia de ácido sulfúrico ( $H_2S$ ). El operador del pozo comentó que a 50 m de profundidad se encuentra un nivel con sulfuros de cobre, que presenta 0.60 ppm de Cu y 0.02 ppm de As. Además, señaló que al Norte de este pozo hay una planta procesadora de Cu y Mo, llamada Antawara, operativa desde hace 4 años. Así fue corroborado por información asequible en la web<sup>49</sup>: se trata de una planta de concentración de cobre por flotación (3,000 ton/mes), mineral provisto por mineros locales de la comuna de Petorca, inaugurada en noviembre de 2017. Cuenta con un depósito de relaves (jale) dispuesto en embalse, que según el catálogo de Relaves del SERNAGEOMIN, se emplaza a unos 2.5 km al NW del pozo.

Esta respuesta reductora ( $Eh < 0$ ) del agua subterránea en el pozo de Los Comunes (P16, 70 m de profundidad) es coherente con la presencia de sulfuros, ya que el azufre en su estado reducido ( $S^{2-}$ ) forma sulfuros de baja solubilidad con la mayoría de los metales disponibles; en cambio, en ambientes oxidantes ( $Eh > 0$ ) donde está disponible el oxígeno, el azufre se oxida ( $S^{6+}$ ) y tiende a formar sulfatos ( $SO_4^{2-}$ ) (Hem, 1985). Los pozos de Calle Larga (P06; profundidad = 80 m;  $Eh = 20$  mV) y Chalaco (P08; profundidad = 48 m;  $Eh = 66$  mV), separados por unos 515 m y ubicados a 6 km aproximadamente del pozo de Los Comunes, también tienen valores notablemente más reductores, en relación con el resto de los valores medidos (122-221 mV), por lo que se presume la influencia de esta capa sulfurada también en estos pozos, ubicados aguas arriba de Los Comunes. En el siguiente subcapítulo de hidrogeoquímica se analizará el rol de los depósitos hidrotermales (yacimientos metálicos) en los patrones fisicoquímicos observados en el agua subterránea. El valor más oxidante se obtuvo en el pozo de Chincolco (P09; profundidad = 80 m;  $Eh = 192$  mV), ubicado justamente a unos 2.5 km de Los Comunes hacia el SE, al otro lado del Río Petorca, y en El Carmen (P02; profundidad = 21 m;  $Eh = 221$  mV) en el Valle de La Ligua.

Respecto al contenido de oxígeno disuelto en el agua, varía entre 4.0 y 9.9 mg/l, correspondientes a los pozos de Chincolco (P09) y Palquico (P13), respectivamente, indicando diferentes grados de influencia atmosférica en el agua subterránea. La conductividad eléctrica varía entre 105  $\mu S/cm$  (Calle Larga, P06) y 758  $\mu S/cm$  (El Peñón, P05), lo cual muestra diferente intensidad o tiempo de interacción agua-roca.

## Alcalinidad

La alcalinidad es la capacidad de una solución acuosa filtrada (con membrana de poros  $\leq 0.45$   $\mu m$ ) para neutralizar un ácido, correspondiente a la suma de las bases que reaccionan con un ácido fuerte. En las aguas naturales, cuyo pH generalmente varía entre 6 y 9, estas bases pueden estar constituidas, en forma minoritaria, por iones de ácido silícico ( $[SiO_x(OH)_{4-2x}]_n$ ), boratos ( $BO_3^{3-}$ ), bisulfuros ( $HS^-$ ), hidróxidos ( $OH^-$ ) y aniones orgánicos. Sin embargo, los mayores

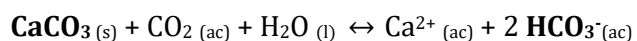
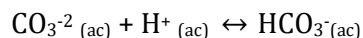
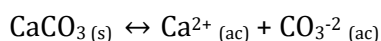
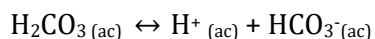
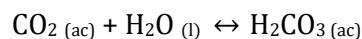
---

<sup>49</sup> <https://twitter.com/itvpetorca/status/929019669251612673>; <https://pertinencia.sea.gob.cl/sea-pertinencia-web/services/public/document/C106113E-498F-E81D-E053-0A060F0AC813>

constituyentes son los carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ); por ello, es posible aproximar el valor de la alcalinidad a la suma de las concentraciones de estas bases:

$$\text{Alcalinidad total} = \text{HCO}_3^- + 2\text{CO}_3^{2-}.$$

La alcalinidad se relaciona con el sistema de carbonatos formado por sus ácidos y bases conjugadas: dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), iones de bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ) y de carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Los carbonatos precipitan y se disuelven mediante reacciones reversibles y en cadena, que se indican a continuación:



El  $\text{CO}_2$ , presente en la atmósfera y en el suelo, se disuelve en el agua formando  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , que se disocia en iones de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{H}^+$ . El  $\text{H}^+$  es muy reactivo y reacciona con los iones de  $\text{CO}_3^{2-}$ , provenientes de la disolución de  $\text{CaCO}_3$ , generando más  $\text{HCO}_3^-$ .

Es esencial medir la alcalinidad en campo ya que esta propiedad puede verse alterada luego de que la muestra de agua es extraída de su fuente, por procesos como disolución de gases, precipitación de  $\text{CaCO}_3$  y oxidación de metales.

La alcalinidad es el único parámetro que no se mide con un equipo electrónico, sino que se determina mediante un ensayo químico denominado titulación (Fig. 38C). Este método consiste en provocar la reacción de una muestra de agua con un ácido fuerte (ejemplo:  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) de concentración conocida. A medida que se añade el ácido, éste se disocia liberando  $\text{H}^+$ , por lo que el pH tiende a disminuir; sin embargo, los bicarbonatos del agua rápidamente se asocian con los iones de  $\text{H}^+$  formando  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , y con ello amortiguan la caída del pH. Cuando todos los bicarbonatos son consumidos, se alcanza el punto de equivalencia<sup>50</sup> ( $\text{pH} \approx 4.3$ ) y el agua pierde su capacidad amortiguadora. Al añadir la siguiente gota de ácido, el pH disminuye drásticamente. Por ello, el ácido debe ser añadido paulatinamente y controlando minuciosamente su volumen con un titulador digital. La variación inducida de pH se va midiendo con cierta frecuencia con un pHmetro (previamente calibrado).

Existen indicadores de alcalinidad que ayudan a determinar estos virajes claves de pH mediante el cambio de color de la solución. En este caso, se añadió Fenolftaleína y Verde de Bromocresol: si la muestra se tiñe de rosa con la Fenolftaleína, indica un pH sobre 8.3 y la presencia de  $\text{CO}_3^{2-}$ ; en caso contrario, el constituyente principal de la alcalinidad es el  $\text{HCO}_3^-$  y el pH es menor a 8.3. Con el verde de Bromocresol la solución adquiere un color verde azulado, que cambia a rosa al añadir el ácido en el momento en que es alcanzado un  $\text{pH} \approx 4.3$ . El volumen total de ácido añadido es directamente proporcional a la alcalinidad total de la muestra:

---

<sup>50</sup> Punto de equivalencia: punto en el cual la totalidad del  $\text{HCO}_3^-$  ha sido convertido en  $\text{H}_2\text{CO}_3$  por efecto de la adición de un ácido fuerte, generalmente encontrado alrededor de un  $\text{pH} = 4.3$ .

$$\text{Alcalinidad total} = \frac{\text{volumen ácido (ml)} * \text{concentración ácido (N)} * 50,000}{\text{Volumen muestra (ml)}}$$

Para calcular la alcalinidad a partir de la cantidad de ácido añadido a las muestras de agua subterránea, se utilizó el método de Gran, que consiste en una serie de funciones lineales que definen la curva de titulación (pH vs. volumen de ácido) más allá del punto de equivalencia, donde el aumento (exceso) de los iones de H<sup>+</sup> aportados por el ácido añadido describe un comportamiento lineal. Para asegurar la identificación del punto a partir del cual toda la alcalinidad ha sido titulada y los iones de H<sup>+</sup> comienzan a estar en exceso, se requiere continuar con la titulación una vez alcanzado el punto de equivalencia, hasta un pH ≤ 3.5 (USGS, 2012).

Los resultados obtenidos de alcalinidad se muestran en la Tabla 4.6; se excluye la muestra P02 por un error metodológico durante la medición.

*Tabla 4.6. Valores de alcalinidad obtenidos en campo, calculados a partir del método de Gran.*

Muestra	CaCO <sub>3</sub>		OH <sup>-</sup>		CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l	meq/l	mg/l
<b>P01=05</b>	3.73	186.75	0.00	0.00	0.00	0.10	3.73	227.60
<b>P03</b>	4.85	243.00	0.00	0.00	0.01	0.20	4.85	295.80
<b>P04</b>	2.54	127.00	0.00	0.00	0.00	0.10	2.53	154.70
<b>P06</b>	2.04	102.10	0.00	0.00	0.00	0.00	2.04	124.40
<b>P07</b>	2.51	125.45	0.00	0.00	0.03	0.75	2.48	151.35
<b>P08</b>	3.02	151.30	0.00	0.00	0.00	0.10	3.02	184.50
<b>P09</b>	1.53	76.50	0.00	0.00	0.00	0.10	1.53	93.15
<b>P10</b>	2.25	112.60	0.00	0.00	0.00	0.00	2.25	137.20
<b>P11=12</b>	3.61	180.60	0.00	0.00	0.01	0.10	3.61	220.10
<b>P13</b>	3.94	197.20	0.00	0.00	0.01	0.10	3.94	240.30
<b>P14</b>	3.72	186.30	0.00	0.00	0.00	0.00	3.72	227.10
<b>P15</b>	5.38	269.10	0.00	0.00	0.00	0.10	5.37	328.00
<b>P16</b>	3.58	178.90	0.00	0.00	0.01	0.20	3.57	217.80

En la Fig. 39 se han agrupado los valores de alcalinidad medida en campo en cada uno de los sectores acuíferos o subcuencas. Se observa que las muestras provenientes del sector El Sobrante presentan los valores extremos de alcalinidad (CaCO<sub>3</sub> = 76.5 - 269.1 mg/l; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> = 93.2 - 328.0 mg/l), altamente dispersos, mientras que en el Valle de Las Palmas la alcalinidad es más homogénea (CaCO<sub>3</sub> = 180.6 - 197.2 mg/l; HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> = 220.1 - 240.3 mg/l).



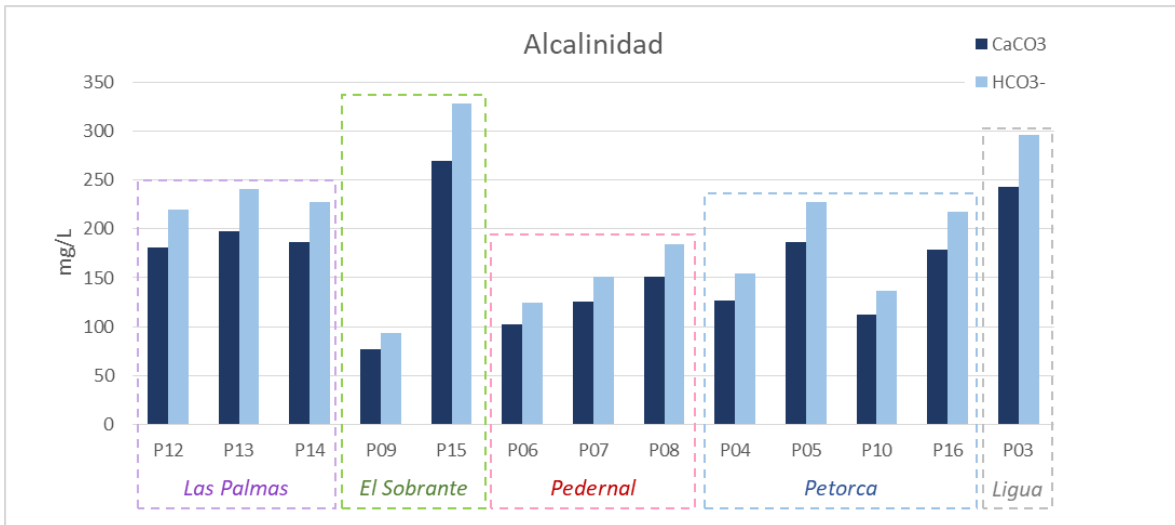


Fig. 39. Valores de alcalinidad medida en campo, agrupados por sector acuífero (DGA, 2014).



Fig. 38. Fotografías del trabajo de medición de parámetros fisicoquímicos del agua subterránea en campo (enero, 2021). A) Equipos utilizados. B) Celda de aislamiento y sensores. C) Prueba de alcalinidad.



#### 4.9.2. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA

El muestreo de agua subterránea se realizó siguiendo un estricto Protocolo de Campo (ANEXO 2). Las muestras colectadas fueron analizadas en el Laboratorio Activation Geological Services (AGS; Coquimbo, Chile) para conocer los constituyentes químicos del agua: elementos mayores, menores y trazas. Los métodos analíticos utilizados fueron Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICPMS) para cationes, Cromatografía Iónica (IC) para aniones, y Volurimetría para carbonatos y bicarbonatos. Los resultados obtenidos en laboratorio se detallan en el ANEXO 4, y los iones mayoritarios (concentración > 1.0 mg/l) se encuentran en la Tabla 4.7. El tratamiento y análisis de los datos reportados por el laboratorio incluyó el siguiente procedimiento:

**1. Cálculo del Error Analítico mediante Balance Iónico.** El balance iónico supone el balance de cargas entre aniones y cationes en una solución, es decir, la suma de aniones debe ser igual a la suma de cationes. Para el cálculo del error analítico, las concentraciones de los constituyentes químicos reportadas en mg/l (miligramos/litro) deben transformarse a meq/l (miliequivalentes/litro) mediante las siguientes ecuaciones:

a) Peso equivalente:  $Peq = \text{Peso molecular} / \text{carga del ion}$ . Para los iones mayoritarios, se tiene:

	Peso molecular (gr/mol)	Carga del ion	Peso equivalente
<b>Aniones</b>			
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	61.0	1	61.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	96.1	2	48.0
Cl <sup>-</sup>	35.5	1	35.5
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	62.0	1	62.0
<b>Cationes</b>			
Na <sup>+</sup>	22.9	1	22.9
K <sup>+</sup>	39.1	1	39.1
Ca <sup>2+</sup>	40.0	2	20.0
Mg <sup>2+</sup>	24.3	2	12.2

$$b) \text{ meq/l} = \frac{\text{Peso de la sustancia/litro}}{\text{Peso equivalente}} = \frac{\text{mg/l}}{\text{Peq}}$$

c) Para evaluar el balance iónico (meq/l) en un análisis químico, se calcula el error analítico (%) mediante la diferencia entre la suma de cationes y la suma de aniones (meq/l), según la siguiente ecuación:

$$\text{Error (\%)} = \frac{(\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones})}{(\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones})} * 100\%$$

En general, es aceptable un error inferior al 10%; sin embargo, un criterio más exigente considera diferentes rangos de error en función del total de aniones en meq/l (Lenntech<sup>51</sup>):

<sup>51</sup>Lenntech: <https://www.lenntech.com/calculators/accuracy/accuracy-water-analysis.htm>

Error aceptable	$\Sigma$ Aniones (meq/l)
$\pm 0.2\%$	0 - 3.0
$\pm 2\%$	3.0 - 10.0
$\pm 5\%$	10 - 800

Un desbalance iónico suele acusar errores acumulados en la fase de muestreo, o durante el proceso de análisis en el laboratorio, y/o manejo de las muestras por personal no calificado. Por eso, al momento de interpretar los datos hidroquímicos es necesario tener en cuenta que las muestras con error superior al 10% pueden no representar las características originales del agua y los procesos de interacción con el medio geológico, por lo que deben excluirse o ser manejadas con cautela.

**2. Identificación de muestras contaminadas.** Una concentración del **ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )** superior a 10 mg/l se considera anómala en el agua subterránea. La alteración del contenido normal de nitratos en el agua subterránea puede ser de origen orgánico (por descomposición de materia orgánica o residuos fecales, entre otros) o químico (por residuos industriales y uso de fertilizantes). Una concentración anómala de nitratos implica la posibilidad de que el resto de los constituyentes del agua se vean alterados, por lo que las muestras contaminadas pueden no representar la composición química original del agua subterránea ni reflejar los procesos de interacción con el medio geológico durante su trayectoria (OPS, 1980).

**3. Representación gráfica e identificación de las facies hidroquímicas.** Una vez identificadas las muestras con error aceptable y no contaminadas, se procede a representar los elementos mayores ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) de estas muestras en diagramas. Las concentraciones de aniones y cationes se normalizan para obtener el porcentaje de cada ion con respecto al total de aniones y cationes, respectivamente (la suma de cationes y aniones debe ser 100%). Utilizando el programa Diagrammes, se obtuvo 2 tipos de diagramas:

- Diagrama de Piper: gráfico triangular que permite discriminar las facies hidroquímicas del agua subterránea, en base al porcentaje (meq/l) de cada catión respecto al total de cationes, y de cada anión respecto al total de aniones. El triángulo de cationes ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) indica la composición de las rocas con las que interactuó el agua subterránea durante su trayectoria. El triángulo de aniones ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ) indica las edades relativas del agua subterránea e información sobre las condiciones de circulación.
- Diagrama de Stiff: polígonos construidos a partir de las concentraciones de aniones y cationes, donde la longitud de cada trazo es proporcional a la concentración. Permite visualizar la variabilidad composicional del agua subterránea.

En la Tabla 4.7 se encuentra la concentración de aniones y cationes, en mg/l y meq/l, destacándose en rojo los valores de nitratos que indican contaminación ( $\text{NO}_3^- > 10$  mg/l): muestras P01, P02, P03, P04, P05, P06 y P09. Los valores normalizados se exhiben en la Tabla 4.9. El balance iónico calculado se muestra en la Tabla 4.8; se considera aceptable el error para todas las muestras. Respecto a las muestras duplicadas (P01 = P05 y P11 = P12), se optó por trabajar con las muestras P05 y P12, en función de su menor porcentaje de error.

Los diagramas elaborados se exponen en la Fig. 40 y Fig. 41, según los porcentajes normalizados de aniones y cationes (meq/l) indicados en la Tabla 4.9.

Los iones que contiene el agua son liberados desde los minerales presentes de rocas mediante disolución química; el grado de disolución depende de la solubilidad de cada mineral, la composición química del agua y condiciones de presión, temperatura y pH. Entre los minerales más solubles se hayan aquellos que forman rocas sedimentarias químicas o bioquímicas, como calcita, dolomita, yeso, halita y silvita, liberando iones de Ca, Mg, Na, K, CO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> y Cl (iones mayoritarios). Mientras que los minerales silicatados formadores de rocas ígneas, como los feldespatos, plagioclasas, cuarzo, olivino, piroxenos, anfíboles, son mucho más insolubles y constituyen una fuente de iones minoritarios o elementos traza (Tóth, 2000) (Tabla 4.11).

Tabla 4.7. Concentración de aniones y cationes presentes en las muestras estudiadas, en mg/l y meq/l calculado a partir del peso equivalente (Peq) de cada ion. En rojo se destacan los contenidos de nitratos > 10 mg/l, indicando contaminación de origen orgánico.

Muestra	Aniones (mg/l)					Cationes (mg/l)				
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Σ	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Σ
P01	214.9	222.4	28.4	21.3	487.1	43.7	1.9	126.5	21.0	193.0
P02	149.0	101.1	39.1	76.2	365.4	28.1	0.5	62.3	29.7	120.6
P03	210.1	61.8	50.5	59.0	381.4	47.0	1.6	69.8	25.3	143.7
P04	194.8	304.0	21.2	22.3	542.3	34.2	1.4	123.3	33.7	192.4
P05	215.8	224.5	29.8	19.9	490.0	42.6	1.8	126.6	20.7	191.7
P06	154.7	107.7	7.2	39.6	309.1	19.9	0.9	67.7	16.5	105.0
P07	168.1	44.8	2.5	1.2	216.6	13.6	0.2	62.3	11.1	87.1
P08	160.4	77.5	7.1	10.9	255.9	17.3	0.7	60.3	15.9	94.2
P09	219.6	66.8	6.7	15.9	309.0	23.9	1.0	78.1	16.4	119.5
P10	171.9	246.6	16.2	1.2	435.9	28.2	1.0	105.5	22.6	157.3
P11	194.8	67.8	34.3	1.0	297.9	40.9	1.2	59.2	25.9	127.2
P12	200.6	68.8	35.5	0.9	305.8	40.7	1.2	59.1	23.4	124.4
P13	200.6	166.9	21.8	0.8	390.1	25.8	0.9	81.8	29.9	138.4
P14	196.7	280.4	39.3	8.0	524.4	36.3	1.2	110.8	38.2	186.5
P15	189.1	57.4	12.7	1.6	260.8	19.4	0.6	67.6	16.1	103.7
P16	183.4	154.4	13.2	5.0	356.0	26.2	1.0	89.4	16.8	133.4

Muestra	Aniones (meq/l)					Cationes (meq/l)				
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Σ	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Σ
Peq	61.0	48.0	35.5	62.0		22.9	39.1	20.0	12.2	
P01	3.52	4.63	0.80	0.34	9.30	1.90	0.05	6.32	1.74	10.01
P02	2.44	2.11	1.10	1.23	6.88	1.22	0.01	3.12	2.45	6.80
P03	3.44	1.29	1.42	0.95	7.11	2.04	0.04	3.49	2.09	7.67
P04	3.19	6.33	0.60	0.36	10.48	1.49	0.03	6.16	2.78	10.46

<b>P05</b>	3.54	4.68	0.84	0.32	9.38	1.85	0.05	6.33	1.71	9.94
<b>P06</b>	2.54	2.24	0.20	0.64	5.62	0.86	0.02	3.39	1.37	5.64
<b>P07</b>	2.76	0.93	0.07	0.02	3.78	0.59	0.00	3.12	0.92	4.63
<b>P08</b>	2.63	1.62	0.20	0.18	4.62	0.75	0.02	3.01	1.32	5.10
<b>P09</b>	3.60	1.39	0.19	0.26	5.44	1.04	0.03	3.91	1.36	6.33
<b>P10</b>	2.82	5.14	0.46	0.02	8.43	1.22	0.02	5.28	1.87	8.39
<b>P11</b>	3.19	1.41	0.97	0.02	5.59	1.78	0.03	2.96	2.14	6.91
<b>P12</b>	3.29	1.43	1.00	0.01	5.74	1.77	0.03	2.96	1.93	6.69
<b>P13</b>	3.29	3.48	0.61	0.01	7.39	1.12	0.02	4.09	2.47	7.70
<b>P14</b>	3.22	5.84	1.11	0.13	10.30	1.58	0.03	5.54	3.16	10.30
<b>P15</b>	3.10	1.20	0.36	0.03	4.68	0.84	0.02	3.38	1.33	5.57
<b>P16</b>	3.01	3.22	0.37	0.08	6.68	1.14	0.02	4.47	1.39	7.03

Tabla 4.8. Cálculo del porcentaje de error con base en el balance iónico. En verde se destacan los valores aceptables según el contenido de aniones.

Muestra	$\Sigma\text{Cat} - \Sigma\text{An (meq/l)}$	$\Sigma\text{Cat} + \Sigma\text{An (meq/l)}$	% Error	$\Sigma\text{Aniones}$
<b>P01</b>	0.706	19.307	3.656	9.301
<b>P02</b>	-0.079	13.681	-0.578	6.880
<b>P03</b>	0.561	14.772	3.799	7.105
<b>P04</b>	-0.019	20.947	-0.090	10.483
<b>P05</b>	0.567	19.318	2.934	9.376
<b>P06</b>	0.019	11.258	0.170	5.620
<b>P07</b>	0.847	8.404	10.084	3.778
<b>P08</b>	0.478	9.720	4.920	4.621
<b>P09</b>	0.893	11.766	7.590	5.436
<b>P10</b>	-0.039	16.824	-0.234	8.432
<b>P11</b>	1.322	12.497	10.577	5.588
<b>P12</b>	0.950	12.425	7.650	5.737
<b>P13</b>	0.312	15.095	2.068	7.391
<b>P14</b>	0.003	20.607	0.013	10.302
<b>P15</b>	0.894	10.252	8.717	4.679
<b>P16</b>	0.351	13.702	2.559	6.675

Tabla 4.9. Valores de aniones y cationes normalizados (meq/l).

Muestra	Aniones (%)					Cationes (%)				
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Σ	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Σ
<b>P01</b>	37.88	49.82	8.60	3.70	100	18.97	0.48	63.21	17.34	100
<b>P02</b>	35.50	30.62	16.02	17.85	100	17.95	0.19	45.82	36.03	100
<b>P03</b>	48.47	18.11	20.03	13.38	100	26.67	0.53	45.52	27.28	100
<b>P04</b>	30.46	60.42	5.69	3.43	100	14.19	0.33	58.89	26.58	100
<b>P05</b>	37.73	49.88	8.96	3.42	100	18.63	0.46	63.67	17.24	100

<b>P06</b>	45.13	39.91	3.60	11.35	100	15.32	0.39	60.07	24.22	100
<b>P07</b>	72.94	24.68	1.89	0.50	100	12.74	0.09	67.35	19.83	100
<b>P08</b>	56.91	34.96	4.35	3.79	100	14.73	0.33	59.11	25.82	100
<b>P09</b>	66.22	25.61	3.46	4.71	100	16.44	0.40	61.73	21.43	100
<b>P10</b>	33.42	60.92	5.42	0.24	100	14.59	0.30	62.88	22.22	100
<b>P11</b>	57.15	25.29	17.28	0.28	100	25.73	0.44	42.83	31.00	100
<b>P12</b>	57.32	24.99	17.44	0.25	100	26.49	0.44	44.19	28.88	100
<b>P13</b>	44.49	47.04	8.29	0.18	100	14.58	0.30	53.10	32.02	100
<b>P14</b>	31.30	56.70	10.75	1.26	100	15.31	0.30	53.76	30.63	100
<b>P15</b>	66.25	25.55	7.66	0.53	100	15.14	0.27	60.65	23.94	100
<b>P16</b>	45.04	48.17	5.57	1.21	100	16.24	0.35	63.62	19.79	100

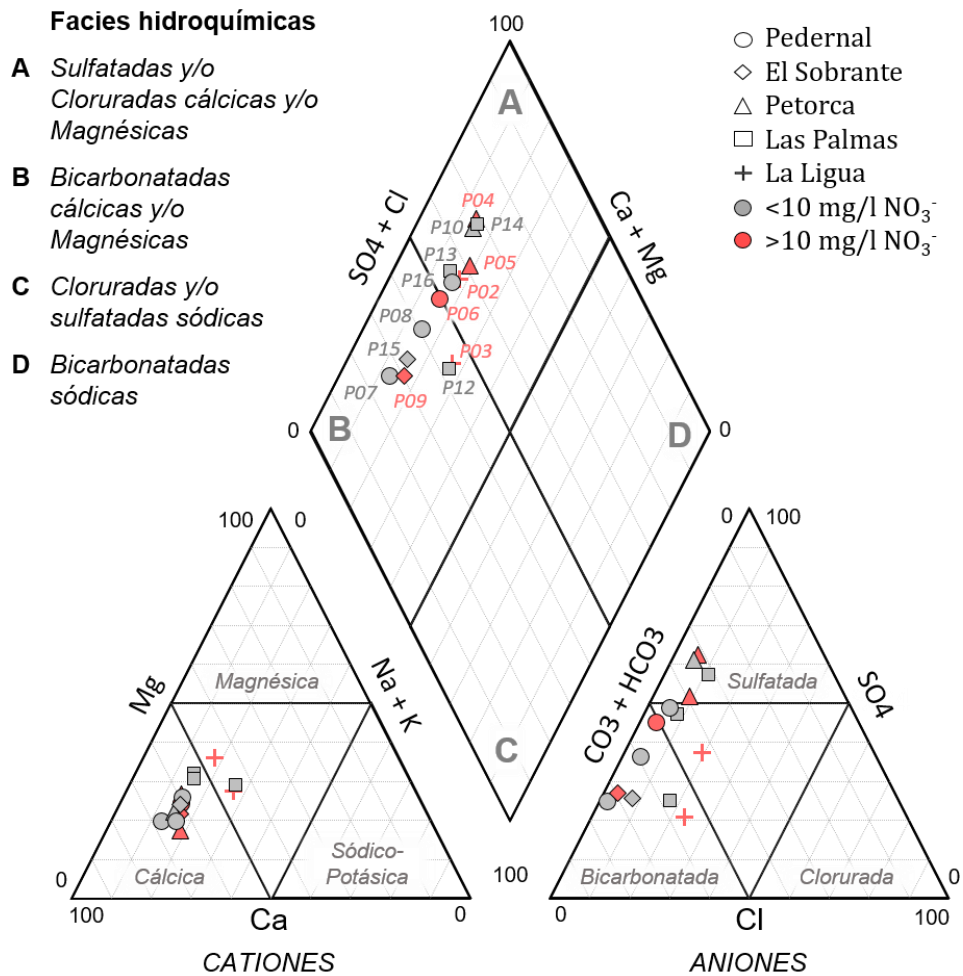


Fig. 40. Diagrama de Piper.

Con base en el diagrama de Piper, se observa que las muestras contaminadas (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > 10 mg/l) se comportan de forma bastante similar a las muestras no contaminadas, por lo que serán



incorporadas en la interpretación hidrogeoquímica, tomando en cuenta sus limitaciones. De esta manera, es posible establecer la presencia de dos tipos de facies hidroquímicas: (1) bicarbonatadas cálcicas y (2) sulfatadas cálcicas (Tabla 4.10).

En el triángulo de **aniones**, relacionado con la edad relativa del agua subterránea, se observa una evolución desde aguas bicarbonatadas a sulfatadas (Fig. 40). En los valles de Pedernal y El Sobrante, ubicados en el borde oriental, se presentan muestras bicarbonatadas, es decir, corresponden a flujos de agua de reciente infiltración, como la muestra P07. En cambio, en los valles de Petorca y Las Palmas el agua es sulfatada (a excepción de la muestra P12), lo que sugiere una mayor evolución o tiempo de residencia en ambiente subterráneo. Las muestras de La Ligua son bicarbonatadas (P03), que parecen evolucionar hacia la facies sulfatada (P02), y la mayor cercanía al campo clorurado seguramente se debe a que está alterada por contaminación (nitratos). Otro indicador de la edad relativa del agua es el Li, ya que se trata de un elemento conservativo, es decir, no suele formar compuestos ni precipitar, por lo que tiende a concentrarse en el agua con el paso del tiempo. El Li se encuentra en muy bajas concentraciones en las muestras estudiadas (<2 µg/l), lo cual reafirma el carácter joven del agua subterránea pero dificulta establecer jerarquías por su variación tan limitada.

Tabla 4.10. Facies hidroquímicas determinadas con base en el diagrama de Piper (Fig. 40) y contenido de Li (indicador de edad relativa del agua). En rojo se indican las muestras contaminadas ( $\text{NO}_3^- > 10 \text{ mg/l}$ ).

Sector	Muestra	Localidad	Facies hidroquímicas	Li µg/l
Pedernal	P06	Calle Larga	Bicarbonatada cálcica	<1
	P07	Pedernal	Bicarbonatada cálcica	<1
	P08	Chalaco	Bicarbonatada cálcica	<1
El Sobrante	P15	Valle Los Olmos	Bicarbonatada cálcica	<1
	P09	Chincolco	Bicarbonatada cálcica	<1
Petorca	P04	La Ñipa	Sulfatada cálcica	<1
	P05	El Peñón	Sulfatada cálcica	2
	P10	Río Tinto	Sulfatada cálcica	<1
	P16	Los Comunes	Sulfatada cálcica	1
Las Palmas	P12	Santa Julia	Bicarbonatada cálcica	2
	P13	Palquico	Sulfatada cálcica	2
	P14	Las Palmas	Sulfatada cálcica	1
La Ligua	P02	El Carmen	Sulfatada cálcica	<1
	P03	El Molino	Bicarbonatada cálcica	<1

Por su parte, el triángulo de **cationes**, indicativo del tipo de roca con la que interactuó el agua subterránea, apunta un carácter cálcico para todas las muestras, a excepción de P12, P02 y P03, que caen en el campo de cationes indiferenciados, siguiendo la tendencia general de evolución hacia el campo magnésico. Esto sugiere un componente predominantemente cálcico del medio geológico, conformado predominantemente por rocas volcánicas de composición intermedia, y sedimentarias (calizas, conglomerados, areniscas) (subcapítulo 4.4). Las muestras del Valle de Las Palmas (P12, P13 y P14; ubicadas en el extremo occidental de la comuna) y La Ligua (P02

y P03; fuera del área de estudio), presentan mayores contenidos de Mg y Na+K respecto al resto, lo que podría estar acusando un medio geológico diferente. Efectivamente, estos pozos se encuentran inmersos en diferente litología, respecto al resto de los pozos que están emplazados en rocas volcánicas y sedimentarias: en el Valle de Las Palmas afloran rocas intrusivas de composición intermedia-ácida (Unidad Chalinga), y las muestras de La Ligua se hayan sobre rocas jurásicas clásticas (Formación Quebrada de Pobre: conglomerados, areniscas, fangolitas), volcánicas (Formación Ajial: lavas y depósitos piroclásticos ácidos a intermedios) y dioríticas (Unidad Puerto Oscuro), junto a secuencias volcanoclásticas del Triásico (Formación La Ligua: tobas, brechas, areniscas, fangolitas, conglomerados) (Rivano, 1996).

A pesar de dicha diversidad litológica, y según la evidencia hidroquímica presentada, se trata de agua subterránea muy joven que poco tiempo tuvo para interactuar con el medio geológico, por lo que difícilmente puede llegar a concentrar cantidades apreciables de cationes como Mg, Na y K, que se encuentran en minerales muy poco solubles (como los silicatos formadores de rocas ígneas). En cambio, el Ca tiende a concentrarse más en este tipo de aguas, porque proviene de minerales más solubles (como minerales carbonatados) y entonces queda mayormente disponible (Tabla 4.11).

Respecto a los diagramas de Stiff (Fig. 41), se aprecia que las muestras de la parte inferior del Valle El Sobrante son químicamente homogéneas, al igual que las del Valle de Pedernal (los aniones de muestra P06 se ven un tanto alterados probablemente por estar contaminada por nitratos). En cambio, las muestras de los valles de Petorca y Las Palmas tienen una química más heterogénea. En el primer caso, se observa un incremento de los cationes desde la muestra topográficamente más elevada (P16) hacia las que se encuentran aguas abajo. Similar patrón se presenta en el Valle de Pedernal, pero con menor variabilidad. En cambio, en el Valle de Las Palmas, la muestra de mayor elevación (P14) es marcadamente más enriquecida en los iones de Ca, Mg y  $SO_4$ , que disminuyen progresivamente en las muestras que se encuentran aguas abajo. El enriquecimiento progresivo en cationes desde la parte alta de Pedernal hacia las zonas más bajas, podría dar cuenta del sentido de evolución del agua subterránea (de NE a SW), que coincide con la dirección de los cursos de agua superficial. La variación es mucho más evidente en el Ca que en el resto de los cationes, lo cual también es coherente con la mayor disponibilidad de este elemento que suele provenir de minerales más solubles (ejemplo: carbonatos).

En la Fig. 42 se han graficado los constituyentes mayoritarios del agua subterránea ( $> 1.0$  mg/l) y sólidos totales disueltos (STD) para ilustrar su variación respecto a la concentración del ion cloruro (elemento conservativo), utilizado como indicador de la evolución hidroquímica del agua. Considerando el conjunto de muestras no contaminadas ( $NO_3^- < 10$  mg/l), se observa una alta correlación ( $R^2 > 0.8$ ) positiva del  $Cl^-$  con  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  y STD, es decir, estos iones tienden a concentrarse a medida que evoluciona el fluido. El  $HCO_3^-$  proviene de la disociación de ácido carbónico (proveniente de la disolución de  $CO_2$  presente en el aire y suelo) en el agua y de la disolución de la calcita (Hem, 1985) (ver sección de Alcalinidad en capítulo 4.9.1); al avanzar la evolución hidroquímica se esperaría observar una disminución de  $HCO_3^-$  (por agotamiento del  $CO_2$ ), por lo que su acumulación en este caso permite inferir una fuente

carbonatada. El Na<sup>+</sup> puede provenir de la alteración de las plagioclasas (albita) presentes en las rocas ígneas de composición intermedia y ácida, y de feldespatos en los que se ha reemplazado K por Na. Otra fuente puede corresponder a depósitos evaporíticos salinos, los cuales son notoriamente más solubles, pero no se presentan en el registro geológico del área de estudio. El K es un poco menos común que el Na en rocas ígneas pero es más abundante en las rocas sedimentarias. La principal fuente de K en el agua subterránea es la alteración de feldespatos potásicos, micas y sales potásicas. Además, los organismos vegetales contienen K y al morir, el K se filtra al suelo por las lluvias o queda disponible por la descomposición gradual de la materia orgánica. El Mg es un constituyente mayor de minerales ferromagnesianos (olivino, piroxenos, anfíboles, biotita) en las rocas ígneas, y minerales de alteración como la clorita. También está presente en minerales de rocas sedimentarias como la brucita (hidróxido de Mg), magnesita y dolomita (carbonatos de Mg), e incluso en calizas; además, junto con el Ca son fuertemente adsorbidos por arcillas minerales, aunque el Mg es más soluble que el Ca (Hem, 1985).

Dado que en la zona de estudio se desarrollan actividades agrícolas, en el proceso de interpretación hidrogeoquímica se debe tener en cuenta las manifestaciones de retorno de agua por riego, ya que el suministro artificial de agua puede acelerar la lixiviación natural de los solutos del suelo y rocas superficiales, y luego tienden a acumularse en el flujo de drenaje, sobre todo en un contexto de escasas precipitaciones. El resultado suele ser un aumento de las concentraciones de STD, especialmente de sodio, sulfatos, cloruros y nitratos (Hem, 1985), tal como se observa en los pozos P02, P03, P04 P05, P06 y P09.

En síntesis, las características hidrogeoquímicas de las muestras estudiadas indican que el agua ha permanecido poco tiempo en ambiente subterráneo, por lo que no hubo tiempo suficiente y/o condiciones favorables para una mayor interacción entre el medio geológico y el agua. Por otro lado, debido a que las unidades geológicas estratificadas presentes en el área de estudio exhiben rasgos bastante similares entre ellas, y están conformadas por diversos tipos litológicos (rocas volcánicas intermedias-ácidas con intercalación de rocas sedimentarias clásticas y/o carbonatadas), es difícil diferenciar la proveniencia de los iones y establecer una relación entre la variación de cada ion y una formación geológica específica. Lo mismo ocurre con las rocas intrusivas, que comparten una composición intermedia-ácida, a excepción del Complejo Plutónico Illapel que presenta un enjambre de diques máficos en el sector de Frutillar Bajo (Subcuenca Las Palmas). En la Fig. 43 se muestra los minerales que componen los diferentes tipos de rocas ígneas según la composición del magma, y en la Tabla 4.11 se presenta un resumen de la posible asociación entre los iones del agua subterránea y las unidades geológicas de la comuna de Petorca.

Por último, los patrones químicos y fisicoquímicos del agua han sido probablemente alterados por actividades agrícolas, e influenciados por la presencia de depósitos minerales (ampliamente distribuidos en la comuna de Petorca), donde las fases sulfuradas jugarían un papel importante, como se verá a continuación.

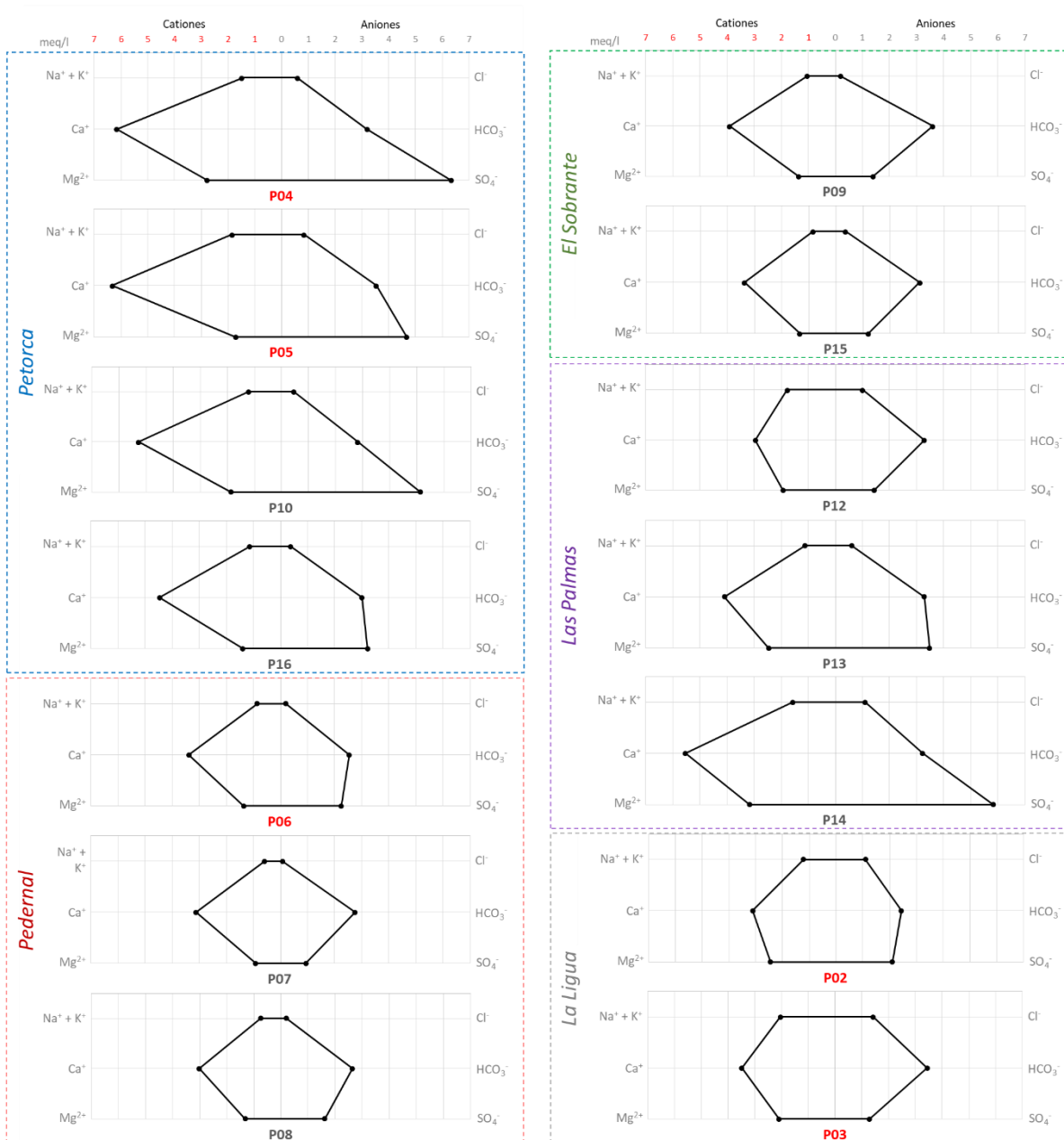


Fig. 41. Diagramas de Stiff, agrupados según los sectores acuíferos (DGA, 2014) de la Comuna de Petorca. En rojo se indican las muestras contaminadas ( $\text{NO}_3^- > 10 \text{ mg/l}$ ).

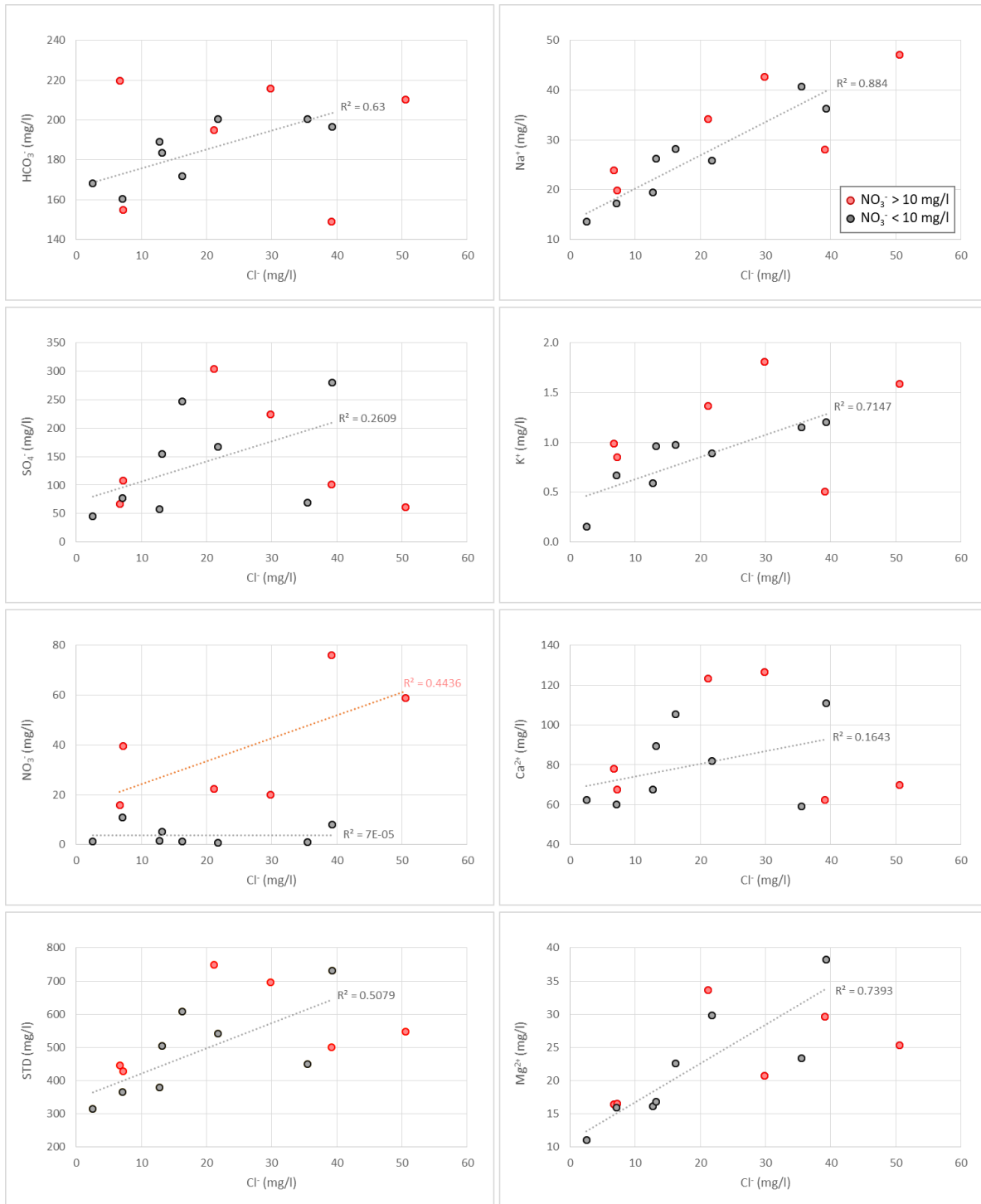


Fig. 42. Gráficos de variación de los componentes mayoritarios del agua subterránea (> 1.0 mg/l) vs Cl⁻, indicando el coeficiente de correlación de Pearson (R²) para el conjunto de muestras no contaminadas (NO₃⁻ < 10 mg/l). En rojo se destacan las muestras contaminadas (NO₃⁻ > 10 mg/l).



Tabla 4.11. Proveniencia de los iones mayoritarios y minoritarios presentes en el agua subterránea (Hem, 1985; Tóth, 2000), y su posible vinculación con las unidades geológicas del área de estudio.

Mineral	Fórmula química	Tipo de Roca	Iones aportados	Unidad geológica asociada
<i>Silicatos</i>				
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	Ígneas intermedias-ácidas, sedimentarias clásticas		Fm. Lo Prado, Fm. Veta Negra, Fm. Las Chilcas, Fm. Salamanca, Fm. Farellones, Fm. Confluencia, Dep. Q, C.P. Illapel, U. San Lorenzo, U. Fredes, U. Río Cerro Blanco
Albita (plagioclasa)	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Ígneas intermedias-ácidas, sedimentarias clásticas	Na	Fm. Lo Prado, Fm. Veta Negra, Fm. Las Chilcas, Fm. Salamanca, Fm. Farellones, Fm. Confluencia, Dep. Q, C.P. Illapel, U. San Lorenzo, U. Fredes, U. Río Cerro Blanco
Anortita (plagioclasa)	CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Ígneas básicas-intermedias, sedimentarias clásticas	Ca	Fm. Veta Negra, Fm. Salamanca, Fm. Farellones, Fm. Confluencia, Dep. Q, C.P. Illapel, U. San Lorenzo, U. Fredes, U. Río Cerro Blanco
Feldespatos	(K,Na)AlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Ígneas ácidas, sedimentarias clásticas	K, Na	Fm. Lo Prado, Fm. Las Chilcas, Fm. Salamanca, Fm. Farellones, Fm. Confluencia, Dep. Q, C.P. Illapel, U. San Lorenzo, U. Fredes, U. Río Cerro Blanco
Olivino	(Mg,Fe) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Ígneas básicas	Mg, Fe	C.P. Illapel (diques máficos)
Piroxeno	(Ca,Mg,Fe)SiO <sub>3</sub>	Ígneas básicas	Ca, Mg, Fe	C.P. Illapel (diques máficos)
Anfibol	(Ca,Na,K,Pb) <sub>0-1</sub> (Ca,Fe,Li,Mg,Mn,Na) <sub>2</sub> (Al,Cr,Fe,Mg,Mn,Ti) <sub>5</sub> (Al,Be,Si,Ti) <sub>6</sub> O <sub>22</sub> (OH,F,Cl) <sub>2</sub>	Ígneas intermedias	Ca, Na, K, Mg, Cl	Fm. Lo Prado, Fm. Veta Negra, Fm. Las Chilcas, Fm. Salamanca, Fm. Farellones, C.P. Illapel, U. San Lorenzo, U. Fredes, U. Río Cerro Blanco
<i>Filosilicatos</i>				
Biotita	K(Mg,Fe,Mn) <sub>3</sub> [(OH,F) <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )]	Ígneas ácidas-intermedias, sedimentarias clásticas	K, Mg, Fe	Fm. Lo Prado, Fm. Veta Negra, Fm. Las Chilcas, Fm. Salamanca, Fm. Farellones, Fm. Confluencia, Dep. Q, C.P. Illapel, U. San Lorenzo, U. Fredes, U. Río Cerro Blanco
Clorita	(Mg,Fe) <sub>3</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·(Mg,Fe) <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub>	Ígneas alteradas, sedimentarias clásticas	Mg, Fe, Mg, Fe	Fm. Lo Prado, Fm. Veta Negra, Fm. Las Chilcas, Fm. Salamanca, Fm. Farellones, Fm. Confluencia, Dep. Q, C.P. Illapel, U. San Lorenzo, U. Fredes, U. Río Cerro Blanco
Sericita	KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>	Ígneas alteradas, sedimentarias clásticas	K	Fm. Lo Prado, Fm. Veta Negra, Fm. Las Chilcas, Fm. Salamanca, Fm. Farellones, Fm. Confluencia, Dep. Q, C.P. Illapel, U. San Lorenzo, U. Fredes, U. Río Cerro Blanco
<i>Carbonatos</i>				
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	Calizas	Ca, HCO <sub>3</sub>	Fm. Lo Prado, Fm. Las Chilcas, Fm. Salamanca, Fm. Confluencia, Dep. Q
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Dolomías	Ca, Mg, HCO <sub>3</sub>	Ausente
<i>Sulfatos</i>				
Yeso	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	Evaporitas	Ca, SO <sub>4</sub>	Ausente
<i>Sales</i>				
Halita	NaCl	Evaporitas	Na, Cl	Ausente
Silvita	KCl	Evaporitas	K, Cl	Ausente

Fm.: Formación. Dep. Q: Depósitos cuaternarios. U.: Unidad. C.P.: Complejo Plutónico.

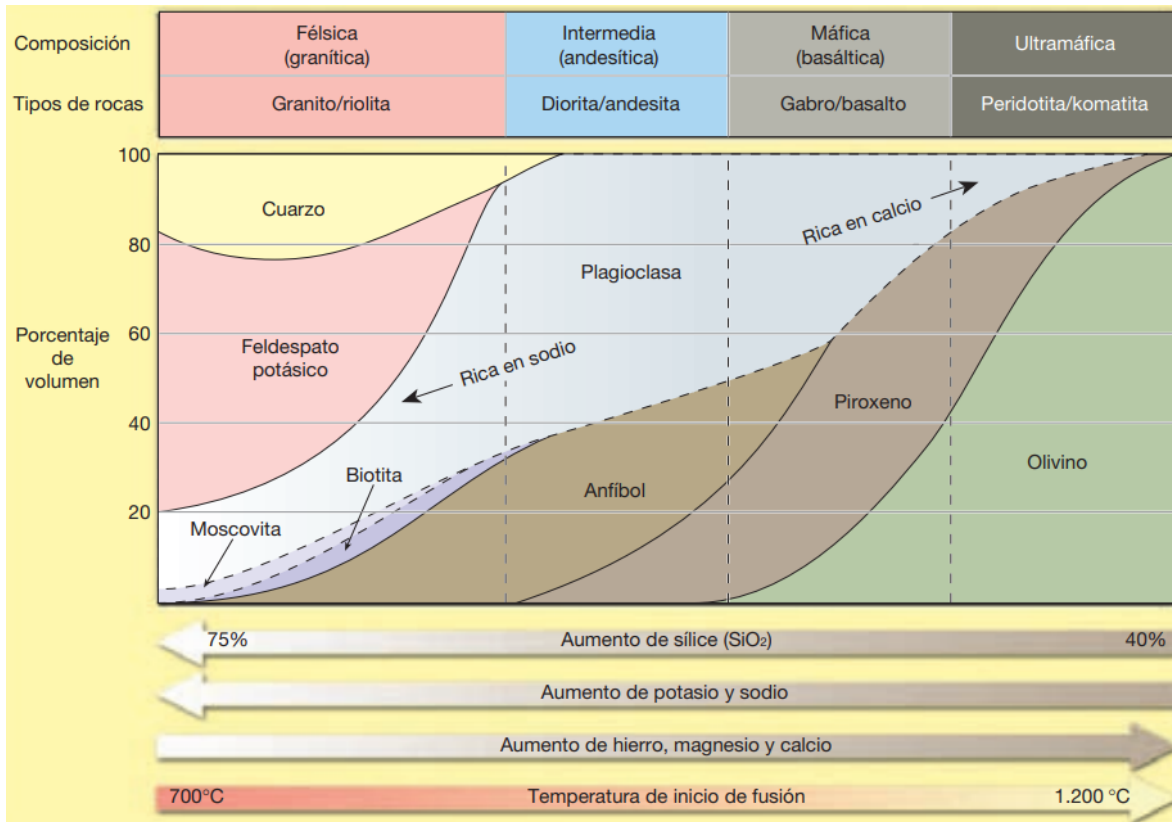


Fig. 43. Minerales formadores de rocas ígneas, según la composición de los magmas generadores. Tomado de Tarbuck y Lutgens (2005).

## Rol de los Depósitos Epitermales

En la comuna de Petorca existen numerosos depósitos epitermales polimetálicos de Au, Ag, Cu, Zn y Pb (Fig. 27). En el Distrito Minero El Bronce (8 km al Norte de Petorca), la mineralización está caracterizada (en orden de abundancia) por sulfuros y óxidos como pirita, esfalerita, calcopirita, galena, tenantita-tetraedrita, bornita, arsenopirita, pirrotita, hematita y magnetita. La ganga está compuesta por cuarzo (macizo, microcristalino, cristalino, amatista), y carbonatos como ankerita, siderita y barita. Esta mineralización está acompañada de alteración hidrotermal de la facies argílica avanzada<sup>52</sup>, sericítica<sup>53</sup>, argílica, carbonatada<sup>54</sup>, clorítica<sup>55</sup> y

<sup>52</sup> Alteración argílica avanzada: destrucción extrema de silicatos por medio de hidrólisis intensa, con la lixiviación de las bases o elementos alcalinos removidos de las rocas por fluidos altamente ácidos, movilizand o Al y en menor cantidad SiO<sub>2</sub>, Fe, K, Na, Ca y Mg. Se forman minerales como caolinita, alunita, junto con dickita, pirofilita, diásporo, pirita y cuarzo oqueroso.

<sup>53</sup> Alteración Sericítica (o Fílica): conformada por sericita, cuarzo, clorita, illita, pirita. Se origina por la hidrólisis de feldespatos, donde se lixivian Na, Mg, Ti, Fe y K.

<sup>54</sup> Carbonatación: formación de carbonatos secundarios y zonación por movilidad decreciente de Fe, Mn y Mg a pH progresivamente mayor. Minerales característicos: calcita, dolomita, ankerita y siderita.

<sup>55</sup> Alteración clorítica: producida por alteración de silicatos ferromagnesianos, formando clorita + cuarzo + sericita ± carbonatos ± sulfuros. Se caracteriza por un intenso lavado de elementos alcalinos y un aumento en el contenido en Fe y Mg.

menor silicificación<sup>56</sup> que afecta a las rocas hospedantes (cuerpos intrusivos cretácicos; brechas volcánicas, andesitas ocofíticas, tobas de lapilli y andesitas porfíricas de la Formación Veta Negra) alrededor de los cuerpos de mena (Camus *et al.*, 1986; 1991). En su trabajo de tesis, Pérez (2018) reporta, además de los minerales de sulfuros, la presencia de malaquita y crisocola (mezcla amorfa de silicatos de Cu y sílice hidratada) en vetas de la ex Mina Dulcinea y Quebrada Los Tornos; y minerales de alteración como epidota, clorita, óxidos de Fe y Mn, pátinas de arcillas minerales, jaspe (en Quebrada de Castro), calcita y jarosita. En la Tabla 4.12 se enlistan los minerales reportados y aquellos que podrían presentarse según los tipos de alteración hidrotermal descritas.

Los sulfuros tienen un importante impacto en la calidad del agua subterránea y su respuesta fisicoquímica, ya que el comportamiento químico del azufre (S) depende fuertemente del pH y las condiciones de óxido-reducción (redox), donde también interviene la actividad microbiana. En los sulfuros, el S se encuentra reducido ( $S^{2-}$ ) y es relativamente inmóvil; al quedar expuestos a la atmósfera (agua y oxígeno), el S se oxida produciendo iones de sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) disueltos en el agua. Un sulfuro muy común es la piritita ( $Fe^{2+}S_2$ ), ampliamente presente en el área de estudio, cuya oxidación libera  $SO_4^{2-}$  y Fe en su forma reducida  $Fe^{2+}$  (ferroso) (Hem, 1985).

A su vez, el Fe también está notablemente controlado por las condiciones de pH y redox, donde igualmente participan microorganismos. El Fe liberado por la oxidación de los sulfuros rápidamente puede oxidarse a  $Fe^{3+}$  (férrico) y precipitar (como oxihidróxidos, de color rojo), afectando la solubilidad de otros iones metálicos que tienden a co-precipitar con el Fe. A pH cercanos a 7, la precipitación de oxihidróxidos férricos es muy rápida. En otras condiciones la transformación de  $Fe^{2+}$  en  $Fe^{3+}$  es muy lenta, y generalmente se requiere de mediación biológica para alcanzar el equilibrio. Incluso después de que un pozo intercepte agua subterránea, las bacterias oxidantes y reductoras de S y Fe pueden alterar las concentraciones de Fe disuelto, promoviendo su precipitación y generando grandes problemas en el desempeño de los pozos, tuberías de Fe o revestimientos expuestos en los sistemas de suministro de agua. Los oxihidróxidos más estables, como la hematita y la goethita, tienen muy bajas solubilidades, pero en los sistemas naturales de agua dulce rara vez controlan la solubilidad del Fe. Por otro lado, el Fe tiende a formar complejos orgánicos, lo cual retarda su oxidación (Hem, 1985).

Otro elemento que suele participar junto con el Fe en reacciones redox durante los procesos de intemperismo de las rocas es el Mn, ya que tienen propiedades químicas muy parecidas. En condiciones naturales, el Mn se encuentra disuelto en el agua como  $Mn^{2+}$ , y al entrar en contacto con el oxígeno, precipitará donde el pH sea lo suficientemente alto, como una costra de óxido de  $Mn^{4+}$  ( $MnO_2$ ), generalmente acompañado de Fe, y bajo ciertas condiciones también coprecipitan Co, Pb, Zn, Cu, Ni y Ba. Cuando se libera  $Mn^{2+}$  por oxidación de sulfuros, a medida que la acidez se va neutralizando, los hidróxidos de Fe precipitan antes que el Mn (Hem, 1985).

---

<sup>56</sup> Silicificación: formación de alguna variedad de sílice secundaria, como cuarzo secundario, jaspe, chert, ópalo, calcedonia, etc., por remoción de  $SiO_2$  y posterior reprecipitación.

La oxidación de la pirita, además de liberar  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Fe}^{2+}$ , también produce considerables cantidades de  $\text{H}^+$ , por lo que los fluidos resultantes de este proceso se denominan **drenaje ácido**, y suelen contener elevadas concentraciones de  $\text{SO}_4$ , Fe, Mn, Al y elementos traza. Pero si existen minerales carbonatados en el medio, como carbonatos de Ca, Fe y Mn, o hidróxidos de Fe y Al, los  $\text{H}^+$  liberados pueden ser consumidos por estos componentes neutralizantes y así evitar que el pH disminuya significativamente. Por otro lado, también pueden reaccionar con iones metálicos como el Fe y Al, disminuyendo su concentración sin afectar los contenidos de  $\text{SO}_4$ . En tal caso se genera un drenaje alcalino o neutro (Aduvire, 2006).

Por esta capacidad de neutralización que presentan los materiales geológicos, los efectos de la oxidación de los sulfuros en el agua subterránea muchas veces son indetectables en un análisis hidrogeoquímico, y suelen variar en el tiempo. Puede suceder que el efecto neutralizante se agote, en función de la cantidad de carbonatos vs sulfuros y las velocidades de reacción. Si existe suficiente mineral carbonatado, los productos de la reacción redox (como yeso o sales de Fe) pueden revestir las partículas sulfuradas y evitar la progresión de oxidación. Pero si la concentración de sulfuros es muy grande, los drenajes volverán a ser ácidos cuando se agoten los minerales neutralizantes (Aduvire, 2006). Por otro lado, el Fe liberado puede precipitarse o perderse por intercambio catiónico, y el  $\text{SO}_4^{2-}$  puede perderse por reducción a medida que el agua se mueve a través de las rocas. También puede suceder que los productos  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Fe}^{2+}$  sean transportados de manera estable en la solución después de que se haya agotado el oxígeno que podría reaccionar con el  $\text{Fe}^{2+}$  para convertirlo en  $\text{Fe}^{3+}$ . Generalmente, en los drenajes ácidos el Fe está acompañado por Mn, pudiendo sobrepasar 1 mg/l, pero parte del Fe que estaba originalmente en solución puede perderse por precipitación de óxido de Fe en la muestra incluso después de su recolección (Hem, 1985).

La viabilidad y velocidad de las reacciones de oxidación están determinadas por múltiples factores: temperatura, cantidad de sulfuros, presencia de bacterias, granulometría y estructura cristalina de los minerales involucrados. Por ejemplo, la marcasita (polimorfo de la pirita) es más inestable y acelera la generación de drenajes ácidos, mientras que los sulfuros de Pb, Cu o Zn son menos reactivos que los de Fe, ya que presentan una estructura cristalina más estable y al alterarse pueden formar minerales menos solubles que recubren la superficie de los sulfuros, inhibiendo la oxidación. La precipitación o disolución de los nuevos compuestos formados dependerá de las propiedades químicas del agua y del medio geológico. Por su parte, las texturas finas y bajos grados de cristalinidad favorecen la oxidación respecto a los cristales gruesos y bien desarrollados (euhedrales); por ejemplo, el hábito framboidal que a veces presentan la pirita, marcasita y pirrotina, es fácilmente oxidable. Por otro lado, ciertas bacterias catalizan las reacciones redox y ellas dependen del pH, temperatura, disponibilidad de nutrientes y elementos que pueden suprimir su existencia; por ejemplo, el Mo es tóxico para las bacterias. Respecto a la temperatura, en ambientes cálidos la velocidad de oxidación aumenta. En la Fig. 44 se muestran las 3 etapas de generación de drenaje ácido y las series de reacciones (Aduvire, 2006).

Tabla 4.12. *Minerales asociados a los eventos de alteración hidrotermal (con signo de interrogación se indica aquellos que no están registrados en el área de estudio). Recopilación de los trabajos de Camus et al. (1986, 1991), Pérez (2018) y Ramírez (2019).*

Grupo	Mineral	Composición
Sulfuros (S <sup>2-</sup> )	Pirita	Fe <sup>2+</sup> S <sub>2</sub>
	Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>
	Esfalerita	(Zn,Fe)S
	Galena	PbS
	Tenantita	Cu <sub>6</sub> [Cu <sub>4</sub> (Fe,Zn) <sub>2</sub> ]As <sub>4</sub> S <sub>13</sub>
	Tetraedrita	Cu <sub>6</sub> [Cu <sub>4</sub> (Fe,Zn) <sub>2</sub> ]Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub>
	Bornita	Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>
	Arsenopirita	FeAsS
	Pirrotita	Fe <sub>(1-x)</sub> S (x = 0 - 0,2)
Óxidos	Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	Magnetita	Fe <sup>2+</sup> Fe <sub>2</sub> <sup>3+</sup> O <sub>4</sub>
	Óx. de Fe	Fe <sub>x</sub> O <sub>x</sub>
	Óx. de Mn	Mn <sub>x</sub> O <sub>x</sub>
	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
	Jaspe <sup>(a)</sup>	SiO <sub>2</sub>
Oxihidróxidos	Diásporo?	AlO(OH)
Carbonatos	Ankerita	Ca(Fe <sup>2+</sup> ,Mg)(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
	Siderita	FeCO <sub>3</sub>
	Calcita	CaCO <sub>3</sub>
	Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>
	Malaquita	Cu <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>
Sulfatos (S <sup>2+</sup> )	Barita	BaSO <sub>4</sub>
	Alunita?	KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>
	Jarosita <sup>(b)</sup>	KFe <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>
Filosilicatos	Pirofilita?	Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>
	Caolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
	Dickita? <sup>(c)</sup>	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>
	Illita?	(K,H <sub>3</sub> O)(Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> [(OH) <sub>2</sub> ,(H <sub>2</sub> O)]
	Sericita <sup>(d)</sup>	KAl <sub>2</sub> (AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub>
	Clorita	(Mg,Fe) <sub>3</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub> ·(Mg,Fe) <sub>3</sub> (OH) <sub>6</sub>
	Crisocola	Cu <sub>2-x</sub> Al <sub>x</sub> (H <sub>2-x</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )(OH) <sub>4</sub> ·nH <sub>2</sub> O

<sup>(a)</sup> Jaspe: forma microcristalina de sílice (SiO<sub>2</sub>). <sup>(b)</sup> Jarosita: se forma por la oxidación de sulfuros de hierro. <sup>(c)</sup> Dickita: polimorfo de la Caolinita, suele tener impurezas de Ti, Fe, Mg, Ca, Na y K. <sup>(d)</sup> Sericita: agregado fino de micas blancas, variedad de la moscovita degradada (pérdida de K) que puede contener cantidades menores de Illita.

Si bien es posible que los drenajes ácidos se originen en forma natural, un mal manejo de residuos mineros donde grandes concentraciones de sulfuros quede expuesto a la intemperie, desencadenará reacciones de oxidación y la generación de drenaje ácido, lo cual representa una amenaza para la salud humana y la degradación de los ecosistemas. Debido a los antecedentes recopilados en el trabajo de campo sobre la posible contaminación del agua subterránea derivada de la actividad minera en Petorca, este punto será retomado en la sección 6.3.

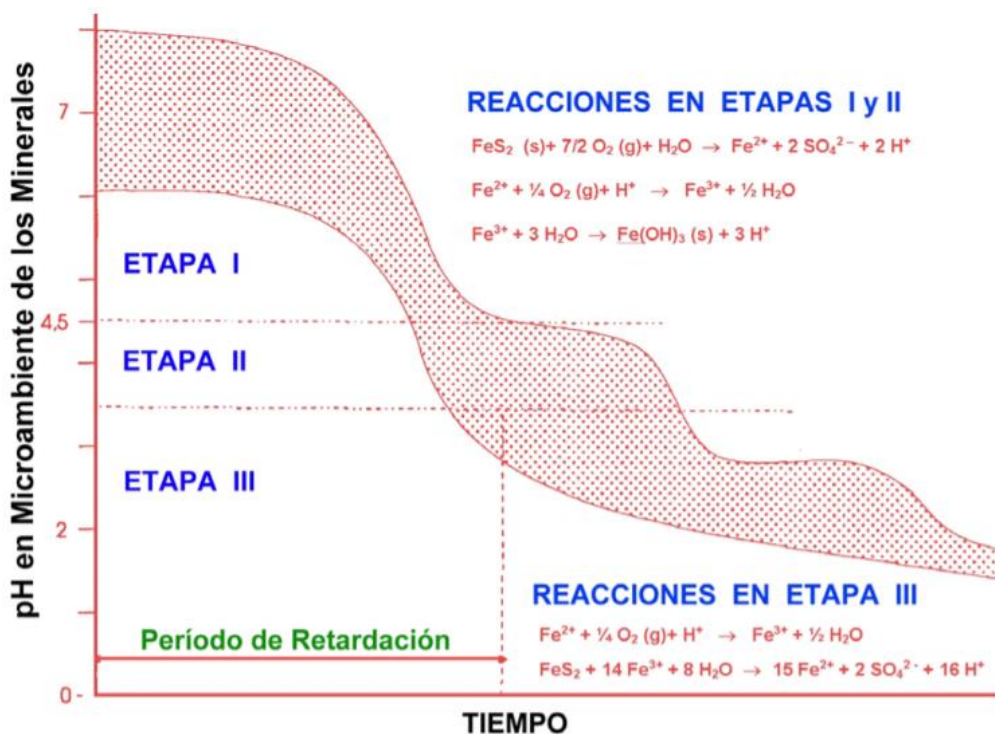


Fig. 44. Etapas y velocidades relativas de reacción involucradas en la generación de drenaje ácido. Tomado de Aduvire (2006).

Es evidente la complejidad de los sistemas redox y la multiplicidad de factores que intervienen en el comportamiento químico del S y Fe, lo cual dificulta la interpretación de los procesos hidrogeoquímicos. En el caso de Petorca, no se obtuvo ningún indicio de este tipo de reacciones, a excepción de la muestra de Los Comunes (P16) donde se midió un Eh negativo de -5 mV, y aguas arriba, en los pozos de Calle Larga (P06: Eh = 20 mV) y Chalaco (P08: Eh = 66 mV), que tienen valores notoriamente más reductores que el resto de las mediciones (122-221 mV). Cabe mencionar que, respecto al total de muestras analizadas, el pozo P16 presenta los mayores contenidos de Mn, Fe, Co, Rb, Zr, mientras que P08 destaca por sus concentraciones más altas de Pb, Zn, Y y Lantánidos, aunque ninguno de los elementos mencionados sobrepasa el valor de 1 mg/l (valores en Tabla 4.13). Las tres muestras en cuestión forman un grupo claramente distinguible del resto de las muestras en gráficos como Eh (potencial óxido-reducción) vs  $\text{SO}_4^{2-}$ , Eh vs pH, Oxígeno disuelto (O.D.) vs Eh, y contenidos de Al, Mn y Fe (Fig. 45).

En la Fig. 46 se exponen los diagramas con los dominios de pH-Eh en los que ciertas especies de S y Fe son estables (Hem, 1985). Aunque se trata de campos de estabilidad calculados a 25°C y presión de 1 atm, se puede apreciar que pequeñas variaciones en el Eh y/o pH pueden causar grandes cambios en la solubilidad de estos elementos, lo cual determina si la especie tiende a precipitar o permanecer en solución. A modo de referencia, las muestras analizadas en el presente trabajo se han graficado en estos diagramas, ocupando el campo de  $\text{SO}_4^{2-}$  (azufre oxidado:  $\text{S}^{6+}$ ), y en el caso del Fe se tienen muestras en el campo de estabilidad del  $\text{Fe}^{2+}$  (más reducido, en solución), entre ellas las muestras P16, P06 y P08, además en el dominio de



Fe(OH)<sub>3</sub> donde el Fe se encuentra más oxidado (Fe<sup>3+</sup>) y en fase sólida, así como también en el límite entre ambos campos de estabilidad.

Tabla 4.13. Contenido en µg/l de algunos elementos traza, destacando en naranja oscuro las concentraciones más altas y en naranja claro los pozos que presentan condiciones más reductoras (menores valores de Eh). Las muestras en rojo indican contaminación (> 10 mg/l NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

	Eh (mV)	Mn	Fe	Al	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Pb	Y	Σ Lant
LD		0.1	10	2	0.005	0.3	0.2	0.5	0.1	0.01	0.003	0.001
P02	221	1.2	<10	<2	<0.005	<0.3	1.2	26	0.8	<0.01	<0.003	<0.001
P03	147	0.6	<10	<2	<0.005	6.4	1.9	11	15	<0.01	<0.003	<0.001
P04	162	2.3	<10	5	0.08	<0.3	3	15	1.4	<0.01	<0.003	0.005
P05	177	3.2	<10	24	<0.005	1.9	1.8	162	0.8	0.86	0.12	0.276
P06	20	48.7	<10	<2	0.02	<0.3	1.7	8.9	1	<0.01	<0.003	<0.001
P07	155	1.4	<10	3	<0.005	8.1	0.5	6.7	0.6	<0.01	<0.003	<0.001
P08	66	8.6	66	25	0.1	3.7	0.8	313	0.8	4.75	0.235	0.579
P09	192	<0.1	<10	<2	<0.005	<0.3	<0.2	<0.5	0.5	<0.01	<0.003	<0.001
P10	122	2.7	<10	8	<0.005	<0.3	1.1	93	1.5	<0.01	<0.003	<0.001
P12	166	0.4	<10	<2	<0.005	4.4	1.1	9.5	3.2	<0.01	<0.003	0.031
P13	153	1.1	<10	<2	0.01	23.6	5.3	67	5.2	<0.01	<0.003	<0.001
P14	159	1.1	<10	3	<0.005	0.6	2.6	8.4	7.2	<0.01	<0.003	0.036
P15	140	0.3	<10	<2	<0.005	<0.3	<0.2	12	1.1	<0.01	<0.003	<0.001
P16	-5	155.1	84	4	0.85	2.7	0.6	60	2.1	<0.01	<0.003	0.025

LD: límite de detección. Σ Lant: sumatoria de los elementos del grupo de los Lantánidos.

Con base en los antecedentes expuestos y los datos obtenidos, es posible sugerir que la presencia de sulfuros en profundidad alrededor de los pozos P06, P08 y P16 probablemente controla los patrones químicos y fisicoquímicos observados. Los flujos locales que se han definido en este capítulo, caracterizados por concentraciones relativamente altas de oxígeno disuelto, interactúan con los depósitos de sulfuros y desencadenan la secuencia de reacciones de oxidación que afectan a los minerales sulfurados cuando entran en contacto con agua y oxígeno (Fig. 44). De esta forma se liberaron al agua ácido sulfúrico (detectado por su olor característico en el pozo P16), Fe y Mn, que alcanzan sus mayores valores en estas tres muestras (Fig. 45D). La coloración roja-anaranjada del agua observada en los pozos de Los Comunes (P16) y Calle Larga (P06), y la abundante carga de sedimentos en suspensión, seguramente reflejan la precipitación de minerales de Fe como resultado de la oxidación del Fe<sup>2+</sup> (liberado en la primera etapa de oxidación de la pirita) a Fe<sup>3+</sup>, que rápidamente puede precipitar como oxihidróxido y promueve la precipitación de otros metales.

Además, el contenido de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> que pudo verse incrementado respecto a los niveles esperados por la evolución hidrogeoquímica normal del agua subterránea. Dado que los valores de pH medidos son cercanos a 7 (6.66 – 6.80), es probable que existan agentes neutralizantes como

carbonatos e hidróxidos que consumen los H<sup>+</sup> liberados, ayudando a mantener el pH en un rango neutro.

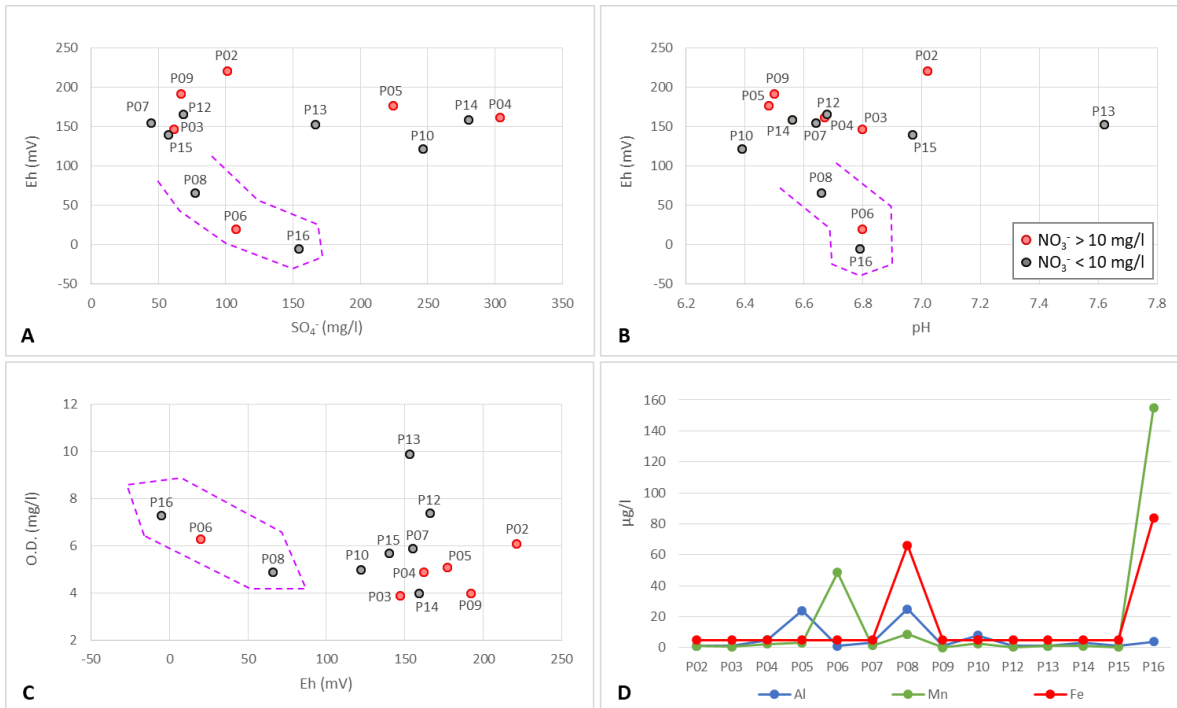


Fig. 45. Conjunto de rasgos químicos y fisicoquímicos que distinguen a las muestras P06, P08 y P16, señalados con línea segmentada morada. A) Potencial óxido-reducción (Eh) vs SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; B) Eh vs pH; C) Oxígeno disuelto (O.D.) vs Eh; D) variación de los contenidos de Al, Mn y Fe (µg/l).

A pesar de que los depósitos sulfurados se encuentran distribuidos ampliamente en el área de estudio (Fig. 27), razón por la cual se esperaba encontrar altas concentraciones de metales en el agua subterránea, en las muestras analizadas se obtuvo valores en general bajos de estos elementos. Esto puede deberse a múltiples factores, los cuales probablemente actúan en conjunto: (a) la viabilidad y velocidad de las secuencias de reacciones de oxidación dependen de diversas variables, como la presencia de bacterias, temperatura, pH, cantidad de sulfuros y tipos minerales presentes (composición, estructura cristalina, hábito, textura); (b) los metales liberados en el agua pueden precipitar si así lo permiten las condiciones de pH y Eh, o perderse por intercambio iónico al interactuar con el medio geológico.

Dado que no se conocen estas variables, resulta altamente complejo establecer el rol de la mineralización sulfurada en forma precisa; no obstante, es posible asegurar que el sistema en forma global ha sido capaz de atenuar o contrarrestar los posibles efectos de la oxidación de los sulfuros presentes en el área de estudio. La escasez de precipitaciones, en este caso, ha tenido un impacto positivo ya que evita que los sulfuros expuestos en superficie por labores mineras (vetas explotadas, jales mineros) dispongan de agua, uno de los ingredientes esenciales para la generación de drenaje ácido, junto con el oxígeno. Ello no implica, bajo ninguna circunstancia, que no se deban mejorar los actuales protocolos y métodos de manejo y disposición de residuos

mineros en la comuna de Petorca, los cuales son francamente deficientes (según lo observado en campo y también denunciado por los informantes de este estudio; Fig. 17), poniendo en riesgo la salud de la población y de los ecosistemas.

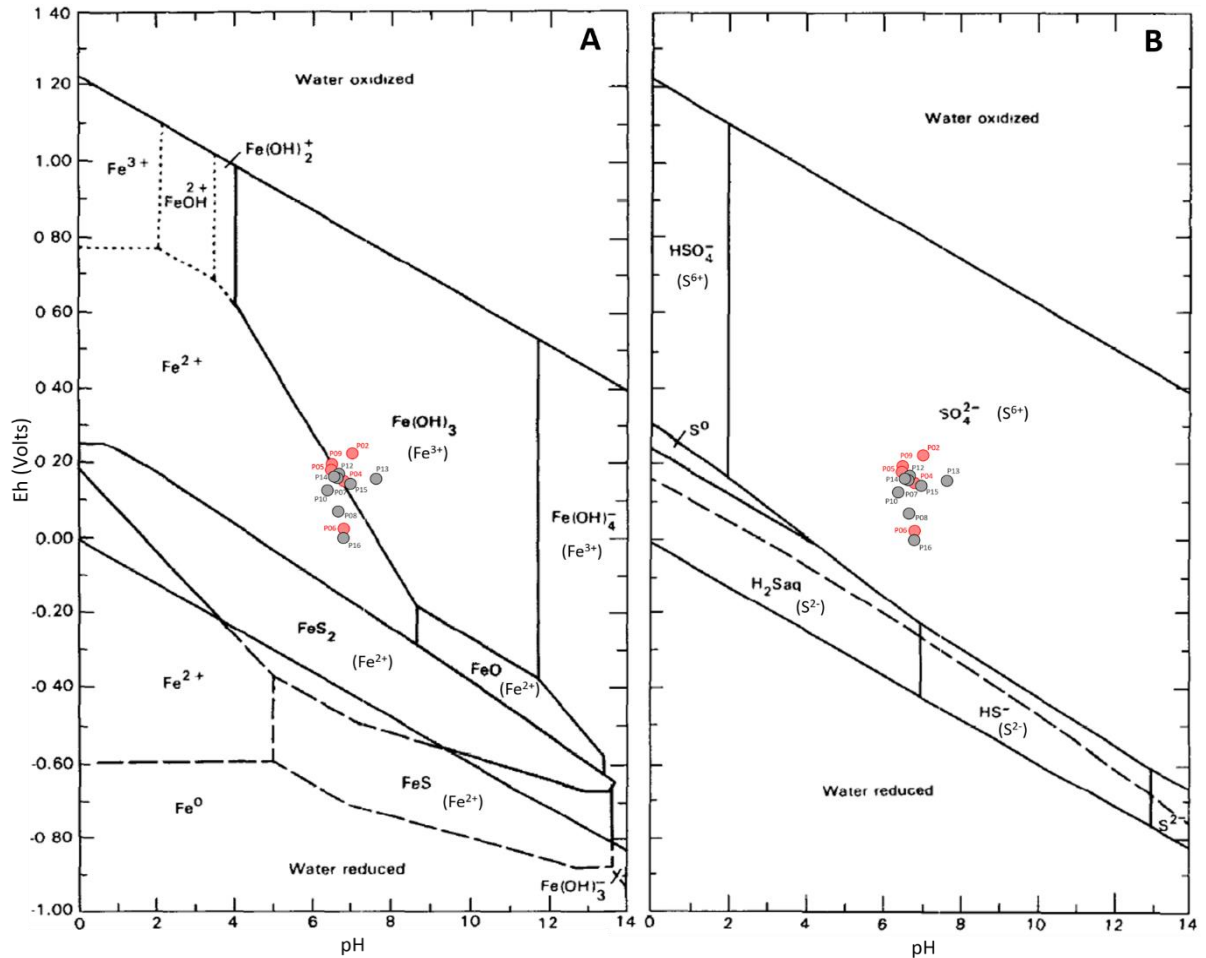


Fig. 46. Diagramas de estabilidad dependientes del pH y Eh (potencial redox) para especies de azufre (A) y hierro (B), indicando la posición de las muestras analizadas en el presente trabajo (gráfico en Fig. 45B). Tomado de Hem (1985), calculado al equilibrio a 25°C y 1 atm. Línea segmentada (A): equilibrio redox entre  $CO_2$  y  $CH_4$ .

## Modelación Hidrogeoquímica en PHREEQC

PHREEQC (del acrónimo pH-REdox-EQuilibrium Calculations) es un programa computacional capaz de realizar una amplia gama de cálculos hidrogeoquímicos, que permite simular reacciones químicas y procesos de transporte en el agua, basado en el equilibrio químico de soluciones acuosas que interactúan con minerales, gases, soluciones sólidas, intercambiadores y superficies de sorción (Parkhurst y Appelo, 2013). Con base en información química (reacciones) y termodinámica ( $\Delta G$ ,  $\Delta H$ , o  $K_s$ ) incluida en la base de datos del programa, es posible obtener los índices de saturación de las fases minerales que se pueden presentar en una solución, los cuales indican el estado de equilibrio de una solución con relación a un mineral en específico. PHREEQC se basa en ciertos conceptos y parámetros que se definen a continuación:

**Actividad (a):** parte de la concentración total de una especie disuelta que efectivamente participa en una reacción química. Representa el comportamiento de un ion como si este no interactuara con otros iones en la solución. Los cálculos geoquímicos que realiza PHREEQC utilizan la actividad de los iones, no la concentración total que reporta un laboratorio.

$$\text{Actividad} = \text{Concentración} \times \text{Coeficiente de Actividad (adimensional)}$$

**Coeficiente de Actividad (γ):** varía entre 0 (inactividad) y 1 (100% de la sustancia es activa), y depende de los siguientes factores:

- Radio y carga del ion: para los elementos sin carga (ejemplo: sílice) su actividad es igual a su concentración. Los iones divalentes tienen menor actividad que los monovalentes.
- Temperatura de la solución.
- Salinidad de la solución: mientras más salina, menor actividad, ya que las cargas eléctricas de los iones inhiben su participación en las reacciones.

**Constante de equilibrio (K):** expresa la relación constante de las actividades de los reactantes presentes en una reacción (excluye sustancias sólidas y el agua), cuando las velocidades de reacción se han igualado (estado de equilibrio). K varía en función de la temperatura.

Para una reacción reversible  $aA + bB \leftrightarrow cC + dD \Rightarrow K = a(C)^c * a(D)^d / a(A)^a * a(B)^b$

**Producto de Actividad Iónica (PAI):** ecuación resultante de aplicar la ley de acción de masas cuando la reacción no está en equilibrio. Si PAI es mayor que K, el compuesto tiende a precipitar; si PAI es menor que K, tiende a disolverse. Si PAI = K, la solución está en equilibrio.

$$PAI = \frac{C^c D^d}{A^a B^b}$$

**Índice de Saturación (IS):** indica el estado de equilibrio que guarda una solución con relación a un mineral en específico. Cuando su valor es 0, el agua está en equilibrio (dinámico) con respecto al mineral. Cuando toma un valor negativo, el agua está subsaturada con relación al mineral (se disolverá), y cuando es positivo el agua está sobresaturada y entonces precipitará de la solución. La muestra debe estar filtrada porque sólo interesan los componentes que están en solución. Su fórmula es:  $IS = \log(PAI/K_{ps})$

En resumen, es posible predecir el estado de una solución y el sentido de una reacción al evaluar los valores de PAI e IS:

<i>Producto de Actividad Iónica</i>	<i>Índice de Saturación</i>	<i>Estado de la solución</i>	<i>Sentido de la reacción</i>
$PAI > Kps$	$IS > 0$	<i>Sobresaturada</i>	<i>Precipitación</i>
$PAI = Kps$	$IS = 0$	<i>Saturada</i>	<i>Equilibrio</i>
$PAI < Kps$	$IS < 0$	<i>Subsaturada</i>	<i>Disolución</i>

Una reacción puede ser viable desde un punto de vista termodinámico, pero puede verse limitada por no presentarse las condiciones cinéticas, ya que existen reacciones de disolución de un cierto mineral que son más rápidas que las de precipitación de otro mineral, y entonces nunca se alcanza el equilibrio químico. Por ejemplo, en una caliza que contiene calcita, dolomita y yeso, el yeso siempre precipita antes que el resto de los minerales.

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la concentración total de una especie reportada por el laboratorio es un balance de masas de la concentración iónica más la concentración de los **complejos**<sup>57</sup> presentes. Los complejos pueden limitar la cinética de ciertas reacciones, como por ejemplo, los ácidos húmicos, que forman complejos con los componentes inorgánicos. Esto se puede prevenir filtrando la muestra (filtro 0.45 µm). Un caso extremo es el agua de mar, donde el mayor porcentaje de la concentración de las sales no forma complejos sino iones; en cambio, los sulfatos tienden en su mayoría a formar complejos.

### Datos de entrada

Los datos de entrada para modelar en PHREEQC son los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea medidos en campo (temperatura, pH, Eh, C.E. y O.D.; Tabla 4.4) y las concentraciones de iones mayores, menores y traza reportados por el laboratorio (ANEXO 4). La base de datos utilizada fue *wateq4f*. El programa requiere que los valores de Eh sean convertidos al parámetro **pE** (logaritmo negativo de la actividad de electrones que participan en una reacción redox), utilizando la siguiente ecuación:

$$pE = (Eh * F) / (2.303 * R * T)$$

Donde Eh: potencial de óxido-reducción medido en campo (mV); F: constante de Faraday = 23062 (cal/V); R: constante de los gases = 1.987 (cal/mol°K); T: temperatura (°K).

Bajos valores de pE implica que los electrones de las sustancias disueltas en el agua están disponibles para participar de una reacción redox (medio reductor); altos valores de pE resultan de una baja disponibilidad de electrones (medio oxidante). Los valores de pE obtenidos para los cálculos en PHREEQC se muestran en la Tabla 4.14.

<sup>57</sup> Complejo: asociación de un catión y un anión, pudiendo resultar un complejo neutro o iónico. La presencia de complejos determina el comportamiento de los iones en solución, junto con las condiciones electrostáticas (la reactividad de los iones se reduce por la presencia de complejos).

Tabla 4.14. Cálculo de  $pE = (Eh * F) / (Cte * R * T)$ .  $Cte = 2.303$ .  $T(^{\circ}K) = T(^{\circ}C) + 273.15$ .

Muestra	Eh (mV)	T (°C)	T (°K)	R (cal/mol°K)	Cte	F (cal/V)	pE
P02	221	24.7	297.85	1.987	2.303	23061	3.739
P03	147	23.5	296.65	1.987	2.303	23061	2.497
P04	162	20.7	293.85	1.987	2.303	23061	2.778
P05	177	21.8	294.95	1.987	2.303	23061	3.024
P06	20	18.2	291.35	1.987	2.303	23061	0.346
P07	155	32.4	305.55	1.987	2.303	23061	2.556
P08	66	23.7	296.85	1.987	2.303	23061	1.120
P09	192	20.8	293.95	1.987	2.303	23061	3.292
P10	122	18.2	291.35	1.987	2.303	23061	2.110
P12	166	18.9	292.05	1.987	2.303	23061	2.864
P13	153	23.0	296.15	1.987	2.303	23061	2.604
P14	159	21.6	294.75	1.987	2.303	23061	2.719
P15	140	20.3	293.45	1.987	2.303	23061	2.404
P16	-5	21.9	295.05	1.987	2.303	23061	-0.085

## Resultados

La lista de fases minerales con sus respectivos índices de saturación calculados en PHREEQC se encuentra en la Tabla 4.16, distinguiendo en verde los valores de sobresaturación ( $IS > 0.5$ ), en rojo valores de subsaturación ( $IS < -0.5$ ), y en color amarillo condiciones de equilibrio entre la fase y la solución (considerando un rango alrededor de  $IS = 0$  desde  $-0.5$  a  $0.5$ ). Estos valores fueron graficados para todas las muestras analizadas (Fig. 47), con el fin de observar cómo varía el índice de saturación de diversas fases minerales en los diferentes puntos de muestreo.

En el conjunto de muestras estudiadas, se observa un comportamiento claramente homogéneo en los minerales de  $SiO_2$ , barita, anhidrita-yeso, y en menor grado de calcita-aragonito y feldespatos (adularia y albita). El resto de los minerales presenta condiciones de saturación muy heterogéneas. En Pedernal (P07) se aprecian valores “anómalos” (respecto al resto de las muestras) del IS en todos los grupos minerales, lo cual puede resultar de la intensa alteración hidrotermal que se presenta en los alrededores del sitio, y/o de la influencia de labores mineras y/o los valores de entrada pueden estar afectados porque el agua recorrió varios metros en una tubería luego de descargar en el manantial (la composición del agua subterránea se ve alterada al entrar en contacto con el oxígeno).

En todas las muestras, el agua subterránea se encuentra notablemente subsaturada en óxidos de Mn (nsutita). En cambio, está sobresaturada en óxidos de Cu y Fe, y oxihidróxidos de Fe y Al, es decir, existirían condiciones químicas para la precipitación de estos minerales. Sin embargo, esto sólo fue observado en los pozos de Los Comunes (P16) y Calle Larga (P06), donde el color de agua extraída presentó una distintiva carga de sedimentos en suspensión de coloración roja-anaranjada, probablemente correspondientes a óxidos y oxihidróxidos de Fe, como resultado de la oxidación del  $Fe^{2+}$  (liberado por oxidación de la pirita) a  $Fe^{3+}$ . Estos pozos justamente



presentan soluciones sobresaturadas en metales nativos como Ag, Cu y Se, aunque la Ag tiene valores positivos en casi todos los puntos de muestreo.

Respecto a los polimorfos de SiO<sub>2</sub>, el índice de saturación se comporta muy similar, de manera subhorizontal en torno al 0 (equilibrio). La solución se encuentra en equilibrio con calcedonia, cristobalita y sílica gel (amorfo), mientras que está ligeramente sobresaturada con respecto al cuarzo y ligeramente subsaturada con respecto al SiO<sub>2</sub>(a). Cabe mencionar que la solubilidad del SiO<sub>2</sub> está fuertemente controlada por la temperatura, pH y por el arreglo espacial de los átomos (estructura cristalina), lo que justamente define las numerosas variedades de SiO<sub>2</sub> (Tabla 4.15). La variedad menos soluble es el cuarzo, caracterizado por una estructura cristalina (buen desarrollo de cristales) con un sistema cristalográfico hexagonal. En cambio, las variedades amorfas (ausencia de estructura cristalina) son mucho más solubles. Ambas formas de SiO<sub>2</sub> incrementan significativamente su solubilidad a pH sobre 9, y son más solubles a medida que aumenta la temperatura. Los índices de saturación observados probablemente estén respondiendo a las diferentes formas de cristalización de SiO<sub>2</sub> encontradas en las rocas del área de estudio (rellenando fallas, fracturas y vesículas), y según los resultados de PHREEQC el agua estaría levemente sobresaturada con respecto al cuarzo, calcedonia y cristobalita.

*Tabla 4.15. Algunos polimorfos de SiO<sub>2</sub> y sus propiedades cristalinas. Microcristalino: cristales visibles por medio de un microscopio. Criptocristalino: agregados de cristales solo observables al microscopio electrónico (tamaño <0.001mm=1µm). Amorfo: sin estructura cristalina.*

<b>Fase mineral</b>	<b>Composición</b>	<b>Estructura</b>	<b>Sistema cristalino</b>	<b>Comentarios</b>
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	Cristalina	Hexagonal	<i>Desarrolla cristales con sus caras cristalográficas bien definidas</i>
Calcedonia	SiO <sub>2</sub>	Criptocristalina	Trigonal	<i>Componente principal del pedernal. En procesos hidrotermales, puede ser introducida por fluidos circulantes, o depositada en forma de sílice residual después de la lixiviación de los cationes.</i>
Jaspe	SiO <sub>2</sub>	Microcristalina	Hexagonal	<i>Presenta impurezas, lo que le otorga una gran variedad de colores.</i>
Cristobalita	SiO <sub>2</sub>	Microcristalina	α: tetragonal (baja T) β: cúbico (alta T)	<i>Polimorfo SiO<sub>2</sub> de alta T, de grano fino que rellena cavidades en rocas volcánicas ácidas. Es estable a 1470°C y presión ambiente.</i>
Tridimita	SiO <sub>2</sub>	Microcristalina	Ortorómbico-hexagonal	<i>Polimorfo de alta T (870-1470°C).</i>
Ópalo	SiO <sub>2</sub> * n H <sub>2</sub> O	Amorfa	No aplica	<i>Sílice en estado de gel</i>

Las arcillas (filosilicatos: micas, kaolinita-halloysita, pirofilita, illita) presentan diversos valores de saturación pero varían en igual proporción (patrones paralelos). Por su parte, el grupo de los sulfatos presenta los menores índices de saturación con la jarosita en el pozo P06 (Calle Larga: IS = -22.8). Mientras que el agua se encontraría en equilibrio con respecto a la barita y levemente subsaturada con respecto al yeso y anhidrita, en todos los puntos de muestreo. Los carbonatos se hayan en condiciones de subsaturación, y en ciertos casos presenta condiciones de equilibrio (P03, P04, P05 y P07).

En síntesis, los resultados de PHREEQC permiten identificar las fases minerales que teóricamente controlan la química del agua subterránea estudiada, pudiéndose apreciar la variación de los patrones de comportamiento químico en los diferentes puntos de muestreo en función de la diversidad de condiciones de circulación del agua, propiedades del medio geológico y factores propios de cada lugar de extracción de agua. El agua analizada estaría sobresaturada con respecto a los óxidos (cuarzo, óxidos de Cu y Fe), hidróxidos y oxihidróxidos de Fe y Al, arcillas minerales, calcita y Ag, por lo que existirían las condiciones químicas para su precipitación desde el agua subterránea. En cambio, los minerales de alteración como la epidota, clorita y óxidos de Mn resultaron en condiciones de subsaturación. Todos estos minerales son coherentes con la caracterización mineralógica reportada en el área de estudio, aunque se ausentan los sulfuros (lo que se explica a continuación, en las limitaciones del modelo).

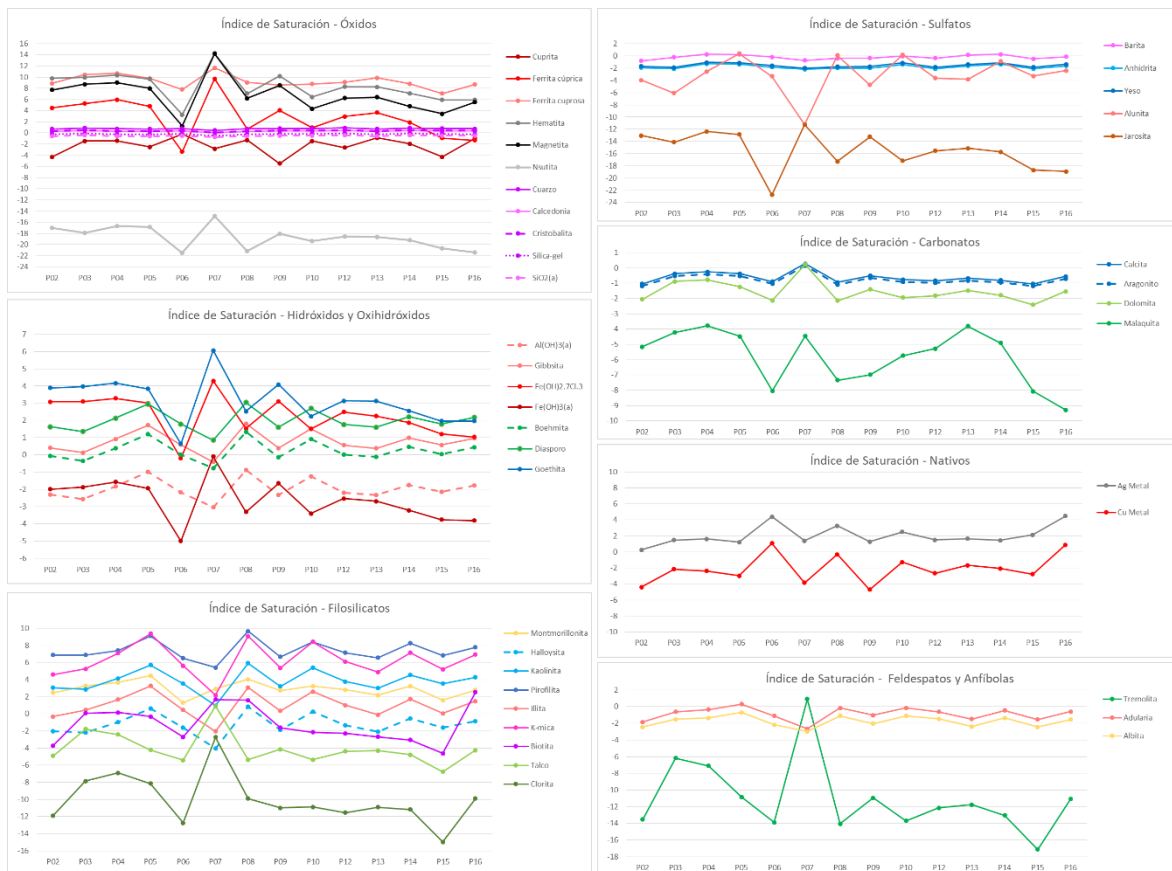


Fig. 47. Gráficos de variación del Índice de saturación reportados por PHREEQC en cada punto de muestreo. Los valores se exponen en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16. Índices de saturación (IS) obtenidos en PHREEQC. Verde: IS > 0.5 (sobresaturación). Amarillo: IS = -0.5 a 0.5 (equilibrio). Rojo: IS < -0.5 (subsaturación).

Grupo	Fase	Fórmula	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P12	P13	P14	P15	P16
Anfibolitas	Tremolita	Ca <sub>2</sub> Mg <sub>5</sub> Si <sub>8</sub> O <sub>22</sub> (OH) <sub>2</sub>	-13.5	-6.2	-7.1	-10.8	-13.9	0.9	-14.0	-10.9	-13.7	-12.1	-11.8	-13.0	-17.1	-11.1
Feldespatos	Adularia	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	-1.8	-0.6	-0.3	0.3	-1.1	-2.7	-0.2	-1.0	-0.2	-0.6	-1.5	-0.5	-1.6	-0.6
Feldespatos	Albita	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	-2.4	-1.5	-1.3	-0.7	-2.2	-3.0	-1.1	-2.0	-1.1	-1.5	-2.4	-1.4	-2.4	-1.5
Óxidos	Cuprita	Cu <sub>2</sub> O	-4.3	-1.5	-1.4	-2.5	-0.2	-2.8	-1.3	-5.5	-1.5	-2.7	-0.9	-1.9	-4.3	-1.0
Óxidos	Ferrita cúprica	CuFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	4.5	5.3	5.9	4.8	-3.4	9.7	0.7	4.0	0.9	2.9	3.7	1.9	-0.9	-1.3
Óxidos	Ferrita cuprosa	CuFeO <sub>2</sub>	8.9	10.4	10.7	9.8	7.8	11.7	9.1	8.6	8.8	9.1	9.9	8.8	7.1	8.7
Óxidos	Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.8	9.9	10.3	9.7	3.3	14.2	7.1	10.2	6.5	8.3	8.3	7.1	5.9	5.9
Óxidos	Magnetita	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	7.7	8.7	9.0	8.0	1.3	14.2	6.2	8.5	4.3	6.2	6.4	4.8	3.4	5.5
Óxidos	Nsutita	MnO <sub>2</sub>	-17.0	-17.9	-16.7	-16.9	-21.5	-14.9	-21.1	-18.1	-19.4	-18.6	-18.7	-19.2	-20.7	-21.4
Óxidos	Calcedonia	SiO <sub>2</sub>	0.3	0.5	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3	0.4	0.3	0.3
Óxidos	Cristobalita	SiO <sub>2</sub>	0.3	0.5	0.3	0.3	0.4	0.1	0.3	0.4	0.4	0.5	0.3	0.5	0.4	0.4
Óxidos	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	0.7	0.9	0.7	0.7	0.8	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9	0.7	0.9	0.8	0.8
Óxidos	Silica-gel	SiO <sub>2</sub>	-0.3	-0.1	-0.2	-0.3	-0.2	-0.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-0.3	-0.1	-0.2	-0.2
Óxidos	SiO <sub>2</sub> (a)	SiO <sub>2</sub>	-0.6	-0.4	-0.6	-0.6	-0.5	-0.8	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.6	-0.4	-0.5	-0.5
Hidróxidos	Al(OH) <sub>3</sub> (a)	Al(OH) <sub>3</sub>	-2.3	-2.6	-1.8	-1.0	-2.2	-3.0	-0.9	-2.3	-1.3	-2.2	-2.3	-1.7	-2.2	-1.8
Hidróxidos	Gibbsita	Al(OH) <sub>3</sub>	0.4	0.1	0.9	1.7	0.6	-0.4	1.8	0.4	1.5	0.6	0.4	1.0	0.6	1.0
Hidróxidos	Fe(OH) <sub>2</sub> .CL3	Fe(OH) <sub>2</sub> .7Cl <sub>0.3</sub>	3.1	3.1	3.3	3.0	-0.2	4.3	1.5	3.1	1.5	2.5	2.3	1.9	1.2	1.0
Hidróxidos	Fe(OH) <sub>3</sub> (a)	Fe(OH) <sub>3</sub>	-2.0	-1.9	-1.6	-1.9	-5.0	-0.1	-3.3	-1.7	-3.4	-2.5	-2.7	-3.2	-3.8	-3.8
Oxihidróxidos	Boehmita	AlOOH	-0.1	-0.4	0.4	1.2	0.0	-0.8	1.3	-0.1	0.9	0.0	-0.1	0.5	0.0	0.4
Oxihidróxidos	Diasporo	AlOOH	1.6	1.4	2.1	3.0	1.8	0.9	3.1	1.6	2.7	1.8	1.6	2.2	1.8	2.2
Oxihidróxidos	Goethita	FeOOH	3.9	4.0	4.2	3.8	0.7	6.1	2.5	4.1	2.2	3.1	3.1	2.6	2.0	2.0
Filosilicatos	Montmorillonita	(HNaK) <sub>0.14</sub> Mg <sub>0.45</sub> Fe <sub>0.33</sub> Al <sub>1.47</sub> Si <sub>3.82</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	2.5	3.3	3.7	4.5	1.3	2.9	4.0	2.7	3.2	2.8	2.2	3.2	1.6	2.8
Filosilicatos	Halloysita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	-2.0	-2.2	-1.0	0.6	-1.6	-4.0	0.9	-1.9	0.3	-1.4	-2.1	-0.6	-1.6	-0.8
Filosilicatos	Kaolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	3.1	2.9	4.1	5.7	3.5	1.0	5.9	3.2	5.4	3.8	3.0	4.6	3.5	4.3
Filosilicatos	Pirofilita	Al <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	6.9	6.9	7.4	9.1	6.5	5.4	9.7	6.7	8.4	7.1	6.6	8.2	6.8	7.8
Filosilicatos	Illita	K <sub>0.6</sub> Mg <sub>0.25</sub> Al <sub>2.35</sub> Si <sub>3.50</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	-0.3	0.4	1.7	3.3	0.4	-2.1	3.1	0.3	2.6	1.0	-0.1	1.7	0.1	1.5
Filosilicatos	K-mica	KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	4.6	5.3	7.1	9.4	5.6	2.2	9.1	5.4	8.4	6.1	4.9	7.1	5.2	6.9
Filosilicatos	Biotita	KFe <sub>3</sub> AlSi <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	-3.7	0.1	0.2	-0.3	-2.7	1.7	1.6	-1.6	-2.2	-2.3	-2.7	-3.1	-4.6	2.5
Filosilicatos	Talco	Mg <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	-4.9	-1.8	-2.4	-4.2	-5.4	0.9	-5.4	-4.1	-5.4	-4.4	-4.3	-4.8	-6.8	-4.2
Filosilicatos	Clorita	Mg <sub>5</sub> Al <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	-11.9	-7.9	-6.9	-8.2	-12.7	-2.7	-9.9	-11.0	-10.9	-11.6	-10.9	-11.2	-15.0	-9.9
Sulfatos	Barita	BaSO <sub>4</sub>	-0.8	-0.2	0.3	0.3	-0.1	-0.7	-0.4	-0.4	0.0	-0.3	0.2	0.3	-0.4	-0.1
Sulfatos	Anhidrita	CaSO <sub>4</sub>	-1.9	-2.1	-1.3	-1.4	-1.8	-2.2	-2.0	-2.0	-1.4	-2.1	-1.6	-1.3	-2.1	-1.6
Sulfatos	Yeso	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	-1.7	-1.9	-1.0	-1.1	-1.6	-2.0	-1.8	-1.7	-1.1	-1.8	-1.4	-1.1	-1.8	-1.4
Sulfatos	Alunita	KAl <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	-4.0	-6.1	-2.5	0.4	-3.3	-11.2	0.1	-4.7	0.2	-3.6	-3.8	-0.9	-3.3	-2.4
Sulfatos	Jarosita	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	-13.0	-14.1	-12.4	-12.9	-22.8	-11.3	-17.3	-13.2	-17.2	-15.5	-15.1	-15.7	-18.7	-18.9
Carbonatos	Aragonito	CaCO <sub>3</sub>	-1.2	-0.5	-0.4	-0.5	-1.0	0.1	-1.1	-0.7	-0.9	-1.0	-0.8	-1.0	-1.2	-0.7
Carbonatos	Calcita	CaCO <sub>3</sub>	-1.0	-0.4	-0.3	-0.4	-0.9	0.3	-0.9	-0.5	-0.8	-0.8	-0.7	-0.8	-1.0	-0.6
Carbonatos	Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-2.1	-0.9	-0.8	-1.2	-2.1	0.2	-2.1	-1.4	-1.9	-1.8	-1.5	-1.8	-2.4	-1.5
Carbonatos	Malaquita	Cu <sub>2</sub> (OH) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-5.2	-4.2	-3.8	-4.5	-8.0	-4.5	-7.3	-7.0	-5.7	-5.3	-3.8	-4.9	-8.1	-9.3
Nativos	Ag Metal	Ag	0.3	1.5	1.6	1.2	4.4	1.4	3.3	1.3	2.5	1.5	1.7	1.5	2.1	4.5
Nativos	Cu Metal	Cu	-4.4	-2.2	-2.4	-3.0	1.1	-3.9	-0.3	-4.7	-1.3	-2.7	-1.7	-2.1	-2.8	0.9

## Limitaciones

La modelación en PHREEQC fue realizada utilizando la base de datos *wateq4f* por contener una mayor variedad de elementos traza; sin embargo, varios elementos no están incluidos: Ce, Co, Cr, Dy, Er, Eu, Gd, Ge, Ho, La, Lu, Mo, Nd, Sr, Sb, Sc, Sm, Tb, Ti, Tm, V, W, Y, Yb, Zr. De todas formas, todos ellos se presentan en concentraciones inferiores a 1 µg/l, y muchos de ellos (como el grupo de los lantánidos<sup>58</sup>), en menos de 0.001 µg/l. Además, no se cuenta con las concentraciones de azufre en su estado reducido (S<sup>2-</sup>), por lo que ningún mineral del grupo de los sulfuros pudo ser configurado por el programa. Dada la importancia que tienen los sulfuros en la respuesta química y fisicoquímica del agua subterránea (ver sección anterior “Rol de los Depósitos Epitermales”) y su amplia distribución en el área de estudio, es posible que ciertos resultados entregados por PHREEQC no estén representando las condiciones reales del agua analizada. De todas formas, ha permitido obtener parámetros de referencia respecto al comportamiento químico del agua subterránea.

<sup>58</sup> Lantánidos: elementos químicos que siguen al lantano (La) en el grupo IIIB de la tabla periódica. Presentan propiedades físicas y químicas muy semejantes, por lo que suelen comportarse como un solo grupo. Estos elementos son: La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu.

#### 4.9.4. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA DE $^2\text{H}$ - $^{18}\text{O}$

Los isótopos son átomos de un mismo elemento con igual número atómico, que se diferencian por presentar diferente masa atómica, es decir, tienen el mismo número de protones pero distinto número de neutrones. Esto implica que los isótopos tienen propiedades químicas idénticas pero diferentes propiedades físicas, lo cual es utilizado para identificar diversos procesos en el ciclo del agua. Los isótopos más utilizados en hidrogeología son el Deuterio ( $^2\text{H}$  = 1 protón y 1 neutrón) y el  $^{18}\text{O}$  (8 protones y 10 neutrones), que son los isótopos estables pesados del agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ); mientras que los isótopos radioactivos sirven para datar la edad del agua. Debido a que el  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$  no reaccionan como otros componentes disueltos en el agua, son excelentes trazadores del movimiento del agua, ayudan a reconocer las fuentes de recarga del agua subterránea (Dickinson *et al.*, 2006) y a determinar su origen (meteórico, marino, magmática, etc.) (Fontes, 1986). Los patrones isotópicos del agua se definen según la abundancia de los isótopos pesados respecto a los livianos (**R = isótopo pesado / isótopo liviano**), que en caso del agua corresponde a las razones de  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  y  $^2\text{H}/^1\text{H}$ . Con esta relación es posible calcular la diferencia relativa de las razones isotópicas respecto a un estándar ( $\delta$ ), cuyo valor se expresa en “tanto por mil” ( $\text{‰} = 0.1 \%$ ). El cálculo es el siguiente:

Diferencia relativa de la tasa de abundancia:  $\delta\text{‰} = \frac{(\text{R muestra} - \text{R estándar})}{\text{R estándar}} * 1000$

Por tanto, la abundancia isotópica para el  $^2\text{H}$  y el  $^{18}\text{O}$  se expresan como sigue:

$$\delta^2\text{H} \text{‰} = \frac{(^2\text{H}/^1\text{H}) \text{ muestra} - (^2\text{H}/^1\text{H}) \text{ estándar}}{(^2\text{H}/^1\text{H}) \text{ estándar}} * 1000$$

$$\delta^{18}\text{O} \text{‰} = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}) \text{ muestra} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O}) \text{ estándar}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}) \text{ estándar}} * 1000$$

Como referente isotópico estándar se utiliza el agua de mar, el cual representa el reservorio de estos elementos con mayor abundancia natural; sus valores son  $\delta^2\text{H} = 0$  y  $\delta^{18}\text{O} = 0$ . Si  $\delta > 0$  implica un enriquecimiento del isótopo pesado en el agua; si  $\delta < 0$  existe un déficit del isótopo pesado. H. Craig (1961) descubrió un comportamiento lineal entre el  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  para el agua superficial a escala global, definida por la siguiente ecuación:  **$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10 \text{‰}$**  (Craig's *Global Meteoricwater Line*). En la actualidad, el estándar aceptado internacionalmente para el análisis isotópico de Hidrógeno y Oxígeno es el **VSMOW** (*Vienna Standard Mean Ocean Water*), cuya ecuación es  **$\delta^2\text{H} = 8.13 \delta^{18}\text{O} + 10.8 \text{‰}$** .

Los isótopos del agua se fraccionan durante los cambios de estados, en función de los pesos relativos de cada isótopo: los más livianos tienden a migrar a la fase vapor y los más pesados tienden a concentrarse en la fase líquida. La molécula de agua pesada  $^2\text{H}_2^{16}\text{O}$  tiene una masa de 20 U.M.A. (unidad de masa atómica), mientras que la de agua normal ( $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$ ) tiene una masa de 18 U.M.A. Estas moléculas con diferentes masas presentan diferentes tasas de reacción, lo cual define determinados procesos de fraccionamiento isotópico (Mook, 2000). Por tanto, las condiciones climáticas en el momento de la recarga del agua subterránea quedan “guardadas”

en su firma isotópica. En un ambiente cálido, la composición del agua de lluvia es similar a la composición media del océano, mientras que en zonas más frías, donde el fraccionamiento es mayor, el agua de lluvia es isotópicamente más liviana (Clark y Fritz, 1997) (Fig. 48).

Además del clima, existen factores de altitud y latitud que modifican la composición isotópica del agua. Es por eso que en los estudios isotópicos se utiliza como referente la **Línea Meteorológica Mundial (LMM)** o *Global Meteoric Water Line* (GMWL), cuya ecuación es  $\delta^2\text{H} = 8.2 \delta^{18}\text{O} + 11.3 \text{‰}$ . Además de la LMM, se debe incluir una Línea Meteorológica Local (LML) que represente la relación entre  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  en las precipitaciones, para una región en particular. Otros factores que intervienen en la firma isotópica del agua son los eventos que pueden modificar su composición, como la evaporación, reacciones agua-roca, mezcla de aguas de diferente composición, etc. Por ejemplo, en zonas áridas la composición isotópica del agua subterránea suele ser diferente a la precipitación local, debido a un enriquecimiento isotópico por evaporación. El agua que ha experimentado procesos de evaporación presenta pendientes menores respecto a la Línea Meteorológica, con pendientes entre 4 y 6 e interceptos  $<10$ , situándose a la derecha y por debajo de esta recta (Domenico y Schwartz, 1998) (Fig. 48). Sin embargo, más allá de las características climáticas de un lugar, usualmente el agua subterránea presenta una firma isotópica que difiere de la de precipitación del lugar donde fue extraída, porque probablemente se precipitó en condiciones climáticas, época, lugar y elevación diferentes a las del sitio de extracción.

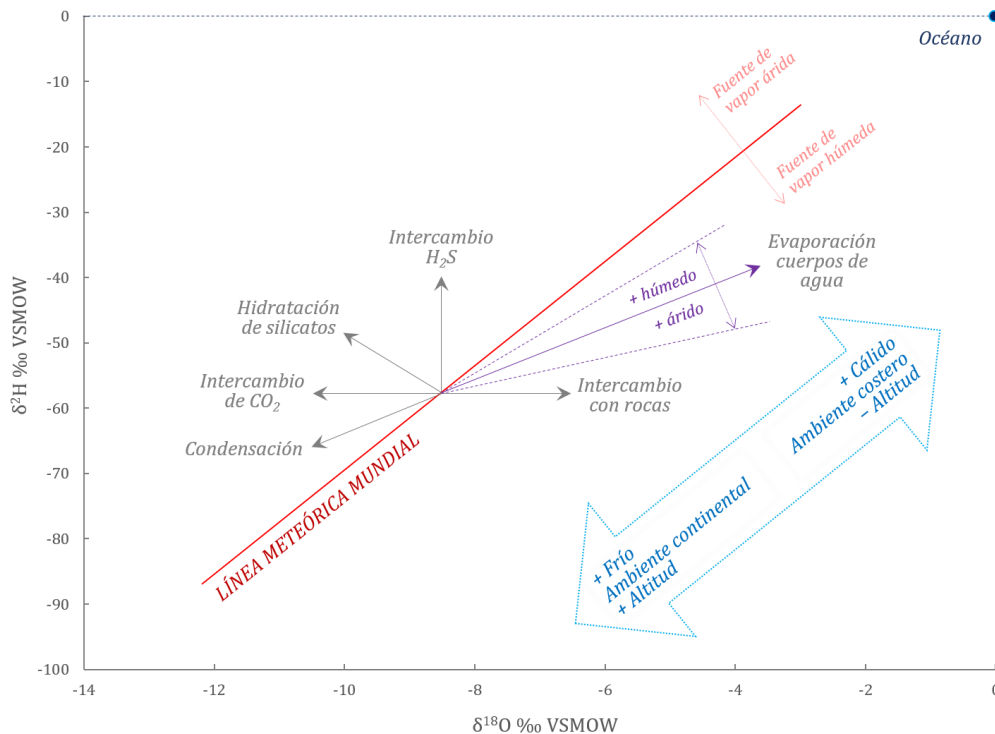


Fig. 48. Diagrama  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  mostrando la variación de la composición isotópica del agua provocada por diferentes procesos y condiciones ambientales. Modificado de Domenico y Schwartz, 1998.

## Resultados

Los análisis de isótopos estables  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  se realizaron en el Laboratorio de Análisis Isotópico de la Universidad Andrés Bello (UNAB), Viña del Mar, Chile, gracias a la gestión de Justinne Rybertt y el apoyo de Francisco Fernandoy. La composición isotópica de las muestras estudiadas varía entre -88.1 y -49.3 ‰ de  $\delta^2\text{H}$ , y -12.0 a -7.3 ‰ de  $\delta^{18}\text{O}$  (Tabla 4.17). Estos valores se hayan representados en la gráfica de la Fig. 49, donde se observa que las muestras (tanto las contaminadas como las no contaminadas) tienen una tendencia lineal paralela a la LMM, posicionándose por debajo de ella. Las muestras P07 y P02 forman parte de la recta de LMM, es decir, su composición isotópica es prácticamente la misma que la del patrón mundial del agua de lluvia.

Además, se pueden diferenciar 3 grupos isotópicos, que sugieren condiciones diferentes de recarga del agua subterránea, en función de variaciones de temperatura, elevación y cercanía al mar (Fig. 50):

1. Muestras con mayor concentración de isótopos livianos (grupo azul en Fig. 49), indicativo de un ambiente de recarga más frío, de mayor elevación y más alejado de la costa. Este grupo lo integran las muestras de la desembocadura del Río El Sobrante (P15 y P09), subcuenca que alcanza la mayor extensión hacia el Este, en la Cordillera de Los Andes, cuya cabecera se encuentra cercana a los 3,500 m s.n.m.
2. Muestras más enriquecidas en isótopos pesados (grupo rojo en Fig. 49), indicativo de un ambiente de recarga más cálido, de menor elevación y más cercano a la costa. Estas corresponden a los pozos del Valle de Las Palmas (P12, P13, P14), que justamente se encuentran en la parte más próxima al Océano Pacífico del área de estudio (borde occidental de la comuna de Petorca). El parteaguas occidental de este valle alcanza elevaciones de aproximadamente 1,500 m s.n.m. En particular, la muestra P13 es la que más se aleja de la LMM, es decir, isotópicamente es la más diferente del agua de lluvia. Este grupo también incluye a las muestras del Valle de La Ligua (P02 y P03), que de igual modo se localizan más próximas a la costa.
3. Muestras con valores intermedios entre ambos extremos (grupo verde en Fig. 49). Este grupo está integrado por las muestras del Valle de Pedernal (P06, P07, P08) y de Petorca (P04, P05, P10, P16), que se hayan efectivamente en una posición intermedia entre el Valle de El Sobrante y el de Las Palmas. La cabecera del Valle de Pedernal cuenta con elevaciones máximas de 3,200 m s.n.m., y en la subcuenca de Petorca existen elevaciones de hasta 2,300 m s.n.m., que descienden progresivamente hacia el Oeste. Dentro de este grupo existen diferencias que apuntan una recarga relativamente más fría y elevada para las muestras P08, P07 y P10, que progresivamente varían hacia condiciones más cálidas y menos elevadas de P04, P16, P05 a P06.



Tabla 4.17. Composición isotópica de las muestras analizadas.

Muestra	Localidad	Subcuenca	$\delta^2\text{H}$ ‰ VSMOW	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ VSMOW	Condiciones de recarga
P15	V. Los Olmos	El Sobrante	-88.1	-12.0	+ frío + elevación alejado de la costa
P09	Chincolco		-88.1	-11.8	
P06	Calle Larga	Pedernal	-71.4	-9.5	Condiciones intermedias
P07	Pedernal		-73.1	-10.4	
P08	Chalaco		-75.9	-10.4	
P04	La Ñipa	Petorca	-74.5	-10.0	
P05	El Peñón		-72.1	-9.7	
P10	Río Tinto		-76.1	-10.3	
P16	Los Comunes		-72.8	-9.9	
P12	Santa Julia	Las Palmas	-55.2	-7.6	+ cálido - elevación cerca de la costa
P13	Palquico		-54.8	-7.3	
P14	Las Palmas		-54.7	-7.7	
P02	El Carmen	La Ligua	-49.3	-7.5	
P03	El Molino		-59.2	-8.3	

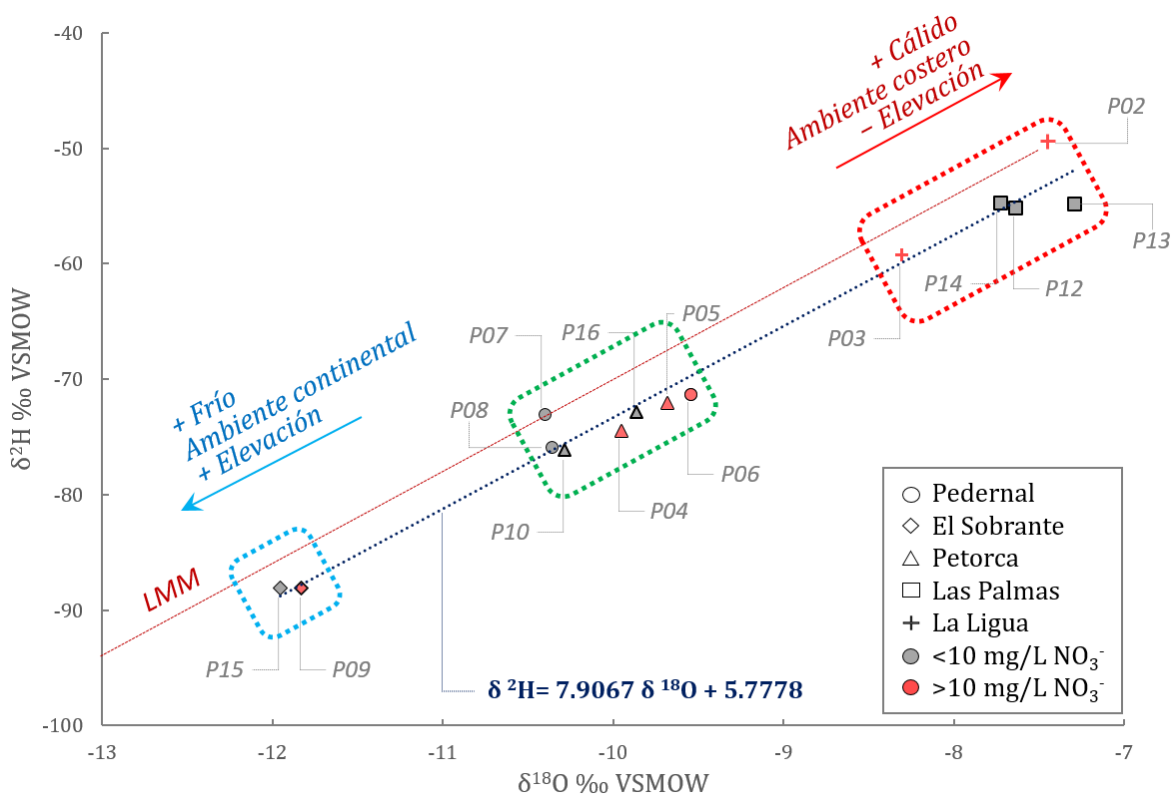


Fig. 49. Gráfico  $\delta^2\text{H}$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  para las muestras estudiadas (valores en la Tabla 4.17), indicando diferentes condiciones de recarga: (1) ambiente más frío y elevado (azul), (2) ambiente más cálido y a menor elevación (rojo), y (3) un grupo intermedio entre ambos extremos (verde).

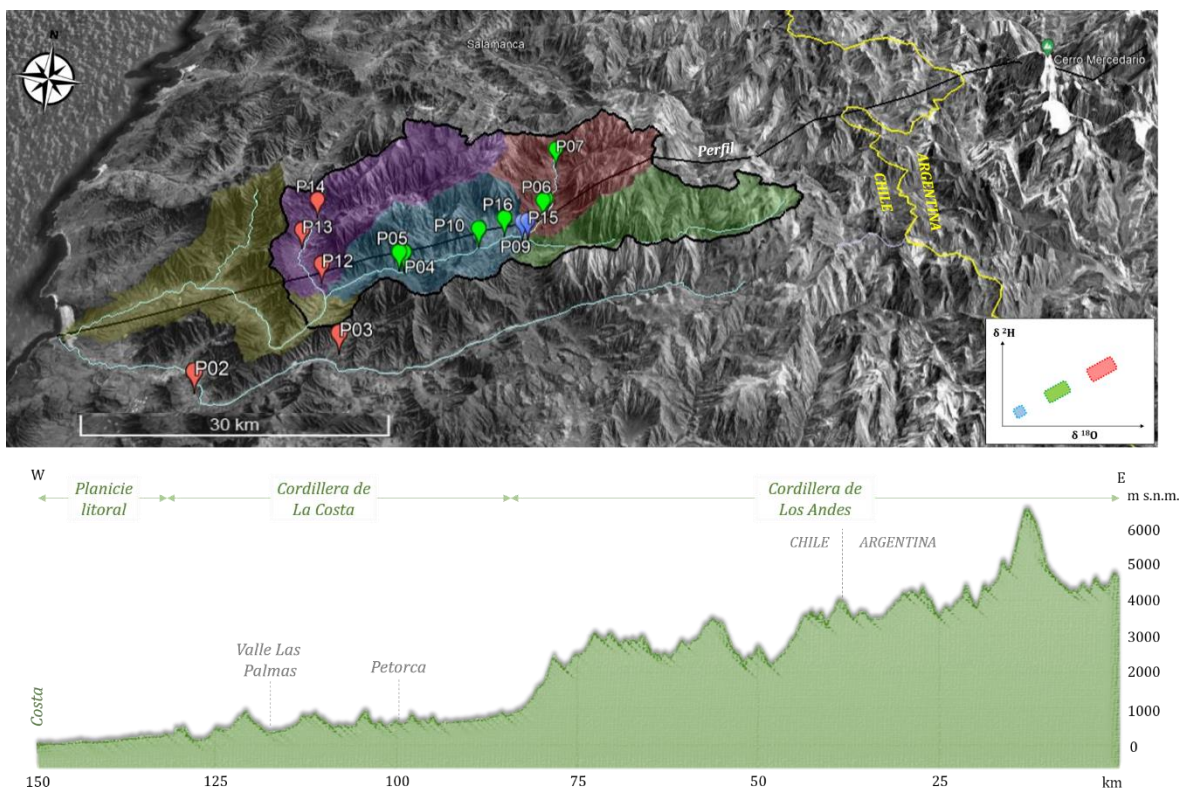


Fig. 50. A) Ubicación de las muestras estudiadas en un contexto regional, distinguiendo los grupos isotópicos definidos en función a las diferentes condiciones ambientales de su recarga. B) Perfil topográfico del perfil trazado en A.

Respecto a la Línea Meteorica Local (LML), no se encontró registro de ella para el área de estudio. Existen varios trabajos isotópicos realizados en la Zona Norte de Chile y otros pocos en la Zona Sur; algunos se indican en la Tabla 4.18 a modo de referencia. Dado que se cuenta con evidencias hidrogeoquímicas e isotópicas suficientes para asegurar que las muestras de agua subterránea estudiadas corresponden a flujos de reciente infiltración, se propone la relación isotópica determinada en este estudio como una adecuada aproximación a la **Línea Meteorica Local de Petorca**:

$$\delta^2\text{H} = 7.9067 \delta^{18}\text{O} + 5.7778$$

Tabla 4.18. Líneas Meteoricas publicadas para algunas zonas de Chile.

Zona	Línea Meteorica	Referencia
Norte de Chile	$\delta^2\text{H} = 7.90 \delta^{18}\text{O} + 9.5$	Fritz <i>et al.</i> (1976)
Norte de Chile (18–30°S)	$\delta^2\text{H} = 7.93 \delta^{18}\text{O} + 12.3$	Boschetti <i>et al.</i> (2019)
La Serena	$\delta^2\text{H} = 6.97 \delta^{18}\text{O} + 4.68$	Sánchez-Murillo <i>et al.</i> (2018)
Valparaíso (costa)	$\delta^2\text{H} = 8.58 \delta^{18}\text{O} + 12.88$	Sánchez-Murillo <i>et al.</i> (2018)
Zona inferior Cuenca Río Biobío	$\delta^2\text{H} = 7.39 \delta^{18}\text{O} + 7.92$	Ampuero-Tobar <i>et al.</i> (2018)

#### 4.10. MODELO CONCEPTUAL DE LOS SISTEMAS DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA PARTE MEDIA Y ALTA DE LA CUENCA DE PETORCA

En esta sección se integra toda la información generada y recabada en este estudio, relacionada con la dimensión física del agua subterránea, para tratar de entender el funcionamiento y distribución de los flujos subterráneos en la parte alta y media de la cuenca de Petorca, desde la perspectiva de la Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea.

Para establecer la jerarquía de los sistemas de flujo manifestados en la comuna de Petorca, se utilizaron los criterios que se resumen en la Fig. 51. La determinación de esta jerarquía se basa en valores o rasgos relativos a cada área de estudio, es decir, no existe un criterio único o un valor definido que marque un límite entre un flujo local e intermedio, o entre uno intermedio y uno regional. Cada sistema hidrogeológico tiene su propia configuración de sistemas de flujo y sus fronteras están definidas por la distribución de los flujos regionales: en su origen por las zonas de recarga (partes más altas de una macro-cuenca), durante su tránsito por la profundidad de la roca basamento, y en el término de su recorrido por la zona de descarga en la parte más baja de la cuenca o incluso en una cuenca adyacente. Cabe recordar que en el marco teórico de los SFAS, se entiende por **basamento** aquella unidad geológica de naturaleza impermeable, que limita la máxima profundidad de circulación de los flujos regionales (Carmona *et al.*, 2017).

Criterio		Valor / rasgo relativo	
<b>Parámetros físico-químicos</b> del agua subterránea	T	<i>menor</i>	<i>mayor</i>
	Eh	<i>+ oxidante</i>	<i>+ reductor</i>
	O.D.	<i>mayor</i>	<i>menor</i>
	C.E.	<i>menor</i>	<i>mayor</i>
	pH	<i>+ ácido</i>	<i>+ alcalino</i>
<b>Indicadores químicos</b> del agua subterránea	Aniones	$HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$	$HCO_3^- < SO_4^{2-} < Cl^-$
	STD	<i>menor</i>	<i>mayor</i>
	Li <sup>+</sup>	<i>menor</i>	<i>mayor</i>
<b>Indicadores ambientales</b> (en zona de descarga)	Vegetación	<i>freatófito</i>	<i>freatófito, halófito</i>
	Suelo	<i>poco salino, más ácido</i>	<i>salino, más alcalino</i>
	Manantiales, cuerpos de agua	<i>agua fría, actividad estacional</i>	<i>agua termal y salina, actividad permanente</i>

**Local**                      **Intermedio**                      **Regional**

Sistemas de flujo de agua subterránea

Fig. 51. Criterios y valores relativos utilizados como indicadores para definir la jerarquía de los diferentes sistemas de flujo de agua subterránea.

Las evidencias fisicoquímicas (bajos valores de temperatura, conductividad eléctrica; alto contenido de oxígeno disuelto; pH neutro a ligeramente ácido) e hidrogeoquímicas (predominio de  $\text{HCO}_3^-$ , bajas concentraciones de STD y de elementos conservativos como el  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Li}^+$ ) encontradas en este trabajo indican que todas las muestras estudiadas de agua subterránea corresponden a flujos de reciente infiltración, con un tiempo de residencia corto en el subsuelo, que en conjunto integran un **sistema de flujos locales**. Dentro de este sistema existen variaciones esencialmente de temperatura, conductividad eléctrica, potencial redox y concentración de bicarbonatos vs sulfatos, que manifiestan diferentes condiciones de circulación y grados de interacción agua-roca, pero que no representan grandes contrastes como para definir un sistema de flujos intermedio o regional.

La composición química del agua estudiada es resultado del intemperismo de las rocas presentes, esencialmente volcánicas intermedias-ácidas, granitoides y calizas. Esta interacción entre el agua y las rocas está limitada por el corto tiempo de residencia del agua en ambiente subterráneo. Además, se sugiere la participación de: a) Flujos de retorno por riego en los terrenos destinados a la agricultura, cuyo efecto es aumentar la concentración de los iones disueltos en el agua. Esto se observa en los pozos del Río Petorca (P04, P05), Río Pedernal (P06) y Chicolco (P09). b) Minerales de sulfuros asociados a los depósitos hidrotermales de la zona (Fig. 27), que al entrar en contacto con el agua meteórica, liberan  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Fe}^{+3}$  disueltos en el agua por oxidación del S y Fe, y por otra parte, alteran el pH y el potencial de óxido-reducción (Hem, 1985). Esto fue observado en el pozo de Los Comunes (P16), y probablemente tenga influencia en los pozos de Calle Larga (P06) y Chalaco (P08).

A pesar de que 6 muestras presentaron indicios de contaminación ( $\text{NO}_3^- > 10 \text{ mg/l}$ ), parecen presentar un comportamiento químico coherente con el resto de las muestras no alteradas, a excepción de las muestras del Valle de la Ligua (P02 y P03), tomadas como referencia de la cuenca adyacente a la de estudio, que presentaron valores muy altos de nitratos (76.16 y 58.96 mg/l, respectivamente). Por tanto, no es posible inferir procesos ni condiciones de circulación acerca de ellas, porque su composición química original puede estar muy alterada. Esto limitó la determinación de diferencias o semejanzas entre los flujos subterráneos de las cuencas de Petorca y La Ligua.

Respecto a las evidencias ambientales en superficie del carácter local del agua subterránea en Petorca, se cuentan: (a) la ausencia de manantiales termales, suelos salinos y de vegetación halófila; (b) la estrecha relación entre la variabilidad climática y la actividad de estos flujos, evidenciado por el impacto que ha tenido la escasez de precipitaciones en la disminución o desaparición de los flujos de descarga en manantiales (en su mayoría de régimen estacional), ríos, esteros y pozos (con una profundidad de hasta unos 60 m, según lo registrado en campo; Tabla 3.6)

Cabe precisar que en el presente trabajo se pretende realizar un modelo conceptual; no se busca modelar computacionalmente<sup>59</sup> el flujo de agua subterránea a través del acuífero definido por la autoridad hídrica, correspondiente a los depósitos cuaternarios que rellenan los valles. A diferencia de lo planteado por los estudios hidrogeológicos revisados (sección 4.7), que indican que el agua subterránea en la cuenca de Petorca viaja exclusivamente a través de los depósitos cuaternarios que rellenan los fondos de los valles (considerando impermeables las rocas volcano-sedimentarias cretácicas adyacentes a estos valles), en este trabajo se sugiere que los flujos locales de agua subterránea circulan a través de todas las unidades geológicas que conforman la estructura geológica somera de la cuenca, describiendo trayectos relativamente cortos. Evidencia de ello es la abundancia de manantiales que se encuentran en las laderas de los cerros y al interior de labores mineras ubicadas a cientos de metros sobre los fondos de los valles, donde no existen tales depósitos cuaternarios, y la transmisión de agua es promovida probablemente por oquedades y complejos sistemas de fracturas y fallas.

Considerando que existe una secuencia ininterrumpida de sequías anuales desde el año 2010 (Garreaud *et al.*, 2019), se infiere que el medio geológico en el área de estudio tiene una capacidad de almacenamiento alta, ya que es capaz de entregar agua a pesar de los reducidos volúmenes de recarga. Según lo señalado por informantes clave, existen sitios con condiciones favorables donde se concentra un mayor volumen de agua subterránea, denominados localmente como “embalses subterráneos” (ejemplo: Hierro Viejo – La Ñipa, Río Tinto y Valle Los Olmos), lo cual es coherente con la conjunción de sistemas de fracturas y fallas, y el mayor espesor de los depósitos cuaternarios en estos sectores, tal como lo demuestran estudios geofísicos (GCF Ingenieros, 2011). Además, los informantes indicaron que existen 4 niveles (en los depósitos) que aportan agua en los pozos del Valle de Petorca, los cuales se encuentran a una profundidad de 3-4 m, 7-9 m, ~20 m y ~100 m. Actualmente están agotados los dos niveles más someros.

Antes de ir a campo, se tenía la hipótesis de que los pozos más profundos (~100 m) manifestarían la influencia de flujos intermedios; sin embargo, las muestras de los pozos más profundos a los que se pudo acceder, con una profundidad de 80 m (P06, Calle Larga; P09, Chicolco), 85 m (P15, Valle Los Olmos) y hasta 120 m (P05, El Peñón), presentan igualmente rasgos de flujos locales: baja temperatura, pH ligeramente ácido, bajas concentraciones de Li<sup>+</sup> (<2 µg/l), carácter bicarbonatado y sulfatado.

Por otro lado, antecedentes piezométricos presentados por Rybertt (2019) indican que los flujos subterráneos son paralelos a los cursos superficiales de agua (Fig. 52); sin embargo, cabe tener en cuenta que en dicho modelo las laderas de los cerros fueron consideradas como

---

<sup>59</sup> Un modelo conceptual es la representación o abstracción de un sistema, fenómeno o proceso, que busca ilustrar sus componentes y la relación entre ellos. Por su parte, un modelo computacional consiste en la iteración de procedimientos computacionales para resolver una serie de ecuaciones matemáticas, que buscan representar tal sistema, fenómeno o proceso. La formulación de preguntas inadecuadas, o el establecimiento de supuestos o variables o condiciones equivocadas, evidentemente conducen a construir modelos irreales, como es discutido en la sección 6.2.



fronteras impermeables (lo cual se descarta) y que no existen datos de pozos fuera de los fondos de los valles. Por tanto, en el presente estudio se considera posible otras direcciones de flujo que de todas formas son coherentes con los patrones topográficos.

Además, Rybertt (2019) determinó que la geometría del “acuífero” se encuentra principalmente controlada por fallas N-S correspondientes al **Sistema Hierro Viejo - Los Tornos** (Vicencio *et al.*, 2017) y **Sistema Quebrada de Castro** (Camus *et al.*, 1991), que se disponen paralelas con orientación N20°W/80°SW. No se cuenta con mayor información sobre la cinemática del primer sistema, posiblemente está relacionado con la dislocación del cauce del Río Petorca en la zona de La Ñipa, donde es desplazado aproximadamente 2 km mediante un mecanismo dextral<sup>60</sup>, lo cual es consistente con el carácter dextral de los sistemas descritos por Camus *et al.* (1991). El Sistema de Fallas Quebrada de Castro, conformado por una serie de fallas subparalelas dextrales y con menor componente transpresivo, genera el descenso del bloque occidental. Esta depresión en las rocas cretácicas permite una mayor acumulación del relleno fluvio-aluvial; así lo respaldan estudios geofísicos (GCF Ingenieros, 2011) que indican un mayor espesor de los depósitos cuaternarios en el sector limitado por las fallas de Quebrada de Castro y Hierro Viejo (Fig. 53) (Rybertt, 2019).

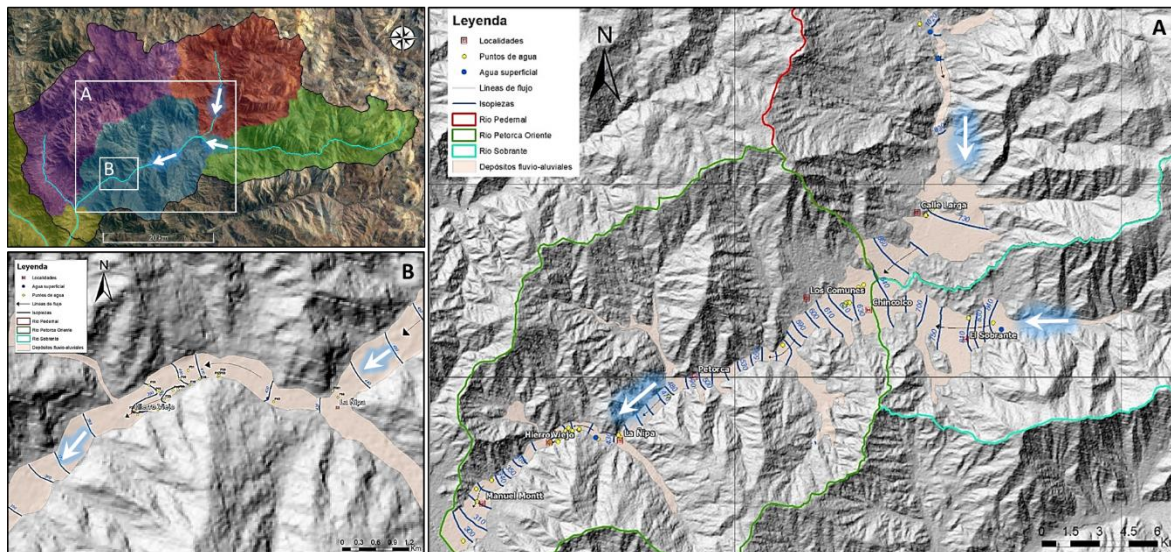


Fig. 52. A) Mapa piezométrico del sector alto del Valle de Petorca, elaborado por J. Rybertt (2019). B) Sector ampliado de Hierro Viejo y La Ñipa.

Entre La Ñipa y Hierro Viejo, donde se encuentra el sistema de fallas Hierro Viejo - Los Tornos, el nivel piezométrico supera la cota superficial, donde surge el agua subterránea en forma natural. La descarga en este pequeño cuerpo de agua depende de las variaciones estacionales y de las tasas de extracción en pozos cercanos (Rybertt, 2019). Según perfiles gravimétricos (GCF Ingenieros, 2011), en este sector las rocas volcánicas y sedimentarias del Cretácico se

<sup>60</sup> dextral: relativo a una falla de rumbo o transcurrente, donde el bloque ubicado a la derecha del plano de falla tiene un movimiento hacia la derecha. En caso contrario, se denomina “sinistral”.



encuentran a menor profundidad, lo que disminuye considerablemente el espesor de los depósitos en comparación con el resto del acuífero.

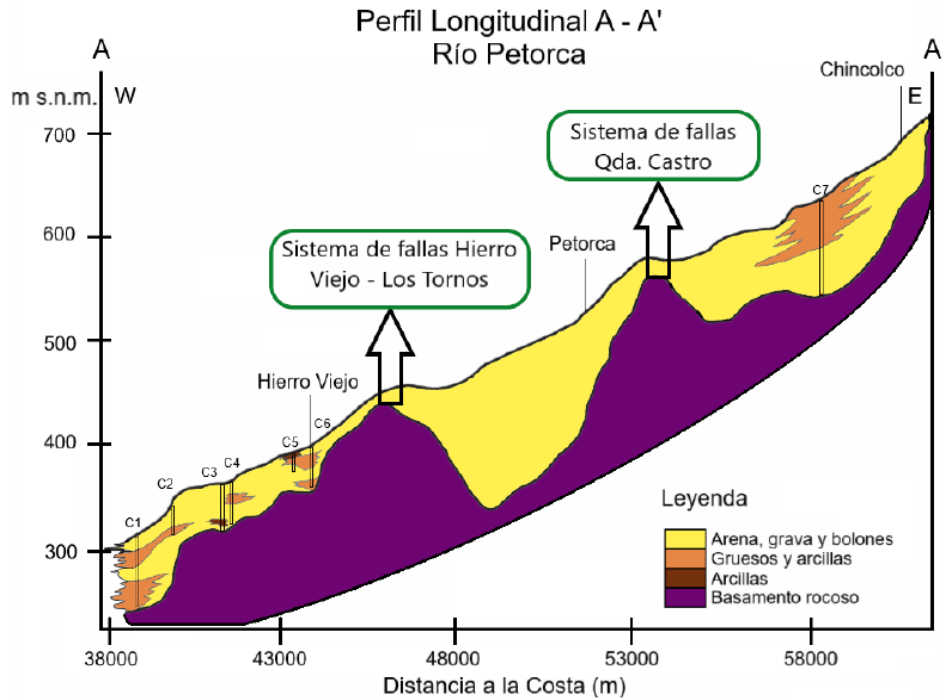


Fig. 53. Perfil del "acuífero de Petorca" indicando las variaciones en el espesor de los depósitos fluvio-aluviales y la profundidad del "basamento" (referido a las rocas volcánicas y sedimentarias del Cretácico), posiblemente controlado por estructuras N-S. Elaborado por Rybertt (2019).

En relación con la fuente y condiciones de recarga de las muestras analizadas, inferida a partir de las variaciones en la composición isotópica de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , se determinó una fuente meteórica empobrecida en  $\delta^2\text{H}$  respecto a la Línea Meteórica Mundial, donde se identifican 3 ambientes diferentes de recarga: (1) Muestras de la parte baja del Valle El Sobrante: ambiente continental más frío y de mayor elevación. (2) Muestras del Valle de Las Palmas y La Ligua: ambiente más cercano a la costa, de menor elevación y más cálido. (3) Muestras del Valle de Pedernal y Petorca: condiciones intermedias entre los grupos 1 y 2. Dado que se trata de flujos locales, la zona de recarga de todas estas muestras se debe encontrar dentro de la misma cuenca, donde varían significativamente las elevaciones de las cimas topográficas, desde unos 900 m s.n.m. en la parte SW de la comuna de Petorca, hasta unos 3,600 m s.n.m. en la cabecera de la subcuenca del Río El Sobrante.

Cabe aclarar que sólo se dispone de datos en los fondos y terrazas de los ríos (zonas bajas), donde se han construido los pozos de extracción de agua subterránea; no existen pozos en los sectores con mayor elevación. Además, no fue posible acceder a manantiales que brotan en zonas más elevadas (sólo se pudo tomar muestra de un manantial cuya descarga es encausada por una tubería a lo largo de decenas de metros, en un estanque en Pedernal).

## Perfiles esquemáticos

Otro punto relevante en la elaboración de un modelo conceptual bajo la Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea es la visualización de la distribución y dinámica de los sistemas de flujo tanto en el superficie (plano horizontal) como en profundidad (plano vertical). En consecuencia, se presentan dos perfiles a lo largo de las direcciones principales de escurrimiento subterráneo: (1) Valle Pedernal-Petorca y (2) Valle de Las Palmas (Fig. 54).

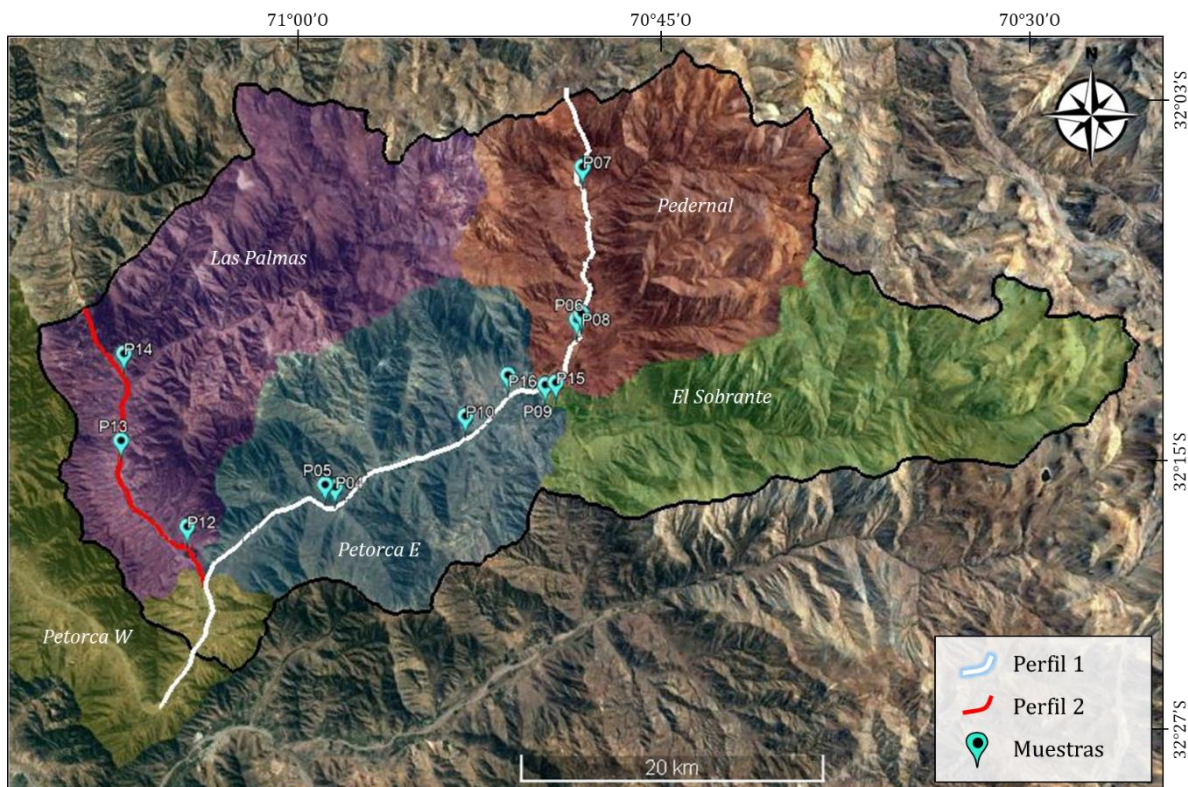


Fig. 54. Perfiles a lo largo de los valles de Pedernal y Petorca (Perfil 1) y Valle Las Palmas (Perfil 2).

En el perfil 1 (Fig. 55), desde el sector de Pedernal hasta Artificio, se observa el sistema de flujo local descendiendo según el gradiente topográfico, al mismo tiempo que su composición de iones mayoritarios va evolucionando en este sentido, desde las facies bicarbonatadas (propio de agua recientemente infiltrada) en el Valle Pedernal, hacia las facies sulfatadas, aguas abajo en el Valle de Petorca. La variación isotópica indica que la infiltración se produjo a diferentes condiciones: más frías y/o elevadas para para P07, P08 y P10, condiciones que gradualmente se hicieron más cálidas y/o menos elevadas en el orden: P04 - P16 - P05 - P06. Las muestras del Valle El Sobrante (P09 y P15) no fueron incluidas en este perfil, ya que el flujo que representan viaja con otra dirección y tiene una composición isotópica diferente, que indica condiciones de recarga notablemente más elevadas y/o frías.

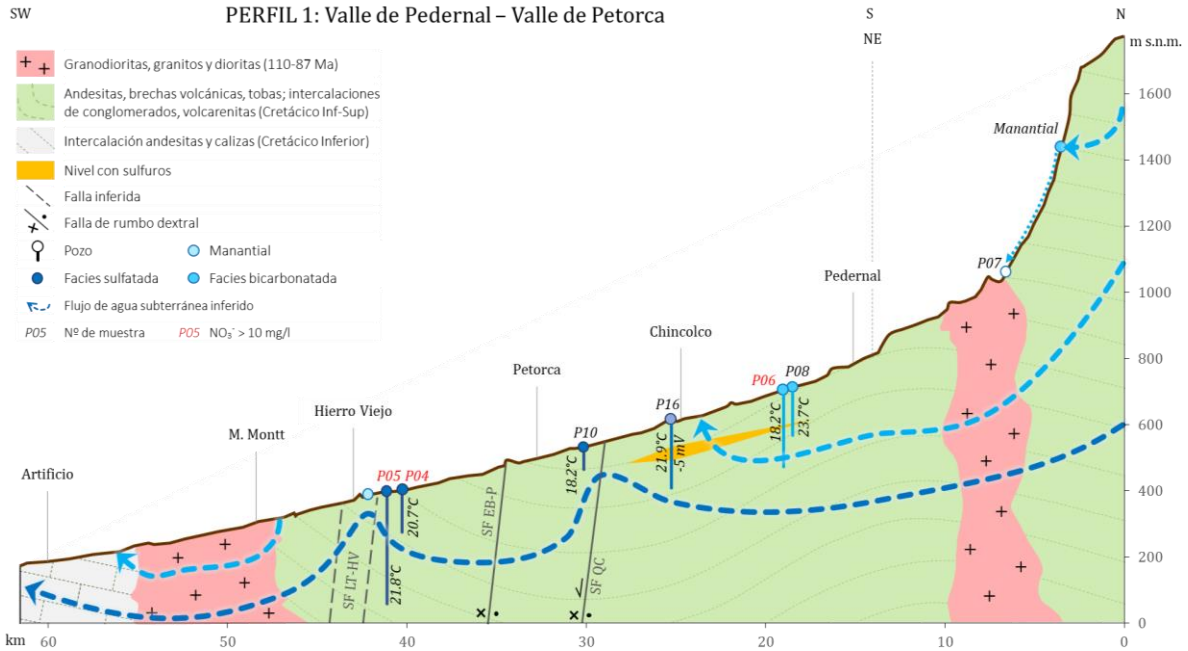


Fig. 55. Perfil 1 desde Pedernal a Artificio, mostrando el sistema de flujos locales (flechas segmentadas). SF LT-HV: Sistema de fallas Los Tornos - Hierro Viejo. SF EB-P: Sistema de fallas El Bronce - Petorca. SF QC: Sistema de fallas Quebrada de Castro. Ubicación en Fig. 54.

En el caso del Valle Las Palmas (perfil 2; Fig. 56), la evolución hidroquímica se presenta en forma inversa al declive topográfico, que disminuye de Norte a Sur. Las facies hidroquímicas varían desde bicarbonatada en la muestra P12, en la cota más baja (329 m s.n.m.), hacia el campo sulfatado en la muestra P14, ubicada a una cota mayor (563 m s.n.m.); entre ellas se haya P13 con una composición y posición topográfica intermedia. En el mapa de equipotenciales para la parte baja del Valle Las Palmas (Fig. 57; GCF Ingenieros, 2011), se observa que el sentido del flujo subterráneo (en el plano horizontal) es igual al del gradiente topográfico, paralelo al Estero Las Palmas. A juzgar por la temperatura, la muestra P13 habría circulado a mayor profundidad que P12 y P14. Por otro lado, con base en la composición isotópica, P13 se diferencia de las otras dos muestras por ser más enriquecida en  $\delta^{18}\text{O}$  y por distanciarse de la Línea Meteorica Local, sobre la cual se disponen P12 y P14. Por lo tanto, es probable que el flujo de agua subterránea no tenga el mismo patrón que la dirección del perfil (que es la dirección del valle), no evoluciona químicamente en ese sentido NNW-SSE; tal vez representa un aporte E-W. La componente en P13 es de abajo hacia arriba.



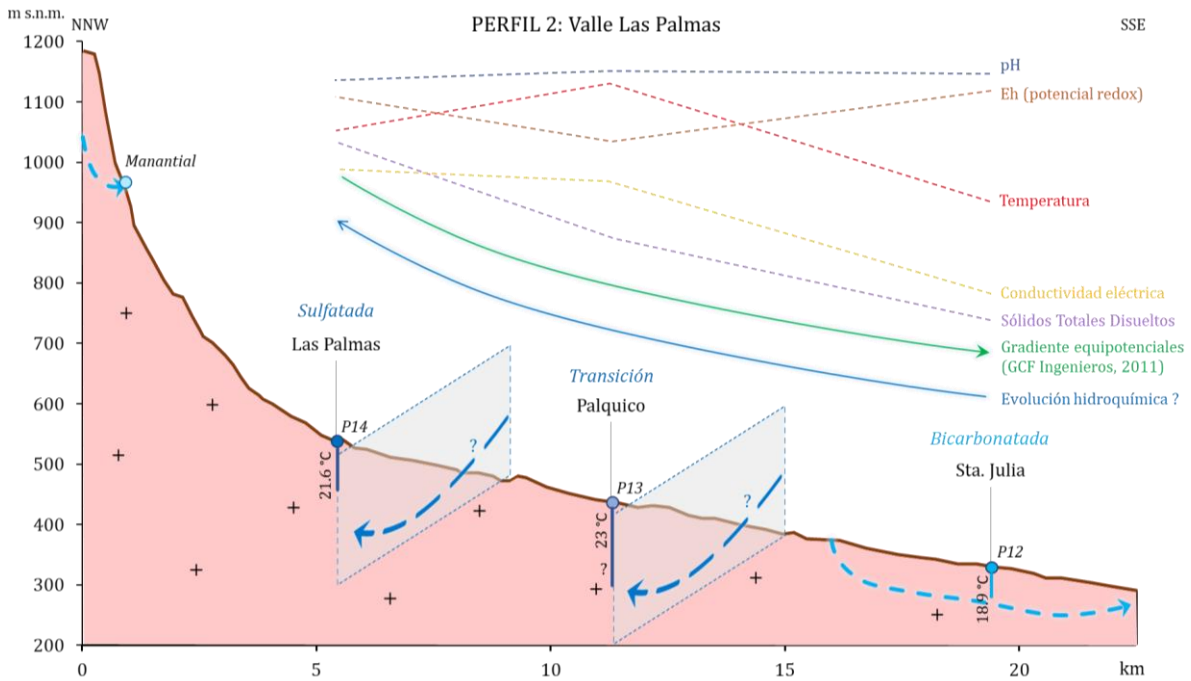


Fig. 56. Perfil a lo largo del Valle Las Palmas mostrando el probable aporte lateral a la dirección del perfil de flujos subterráneos (flechas segmentadas), los patrones de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo (enero, 2020) y gradiente de equipotenciales (GCF Ingenieros, 2011). Ubicación en Fig. 54.

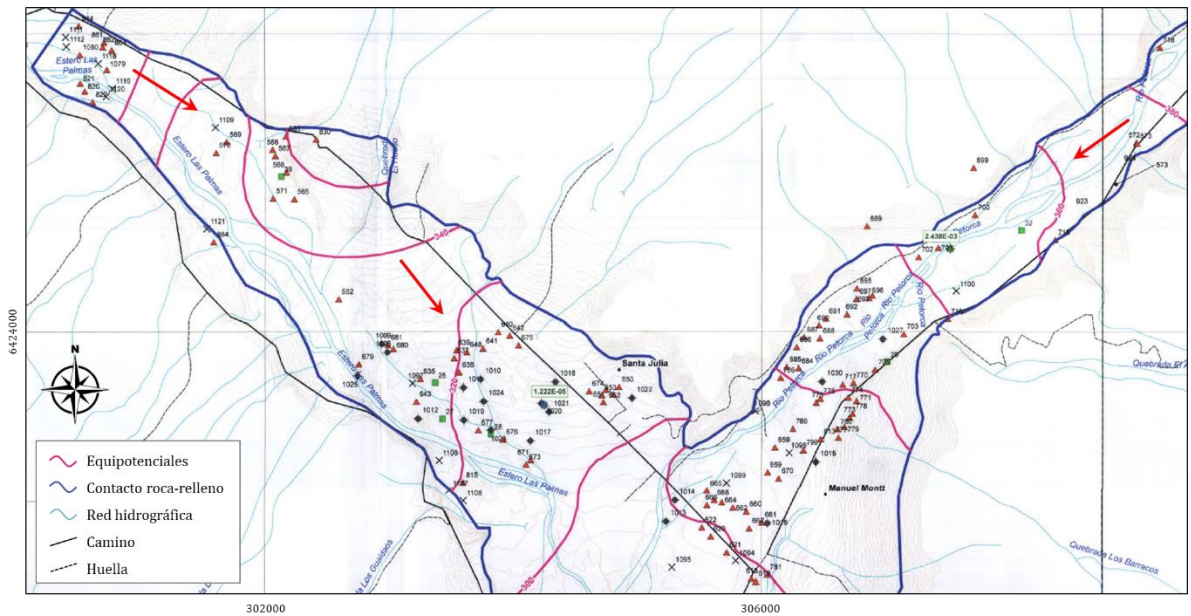


Fig. 57. Extracto del plano de equipotenciales elaborado por GCF Ingenieros (2011), correspondiente a la parte baja del Valle Las Palmas y confluencia con el Río Petorca. Las flechas rojas indican el sentido del flujo subterráneo en el plano horizontal. Modificado de GCF Ingenieros (2011).

## Perspectiva regional

Dado que no se encontró evidencias de flujos regionales en el área de estudio y que no se cuenta con estudios geofísicos que describan la profundidad del basamento, no fue posible delimitar en este trabajo el sistema hidrogeológico en su parte más profunda. Cabe aclarar que el basamento, en el marco teórico de los SFAS, es la unidad geológica impermeable que limita la máxima profundidad de circulación de los flujos regionales; por tanto, no guarda ninguna relación con el concepto de “basamento” descrito en los estudios hidrogeológicos revisados (sección 4.7), constituido por rocas cretácicas que subyacen a los depósitos cuaternarios.

Sin embargo, al aplicar la TSFAS con una perspectiva regional (fuera de los límites de la cuenca del Río Petorca), y al observar los patrones topográficos caracterizados por el descenso progresivo de la superficie terrestre de Este a Oeste, es posible suponer que los flujos regionales provienen de la parte alta de la Cordillera de Los Andes, donde describirían una trayectoria vertical descendente hasta alcanzar la roca basamento a grandes profundidades. Su zona de tránsito correspondería al dominio andino occidental y de la Cordillera de la Costa, pasando bajo la cuenca de Petorca a través de las unidades pre-cretácicas que se encuentran bajo las rocas aflorantes, describiendo una trayectoria subhorizontal de Este a Oeste.

Finalmente, se plantea la hipótesis de que los flujos regionales descargan cerca del sector costero (Longotoma) o incluso bajo del mar, determinado por la intersección de la superficie topográfica con la superficie equipotencial más baja del flujo regional. Por su parte, el sistema de flujos intermedios de agua subterránea (de los cuales tampoco se halló evidencia en el área de estudio) se ubicaría a una profundidad intermedia entre los flujos locales y regionales, y probablemente descarguen junto a los flujos regionales. El esquema de los sistemas de flujo quedaría configurado según lo planteado en la Fig. 58.

Para verificar esta hipótesis se propone buscar las siguientes evidencias, que quedan fuera de los alcances de este trabajo:

- a) Profundidad de la roca basamento: aquella unidad geológica de naturaleza impermeable, que limita la máxima profundidad de circulación de los flujos regionales. Para ello se requieren estudios geofísicos pero de mayor alcance (en profundidad) que los hasta ahora realizados en la cuenca de Petorca (sección 4.7).
- b) Zona de tránsito: muestreo de pozos más profundos (> 150 m) en la cuenca de Petorca, especialmente en la parte baja (excluida en este trabajo) donde se espera que la profundidad de los flujos regionales disminuya por encontrarse próximos a la zona de descarga.
- c) Zona de descarga de flujos regionales, evidenciada por indicadores como:
  - Descarga en el continente: suelos salinos y alcalinos, vegetación halófitas, manantiales termales y salinos de carácter permanente.
  - Descarga submarina: indicadores de salidas de flujos subterráneos que alteren localmente la composición química del agua de mar, y acusen contrastes de densidad y

temperatura, a través del monitoreo directo en la zona costera y/o mediante métodos indirectos como el análisis de imágenes satelitales.

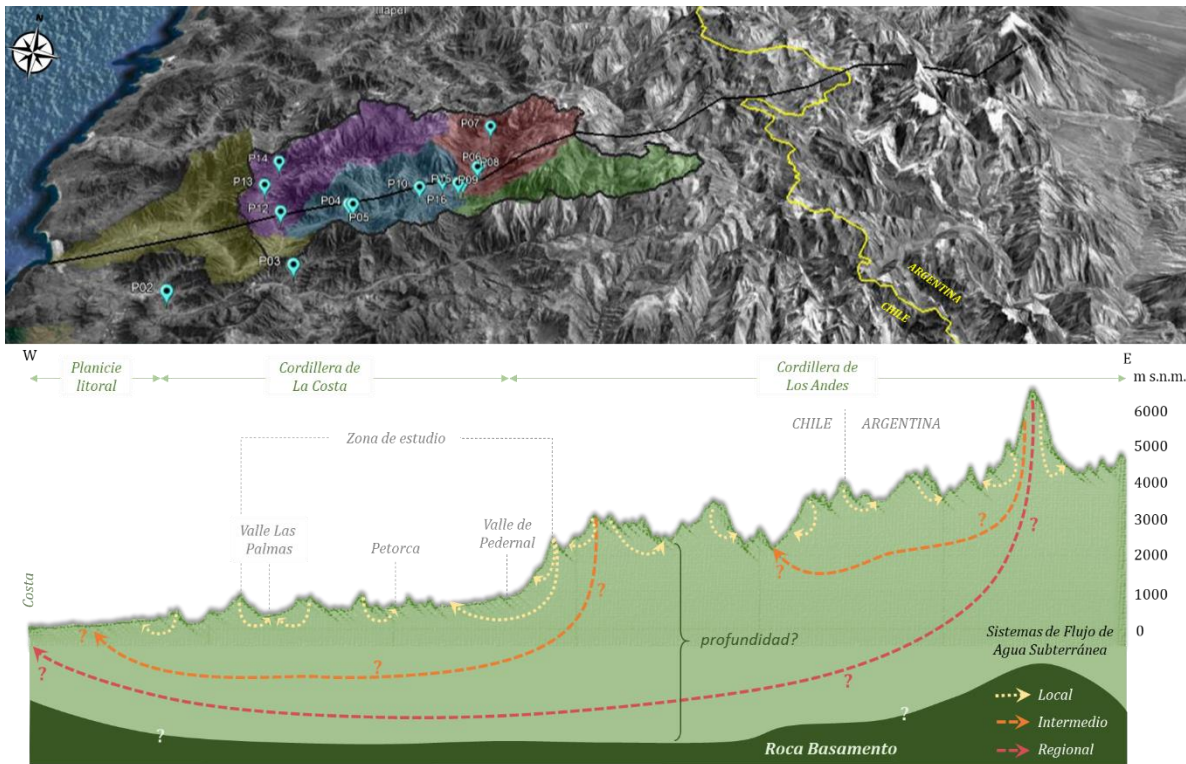


Fig. 58. Esquema hipotético de los sistemas de flujo de agua subterránea, distribuidos en un perfil trazado desde el punto más elevado en la cordillera andina, pasando por la cuenca del Río Petorca, hasta su desembocadura en las costas del Pacífico (cota 0).

Este ejercicio de abstracción permite reflexionar sobre la importancia de adoptar una perspectiva regional para comprender el funcionamiento del agua subterránea. Los flujos regionales son los que delimitan la geometría del sistema hidrogeológico, constituyendo su base o límite inferior, de manera análoga a una cuenca para el agua superficial; a partir de ellos se establece la jerarquía de los sistemas de flujo para una región dada.

El problema de la escala está relacionado a una de las falencias más significativas en la forma en que corrientemente se estudia el agua subterránea, limitándose a evaluar la parte más somera del sistema hidrogeológico, donde probablemente sólo se manifiestan los flujos locales (los flujos intermedios y regionales quedan fuera de la ecuación). Esto se relaciona directamente con la forma en que se ha fragmentado el sistema hidrogeológico al definir (de manera inadecuada) la unidad de estudio de la hidrogeología: el acuífero. Tal como se acaba de ilustrar para el caso de estudio (Fig. 58), el “Acuífero (cuenca) Río Petorca” es una pequeña porción del sistema, por tanto limita la comprensión del esquema hidrogeológico completo. En consecuencia, la unidad *acuífero* parece ser incoherente con la TSFAS por una inconsistencia escalar; la perspectiva regional es fundamental para la aplicación de la TSFAS, discusión que será profundizada en la sección 6.2.2.



## 5. CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA PARA RIEGO Y CONSUMO HUMANO

Con base en la Norma Chilena Oficial NCh409/1.Of.2005 (INN, 2006) y NCh1333.Of78 (INN, 1999), detalladas en el ANEXO 5, donde se establecen los requisitos de calidad del agua para consumo humano y para riego, respectivamente, es posible distinguir una calidad de agua inapropiada en los puntos de muestreo indicados en la Tabla 5.1 y Fig. 59.

Tabla 5.1. Puntos de muestreo que presentan una calidad de agua inapropiada para riego y/o consumo humano, según la Norma Chilena Oficial NCh1333.Of78 y NCh409/1.Of.2005.

Parámetro	Mn	Mo	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>
Unidad	µg/l	µg/l	mg/l	mg/l
Límite NCh	<b>100 µg/l</b>	<b>10 µg/l</b>	<b>50 mg/l</b>	<b>250 mg/l</b>
P02	1.2	0.8	<b>76.16</b>	101.13
P03	0.6	14.6	<b>58.96</b>	61.76
P04	2.3	1.4	<b>22.3</b>	304.02
P05	1.2	0.8	<b>19.88</b>	101.13
P06	0.6	14.6	<b>39.56</b>	61.76
P07	2.3	1.4	1.17	304.02
P09	48.7	1	<b>15.86</b>	107.66
P14	1.1	7.2	8.02	280.37
P16	<b>155.1</b>	2.1	5.02	154.36

	Excede los límites para consumo humano (Norma Chilena Oficial NCh409/1.Of.2005; INN, 2006)
	Excede los límites para riego (Norma Chilena Oficial NCh1333.Of78; INN, 1999)
15	Excede valores naturales de nitratos en el agua subterránea (NO <sub>3</sub> > 10 mg/l)

### 5.1. FUENTES DE NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, Mn y Mo EN EL AGUA SUBTERRÁNEA

El nitrógeno (N) presente en la atmósfera (N<sub>2</sub>) es principalmente fijado en el suelo por plantas y bacterias en su forma reducida como ion amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>; N<sup>3-</sup>), y es convertido (oxidado) a nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>; N<sup>3+</sup>) y nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>; N<sup>3+</sup>) por las bacterias del suelo (nitrificación). El nitrato es nuevamente reducido bajo condiciones anaeróbicas a óxido nitroso (N<sub>2</sub>O; N<sup>+</sup>) (desnitrificación), el cual en la atmósfera se convierte en NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, librandó H<sup>+</sup> y acidificando la lluvia. La oxidación de amonio disuelto en el agua por contacto con el oxígeno generará nitritos y nitratos. El uso de fertilizantes sintéticos como el amonio y otros compuestos nitrogenados, así como también la combustión de combustibles fósiles (NO<sub>x</sub>), aportan N antrópico al ciclo del N. Las plantas pueden aprovechar el N en forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, por eso se utilizan en la elaboración de fertilizantes, y es muy frecuente que en zonas agrícolas se contamine el agua subterránea con los excesos de nitratos no aprovechados por las plantas, que logran infiltrarse a la zona saturada. Bajo condiciones naturales, los niveles de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en el agua subterránea suelen no

sobrepasar los 10 mg/l (OPS, 1980), por lo que su exceso puede estar asociado a procesos orgánicos (contaminación por desechos orgánicos o aguas residuales, descomposición de materia orgánica) o químicos (contaminación por residuos industriales y uso de fertilizantes), aunque por lo general la contaminación se puede producir en un sitio o en un momento sustancialmente alejado del punto de muestreo (Hem, 1985). Dado el contexto agrícola en el que se encuentran las muestras estudiadas, y el mal manejo de residuos domiciliarios (expuesto por los informantes clave; enero, 2020) es muy probable que los altos niveles de nitratos observados son originados por las prácticas agrícolas y sanitarias en la comuna de Petorca.

El ion sulfato ( $\text{SO}_4$ ) forma parte de los constituyentes mayoritarios del agua subterránea, el cual viene disuelto en el agua de lluvia y también proviene de la interacción del agua con rocas evaporíticas o por oxidación de los sulfuros. Sin embargo, las concentraciones naturales de sulfatos en el agua pueden aumentar en zonas agrícolas por flujos de retorno (Hem, 1985) y uso de fertilizantes, o por contaminación de lixiviados mineros (Casado *et al.*, 2013). Dada la ausencia de depósitos evaporíticos en el área de estudio, se descarta esta fuente; seguramente, la oxidación de los sulfuros presentes constituye un aporte importante de sulfatos al agua subterránea. Paralelamente, los factores antrópicos mencionados probablemente están elevando las concentraciones de  $\text{SO}_4$  en el agua analizada.

El manganeso (Mn) es un constituyente menor de rocas ígneas y metamórficas, puede sustituir al Fe, Mg o Ca en los silicatos (minerales ferromagnesianos), y al Ca en los carbonatos y arcillas. En las aguas naturales, el Mn se encuentra en su forma reducida  $\text{Mn}^{2+}$  producto de su liberación desde los minerales por alteración. Los solutos orgánicos disueltos pueden reducir los óxidos de Mn y liberar  $\text{Mn}^{2+}$  al agua. Altas concentraciones de Mn ( $> 1\text{mg/l}$ ) se presentan en drenajes ácidos de minas de carbón, o en manantiales termales, muchas veces asociados a depósitos de óxidos de Mn (Hem, 1985). Actividades mineras e industriales pueden ser una fuente de contaminación por Mn. En el caso de estudio, se aprecia para el conjunto total de muestras una alta correlación del Mn con el Fe ( $R^2 = 0.79$ ) y Co ( $R^2 = 1$ ), lo cual es coherente con el semejante comportamiento químico que presentan estos elementos (Mn y Co pueden sustituir al Fe en minerales ferromagnesianos); la coprecipitación o absorción de Co en óxidos de Fe y Mn suele ser un factor importante en el control de las concentraciones naturales en el agua (Hem, 1985). Sin embargo, no se descarta que el valor anómalo de Mn observado en el pozo P16 (Los Comunes) provenga de los residuos mineros (jales o relaves) dispuestos en las cercanías del pozo (Antawara, La Merced y Black Colt; Fig. 16; ANEXO 6), tal como fue señalado por informantes (enero, 2020).

El molibdeno (Mo) es un metal que suele formar sulfuros, como la molibdenita, y es un producto secundario en la minería del cobre. El Mo se libera al ambiente por lixiviación de minerales ricos en Mo, y por la quema de combustibles fósiles. Representan una fuente importante de contaminación los desechos mineros y de las plantas de tratamiento de menas metálicas (Hem, 1985). Para las muestras analizadas, el Mo presenta una alta correlación con el Cu ( $R^2 = 0.74$ ), confirmando la asociación entre ambos. Los niveles elevados de Mo observados en El Molino

(P03) y Calle Larga (P06) probablemente se deben a la presencia de depósitos cupríferos y/o jales mineros cercanos a los pozos en cuestión.

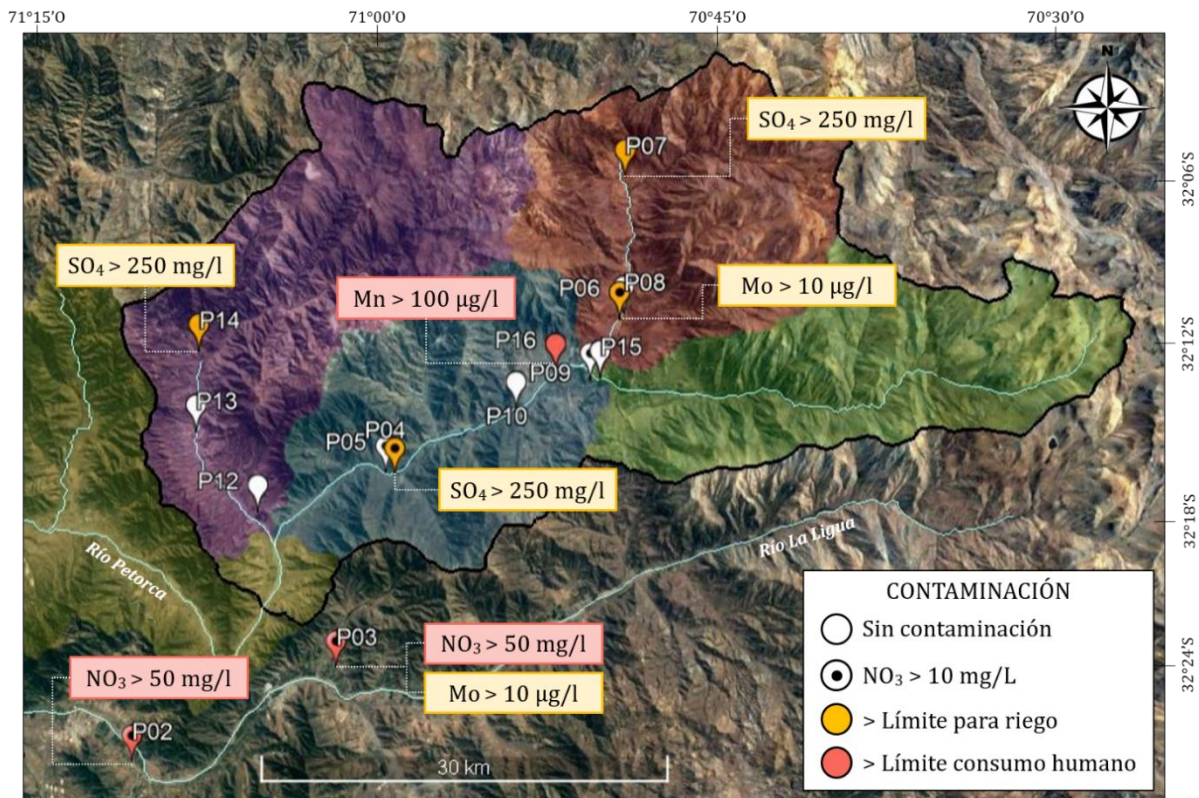


Fig. 59. Puntos de muestreo de agua subterránea que exceden los valores de  $\text{NO}_3$  naturales ( $> 10 \text{ mg/l}$ ), y los límites permisibles de la Norma Chilena Oficial para riego (NCh1333.Of78; INN, 1999) en naranja, y para consumo humano (NCh409/1.Of.2005; INN, 2006) en rojo. Valores en la *Tabla 5.1*.

## 5.2. RIESGOS PARA LA SALUD DE LA POBLACIÓN

Los efectos adversos de la exposición sostenida a estas sustancias se resumen a continuación:

El consumo de altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  ( $> 44 \text{ mg/l}$ ) en el agua puede causar metahemoglobinemia en niños (Hem, 1985), un trastorno sanguíneo debido al aumento en el pH gástrico que produce la reducción de nitrato a nitrito, provocando una disminución en la captación de oxígeno en los eritrocitos. La ingesta de  $\text{NO}_3^-$  también inhibe la captación de yodo por la glándula tiroides, induciendo la disminución de secreción de las hormonas tiroideas. Otros efectos observados son deficiencias en la calidad espermática, abortos y alteraciones en el tiempo de gestación, y alteraciones congénitas en el desarrollo del tubo neural (estructura precursora del sistema nervioso central) (SEMARNAT, 2012).

La ingesta de agua con altas concentraciones de compuestos sulfatados puede provocar, a mediano y largo plazo, metahemoglobinemia, problemas gástricos, daño renal, desórdenes neurológicos y cáncer. Menores de 6 meses presentan mayor afectación (Bolaños-Alfaro *et al.*, 2017). En particular, el sulfato de 2,4-diaminoanisol, sulfato de dietilo y dimetilo, y sulfato de hidracina e hidracina están catalogados como sustancias cancerígenas (USDHHS, 2016).

Los efectos tóxicos del Mn en la salud incluyen la alteración de las habilidades motoras en adultos, y se han reportado daños a nivel cardiovascular, hepático, hematológico y endocrino (Ramírez y Azcona-Cruz, 2017). Además, la acumulación de Mn en el cerebro puede conducir a una forma atípica de Parkinson (Guilarte, 2011). En niños se pueden desarrollar problemas neurológicos, cognitivos y conductuales, como irritabilidad, comportamientos agresivos o antisociales (Khan *et al.*, 2011), y la disminución del coeficiente intelectual (Moshfiquir *et al.*, 2016; Rahman *et al.*, 2017).

Respecto al Mo, en general, se ha encontrado poca evidencia de su toxicidad en la salud de las personas (FNB-IOM, 2001). Sólo se han registrado casos aislados como el aumento de los niveles séricos de ácido úrico y ceruloplasmina en trabajadores expuestos en una planta de tostado de molibdenita, y un caso de ingesta de Mo en un suplemento dietético (13.5 mg en 18 días) que generó psicosis aguda con alucinaciones, convulsiones y otros síntomas neurológicos (García-Casal *et al.*, 2013).

## 6. DISCUSIÓN

Este capítulo está destinado a integrar los elementos físicos y humanos identificados a lo largo de este trabajo, que interactúan alrededor del agua subterránea en la parte media y alta de la cuenca de Petorca. En primer lugar, se dará respuesta a las preguntas que motivaron esta investigación. Luego se plantearán cuestionamientos al actual modelo de gestión del agua, con una perspectiva hidrogeológica, sin pretender abarcar los puntos políticos e ideológicos que sostienen el actual modelo mercantilista del agua. Además, se retomarán algunas inquietudes manifestadas por los informantes clave en el trabajo de campo (enero, 2020) para ofrecer respuestas con base en las evidencias recabadas en este estudio. Finalmente, se buscará proponer algunas consideraciones para el estudio y evaluación del agua subterránea, que pueden ser aplicadas a escala comunal, regional y nacional.

### 6.1. RESPUESTA A LAS PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

***¿Cuál es la relación entre el agua subterránea y el actual modelo de uso, administración y gestión del agua? ¿Cuál ha sido el impacto de este modelo en el ciclo hidrológico y en las dinámicas sociales de la comuna de Petorca?***

El agua en Chile es concebida como una mercancía, lo cual permite su apropiación, acumulación y distribución a merced de las lógicas de mercado. El marco institucional, político, jurídico y técnico chileno en materia de agua ha propiciado regímenes de extracción insostenibles, un reparto inequitativo del agua y un desabasto que afecta en mayor grado a las zonas rurales del país. En Petorca, el ciclo hidrológico se ha visto severamente alterado, a tal punto que los ríos se han agotado por completo, al igual que muchos manantiales y los niveles someros del agua subterránea. Ello ha sido consecuencia de procesos naturales, como la disminución sostenida de precipitaciones (aunque bien podría considerarse un efecto del cambio climático observado a escala global), y factores sociales que determinan la manera en que se utiliza el agua y cómo se desarrollan las diferentes actividades humanas en el territorio. Si bien la sequía ha provocado una importante disminución de los caudales hidrológicos en la cuenca de Petorca, el modelo de administración y gestión del agua repercute directa o indirectamente en el estado de las fuentes de agua, y controla en definitiva quiénes pueden acceder a ella, en qué cantidad y calidad.

A pesar de que la cuenca de Petorca había sido declarada “agotada” en 1997 (ver sección 3.4.2B), la DGA continuó otorgando títulos de propiedad de agua subterránea hasta el año 2016, con volúmenes mayores que el agua supuestamente disponible para su aprovechamiento, sin ningún tipo de control, fiscalización ni priorización de su uso. Estos derechos de agua se concentran mayormente en el agronegocio, destinado al monocultivo de aguacates de exportación. La privatización del agua y su extracción desregulada por parte de empresas agrícolas ha permitido desviar el curso natural del agua para ser represada y acumulada en

grandes piscinas (con altas pérdidas por evaporación) para terminar como un aguacate sobre la mesa de consumidores europeos.

En contraste, los vecinos de estas parcelas agrícolas miran con impotencia los verdes cultivos mientras resuelven a diario cómo sobrevivir con 50 o 100 litros de agua, según sea la voluntad política, abastecida a través de camiones aljibe y/o pozos comunitarios que gradualmente se han agotado, por su escasa profundidad o deficiente instalación. La ganadería y agricultura familiar que sustentaba a las comunidades campesinas de Petorca, ha desaparecido. La carencia de estándares mínimos para poder atender una necesidad tan básica y fundamental, lógicamente es un motor de desigualdad que se percibe como un sentimiento de inseguridad, injusticia y abandono; el descontento social es transversal. A partir de ello, se ha gestado el conflicto por el acceso al agua en Petorca; muchos pobladores se han organizado e iniciado un movimiento para recuperar el derecho humano al agua, y a pesar de las amenazas y agresiones, han logrado visibilizar el conflicto a nivel nacional e incluso internacional.

En este contexto y ante la ineficiencia (indiferencia?) de las autoridades, los sistemas comunitarios de gestión de agua (APR) y la Oficina de Asuntos Hídricos de la Municipalidad de Petorca, han jugado un rol fundamental en la dinámica hidrosocial de Petorca. El trabajo, esfuerzo y cooperación de sus dirigentes ha sido clave para lograr abastecer de agua potable a las comunidades, una tarea francamente admirable y digna de reconocimiento.

Paralelamente, existen fuentes de contaminación al agua subterránea por deficiencias en el manejo y disposición de residuos domiciliarios y de desechos de la industria minera y agrícola, lo cual restringe aún más el acceso al agua de la población (tema abordado en la sección 6.3).

En conclusión, el modelo de uso, administración y gestión del agua en Petorca ha agudizado los efectos climáticos adversos sobre las fuentes de agua, provocando la pauperización de la vida de sus habitantes y degradación de los ecosistemas.

***¿Cuál es la dinámica, el estado y la distribución de los sistemas de flujo de agua subterránea en la comuna de Petorca? ¿Cómo se distingue la jerarquía de los sistemas de flujo presentes?***

En este estudio se identificó la manifestación de un sistema local de flujos de agua subterránea, sin reconocer la influencia de sistemas intermedios ni regionales. Dicha jerarquía se estableció a partir de la integración de dos tipos de fuentes de información:

- 1) Composición química (elementos mayores y traza) e isotópica ( $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$ ), y patrones fisicoquímicos (temperatura, pH, salinidad, potencial redox, oxígeno disuelto) de las muestras de agua analizadas (Tabla 6.1): aportan pistas sobre las condiciones de recarga y circulación a través del medio geológico y permiten inferir su evolución hidrogeoquímica. Las evidencias clave para determinar la presencia de flujos locales son: (a) el carácter



predominantemente bicarbonatado del agua, bajas concentraciones de Cl<sup>-</sup> y Li<sup>+</sup>, y su cercanía isotópica a la línea meteórica (criterios que acusan reciente infiltración); (b) potencial redox predominantemente oxidante (influencia atmosférica); (c) baja salinidad (STD, proporcional a la conductividad eléctrica) y temperatura del agua (criterios que indican un corto tiempo de residencia en ambiente subterráneo).

- 2) Indicadores ambientales: permiten identificar las zonas de recarga, tránsito y descarga en el esquema de los sistemas de flujo de agua subterránea, e inferir la interacción del agua con el resto de los componentes ambientales. Estos indicadores son: características geomorfológicas, distribución de diferentes tipos de suelo y vegetación, características de cuerpos superficiales de agua y manantiales. La ausencia de manantiales termales, de suelos salinos y alcalinos, y de vegetación halófila, indican la ausencia de flujos regionales. Por su parte, la estrecha relación entre los flujos subterráneos estudiados y las variaciones climáticas, sugieren que están directamente influenciados por las condiciones en superficie, lo cual aboga por un carácter local.

La evaluación y comparación de todos estos criterios permiten establecer, en forma **relativa**, los niveles más someros o profundos que pudo haber alcanzado un determinado flujo subterráneo. Por ello es muy importante considerar todos los valores obtenidos, sin darles un tratamiento estadístico a los datos (ej: tendencias de promedios o desviaciones estándar), ya que lo que se busca es identificar los miembros extremos y la variación total de los datos, dentro de una determinada área de estudio. En este caso, si bien se presenta cierta heterogeneidad de los datos analizados, en general, no son lo suficientemente contrastantes como para definir 2 o 3 sistemas de flujo diferentes. Por ello, se estableció un solo sistema (de carácter local) conformado por una pequeña diversidad de flujos, dada por la diferencia relativa de los valores químicos y fisicoquímicos reportados.

Los flujos locales, aquellos que se encuentran en la parte más somera del sistema hidrogeológico, se originan en tres zonas dentro de la cuenca de Petorca, diferenciables por su elevación, clima y cercanía al mar, lo cual determina diferentes condiciones de recarga. Estos flujos locales viajan desde las partes elevadas hacia las zonas de depresión topográfica, a través de (a) las rocas intrusivas y secuencias volcánicas-sedimentarias (movimiento favorecido por la presencia de sistemas de fallas y fracturas, ampliamente distribuidas), y (b) por los depósitos fluvio-aluviales cuaternarios que rellenan los valles, que sobreyacen parcialmente a las rocas mencionadas. La descarga de estos flujos se produce en ríos y manantiales dentro de la misma cuenca, luego de trayectos relativamente cortos y a niveles relativamente someros (en relación a los sistemas intermedios y regionales).

Los flujos más someros del sistema local (profundidad < 50 m) se hayan drásticamente afectados (ausentes), mientras que los que se encuentran a mayor profundidad (> 80 m) aún persisten. Sin embargo, estos últimos presentan algunas limitaciones en su uso para riego y consumo humano en ciertos puntos de extracción, debido a la presencia de sulfatos, nitratos, Mo y Mn que se detectaron sobre los límites de la Norma Chilena Oficial, lo cual evidentemente

representa un riesgo para la salud de la población. Este punto será profundizado más adelante, en la sección 6.3.

***¿Cuál es la relación entre los diferentes sistemas de flujo de agua subterránea y el resto de los componentes del ambiente, en la comuna de Petorca?***

Desde la visión *Tothiana* de la hidrogeología, el agua subterránea es un agente geológico: es el mecanismo de transporte y distribución de materia (solutos en suspensión y solución) y energía a través del medio geológico, interviene en la formación de depósitos minerales, determina la mecánica de suelos y rocas, participa en la modelación del relieve, determina el caudal base de los ríos, define los tipos de suelo y la vegetación que puede adaptarse a ellos, etc. Gracias a estas manifestaciones del agua subterránea es posible utilizarlas como indicadores de los diferentes tipos de sistemas de flujo de agua subterránea y de sus componentes (recarga, tránsito y descarga), ya que las propiedades distintivas de cada flujo serán transferidas al medio circundante. Los efectos de interacción agua-ambiente son acumulativos en el tiempo y su distribución espacial depende de la geometría de los sistemas de flujo.

En el caso de Petorca, no fue posible definir una variedad de manifestaciones superficiales en función de diferentes tipos de sistemas de flujo, ya que sólo se encontró flujos locales. Además, la diversidad vegetativa presente está toda adaptada a condiciones de aridez (xerófita), y no fue posible contar con un mapa de tipos de suelo de la comuna de Petorca. De todas formas, se pudo establecer ciertas relaciones entre los patrones topográficos e hidrológicos, y tipos de vegetación, que ayudaron a establecer zonas de recarga y descarga al interior de la cuenca: las zonas elevadas, desprovistas de vegetación, fueron interpretadas como zonas de recarga, mientras que las zonas topográficamente bajas y quebradas con presencia de bosque nativo (vegetación xerófita pero más desarrollada) y manantiales, fueron interpretadas como zonas de descarga de flujos locales.

Por otro lado, los depósitos epitermales (Au, Ag, Cu) y minerales secundarios asociados (sulfuros, óxidos, carbonatos, filosilicatos, cuarzo) presentes en el área de estudio son resultado de la circulación subterránea de fluidos hidrotermales y agua meteórica en tiempos cretácicos. En el presente, estos minerales continúan interactuando con el agua subterránea, aportando iones disueltos e influenciando respuestas fisicoquímicas del agua, como el pH y potencial redox. Estos depósitos se concentran en los sistemas de fallas existentes en el área de estudio, que además tienen un importante rol en el control de la geometría de las formaciones geológicas y espesor de los depósitos que rellenan los valles, lo cual define en gran medida la distribución del agua subterránea.

Por último, el agotamiento de los ríos en la cuenca de Petorca manifiesta el decaimiento de los flujos locales que sostenían el caudal base de los ríos, que han sido severamente afectados por los factores climáticos y antrópicos descritos en los puntos anteriores.

Tabla 6.1. Resumen de valores hidroquímicos, isotópicos y de parámetros fisicoquímicos obtenidos en este trabajo.

Subcuenca		El Sobrante		Pedernal			Petorca				Las Palmas			La Ligua	
Muestra		P15	P09	P06	P07	P08	P04	P05	P10	P16	P12	P13	P14	P02	P03
Ele- mentos mayores (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	189.10	219.60	154.70	168.10	160.40	194.80	215.80	171.90	183.40	200.60	200.60	196.70	149.00	210.10
	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	57.39	66.83	107.66	44.75	77.53	304.02	224.49	246.57	154.36	68.82	166.89	280.37	101.13	61.76
	Cl <sup>-</sup>	12.73	6.68	7.19	2.53	7.13	21.16	29.83	16.22	13.21	35.51	21.75	39.31	39.13	50.53
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.55	15.86	39.56	1.17	10.86	22.30	19.88	1.23	5.02	0.90	0.82	8.02	76.16	58.96
	Na <sup>+</sup>	19.40	23.93	19.87	13.55	17.28	34.16	42.60	28.17	26.24	40.74	25.83	36.28	28.08	47.03
	K <sup>+</sup>	0.59	0.99	0.85	0.15	0.67	1.37	1.81	0.98	0.96	1.15	0.89	1.20	0.51	1.59
	Ca <sup>2+</sup>	67.60	78.15	67.75	62.31	60.28	123.25	126.60	105.55	89.40	59.10	81.82	110.81	62.33	69.79
Mg <sup>2+</sup>	16.15	16.41	16.53	11.10	15.93	33.65	20.74	22.57	16.83	23.37	29.85	38.20	29.65	25.31	
STD (mg/l)		379.97	445.13	428.63	314.74	366.04	749.35	696.35	608.43	505.55	450.33	542.69	730.92	501.04	546.87
Facies Hidroquím.		BC	BC	BC	BC	BC	SC	SC	SC	SC	BC	SC	SC	SC	BC
Isótopos estables	δ <sup>2</sup> H ‰	-88.07	-88.12	-71.35	-73.06	-75.87	-74.47	-72.06	-76.13	-72.8	-55.16	-54.77	-54.68	-49.34	-59.21
	δ <sup>18</sup> O ‰	-11.954	-11.829	-9.546	-10.402	-10.359	-9.953	-9.679	-10.284	-9.866	-7.638	-7.293	-7.73	-7.45	-8.308
Pará- metros fisico- químicos	T	20.3	20.8	18.2	32.4	23.7	20.7	21.8	18.2	21.9	18.9	23	21.6	24.7	23.5
	Eh	140	192	20	155	66	162	177	122	-5	166	153	159	221	147
	O.D. %	63	45	67	85	59	54	59	54	83	82	122	45	66	48
	O.D. mg/l	5.7	4.0	6.3	5.9	4.9	4.9	5.1	5.0	7.3	7.4	9.9	4.0	6.1	3.9
	C.E.	447	486	105	353	405	227	758	668	474	486	618	675	557	629
	pH	6.97	6.50	6.80	6.64	6.66	6.67	6.48	6.39	6.79	6.68	7.62	6.56	7.02	6.80
Alc	328.0	93.2	124.4	151.4	184.5	295.8	154.7	137.2	217.8	220.1	240.3	227.1		227.6	

STD: Sólidos totales disueltos. BC: bicarbonatada cálcica. SC: sulfatada cálcica. T: temperatura. Eh: potencial redox. O.D.: oxígeno disuelto. C.E.: conductividad eléctrica. Alc: alcalinidad (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

***¿Cuáles son las consideraciones hidrogeológicas que se deben tener presentes para mejorar el uso y protección del agua subterránea en la comuna de Petorca?***

Dada la extensión e importancia de esta respuesta, será abordada en las próximas secciones para poder profundizar en cada aspecto del modelo de uso y gestión del agua, y de esta manera brindar propuestas que apunten a su mejoramiento.

**6.2. FALENCIAS EN EL ACTUAL MODELO DE ADMINISTRACIÓN Y GESTIÓN DEL AGUA, DESDE UN PUNTO DE VISTA HIDROGEOLÓGICO**

Al revisar y analizar la forma de gestión y administración del agua subterránea en Chile y en la comuna de Petorca, fue posible detectar varias falencias e inconsistencias desde una perspectiva hidrogeológica, que en conjunto contribuyen de alguna manera a los graves problemas en materia ambiental y social que existen en la comuna y también en el país. Los puntos más importantes se enumeran a continuación.

**6.2.1. DESCONOCIMIENTO SOBRE EL AGUA SUBTERRÁNEA Y SU RELACIÓN CON EL AMBIENTE**

El agua subterránea representa la principal fuente de agua para consumo humano y las actividades económicas, y es el sostenedor fundamental de los ecosistemas. A pesar de ello, la normativa del agua vigente y los estudios hidrológicos, en general, no le dan significativa importancia al agua subterránea; la atención está mayormente puesta sobre el agua superficial. Peor aún, se aísla o separa el agua superficial de la subterránea, cuando se trata del mismo líquido transitando por las diferentes fases del ciclo hidrológico, en una íntima interdependencia con el resto de los componentes del ambiente.

En Chile, existen significativas e históricas diferencias entre la información asequible para el agua en su fase superficial vs subterránea; para esta última se cuenta con escasos recursos económicos y profesionales expertos destinados a estudiar el agua con una perspectiva sistémica. Numerosas zonas del territorio nacional carecen de estudios hidrogeológicos o presentan información francamente deficiente y/o desactualizada. Sólo por dar algunos ejemplos, en la página de la DGA existe una plataforma (Observatorio Georreferenciado) donde se puede visualizar una capa de “acuíferos”, pero no contiene información hidrogeológica sino netamente administrativa. Además, es posible descargar archivos (.shape) de los “acuíferos” definidos por la DGA en la Mapoteca Digital, pero se necesitan programas especializados para abrirlos, y su contenido se limita a los límites administrativos. El Mapa Hidrogeológico de Chile de la Biblioteca Digital del CIREN es a escala 1:2,500,000 y es del año 1986. En definitiva, la escasa información pública sobre agua subterránea no se encuentra unificada ni sistematizada ni actualizada, por lo que no representan una real utilidad.

Por otro lado, el desconocimiento sobre el funcionamiento del agua subterránea y su rol como agente geológico, repercute en una deficiente planificación y gestión territorial, ya que la dinámica subterránea puede estar involucrada directamente en eventos como inundaciones, deslizamientos de laderas e inestabilidad de ciertos suelos. Por lo tanto, su exclusión o falta de entendimiento en los planes gubernamentales de manejo territorial se considera también un importante aporte a la construcción social del riesgo de desastres.

En el caso de Petorca, el agotamiento de las fuentes superficiales de agua motivó la activación de una serie de estudios hidrogeológicos, abordados con un enfoque académico pero sobre todo ingenieril por las empresas consultoras contratadas por la DGA o la Comisión Nacional de Riego para el desarrollo de infraestructura hídrica y evaluación de las “reservas de agua”. Sin embargo, algunas bases teóricas y metodológicas adoptadas en estos estudios no son las adecuadas (por los motivos que se expondrán en las siguientes secciones) y requieren ser revisadas con urgencia.

### 6.2.2. ACUÍFERO: UNIDAD DE ESTUDIO Y DE ADMINISTRACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

A pesar de que la unidad administrativa del agua subterránea en Chile es el **acuífero**, en el Código de Aguas -documento que regula el uso, administración y gestión de las fuentes de agua en el país- no se presenta una definición del concepto de acuífero, y sólo se refiere al agua subterránea como aquellas “*que están ocultas en el seno de la tierra y no han sido alumbradas*” (Art. 2º). Tampoco aparece su definición en la página de la Dirección General de Aguas (DGA), el organismo estatal encargado de la gestión y administración del agua.

Una de las definiciones encontradas en la literatura indica que un acuífero es una “*formación geológica que almacena agua y actúa como depósito y reserva. La mayoría conforman grandes extensiones y su recarga es por el aporte de aguas pluviales, corrientes superficiales, y lagos que se infiltran a través del suelo hacia el acuífero, el agua escurre por gravedad desde las zonas de recarga hacia las de descarga, las cuales pueden ser ríos, lagos y manantiales; la explotación se efectúa mediante el bombeo en pozos*” (Price, 2007).

El concepto de acuífero se refiere al sistema integrado por agua subterránea y el medio geológico por el que circula. Según la definición, el medio corresponde a una **formación geológica**, lo que implica una unidad rocosa identificable a escala regional, con límites bien definidos, de determinada edad y composición litológica. Bien es sabido que las propiedades, geometría y distribución (natural) del agua en el subsuelo responden a condiciones principalmente geológicas, como las características litológicas, mineralógicas, texturales, estructurales (pliegues, fracturas y fallas) y geotectónicas. Sin embargo, según lo observado en este trabajo, la frontera entre un acuífero y otro no guarda ninguna relación con la distribución de las formaciones geológicas. En su lugar, se observa que los acuíferos en Chile, y en muchas partes del mundo, son definidos por criterios administrativos o de la hidrología superficial,

como las cuencas, segmentando arbitrariamente territorios conformados por las mismas unidades geológicas. Además, cada acuífero (o cuenca) es evaluado como una entidad aislada e hidráulicamente inconexa de los acuíferos vecinos, y se formulan modelos con base en supuestos irreales. Entre los supuestos más relevantes se cuentan: fronteras del dominio con nula permeabilidad o de carga constante; medios geológicos homogéneos y/o isotrópicos; propiedades constantes del agua subterránea, como densidad y temperatura, lo que produce erróneos valores de su dirección de movimiento y velocidad; métodos estadísticos erradamente aplicados (incoherentes con la naturaleza de los datos estudiados).

Desde el punto de vista de los SFAG, un “acuífero” suele abarcar una porción muy somera del sistema hidrogeológico, donde usualmente sólo se encuentran los sistemas de flujo locales o tal vez intermedios. Ello impide tener una visión completa del sistema, y reconocer la relación o interacción entre los diferentes sistemas de flujo (componente vertical) y la posible influencia de flujos más profundos, que suelen excluirse en los procesos de modelación. Un modelo de gestión del agua basado en la concepción de acuíferos, implica desconocer el origen y vías de circulación del agua subterránea, organizada en los SFAG, lo cual impide enfrentar adecuadamente cualquier afectación (tanto en calidad como en cantidad) que pueda presentar un punto de descarga de agua subterránea (pozo, manantial, lago, río), ya que el problema puede originarse fuera de las fronteras de un acuífero o cuenca.

En el caso de estudio, según lo reportado por la autoridad del agua (DGA, CNR, MOP), y resto de los trabajos revisados (sección 4.7), el denominado “**Acuífero Río Petorca**” está conformado por depósitos fluvio-aluviales que rellenan los fondos de los valles. ¿Y qué hay del resto de las rocas que componen la cuenca? ¿Por qué fueron excluidas, si sus propiedades litológicas y condiciones de fracturamiento y fallamiento propician perfectamente la circulación de agua a través de ellas? Así también lo señalan los relatos de informantes de este estudio (enero, 2020), quienes indicaron la descarga de abundante agua en labores mineras ubicadas en zonas relativamente altas, donde no existen tales depósitos fluvio-aluviales a los que se supone que se restringe el acuífero.

Por otro lado, los límites del Acuífero Río Petorca corresponden a los límites de la cuenca homónima, y se encuentra subdividido en 5 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) con fines administrativos, que coinciden con las subcuencas que conforman la cuenca de Petorca. Con el fin de evidenciar la discrepancia planteada entre los criterios geológicos y administrativos, en la Fig. 60 es posible comparar (A) los bordes de los acuíferos Río Petorca y Río La Ligua con sus respectivos SHACs, y (B) la distribución de las unidades geológicas, en franjas aproximadamente N-S.



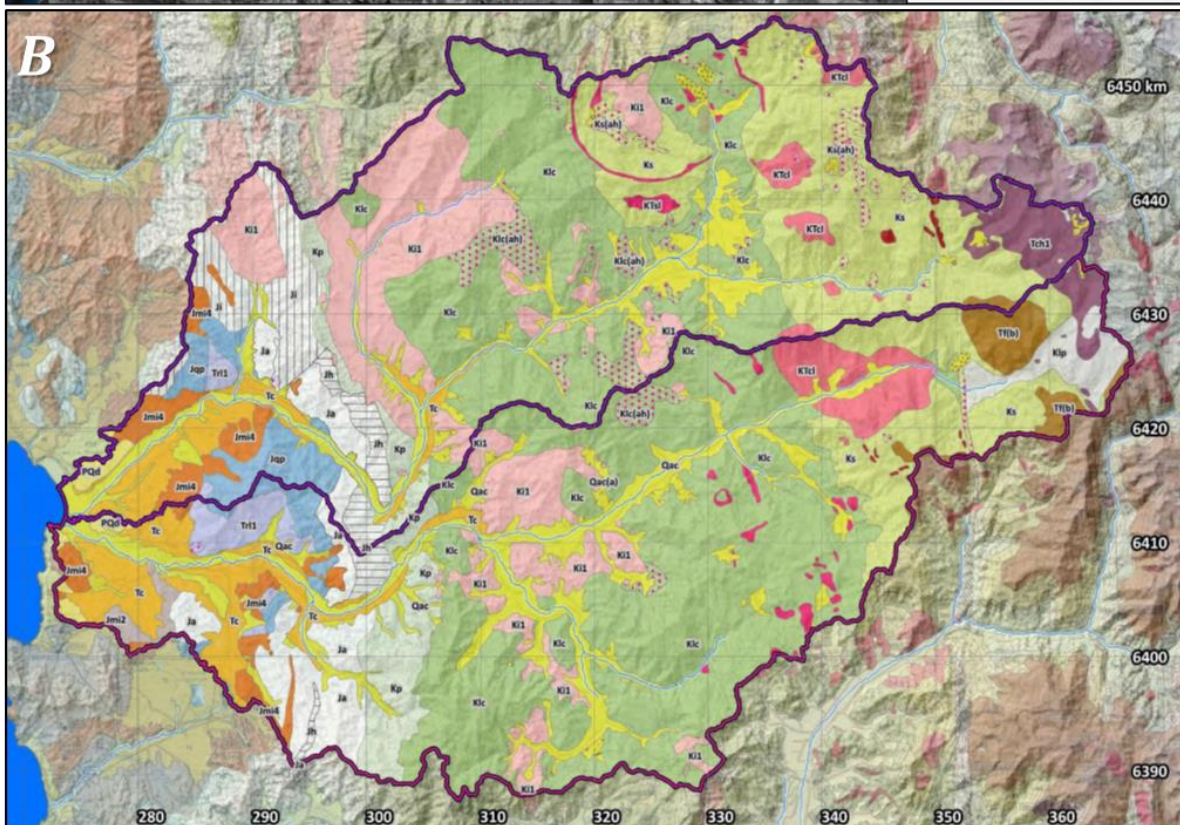
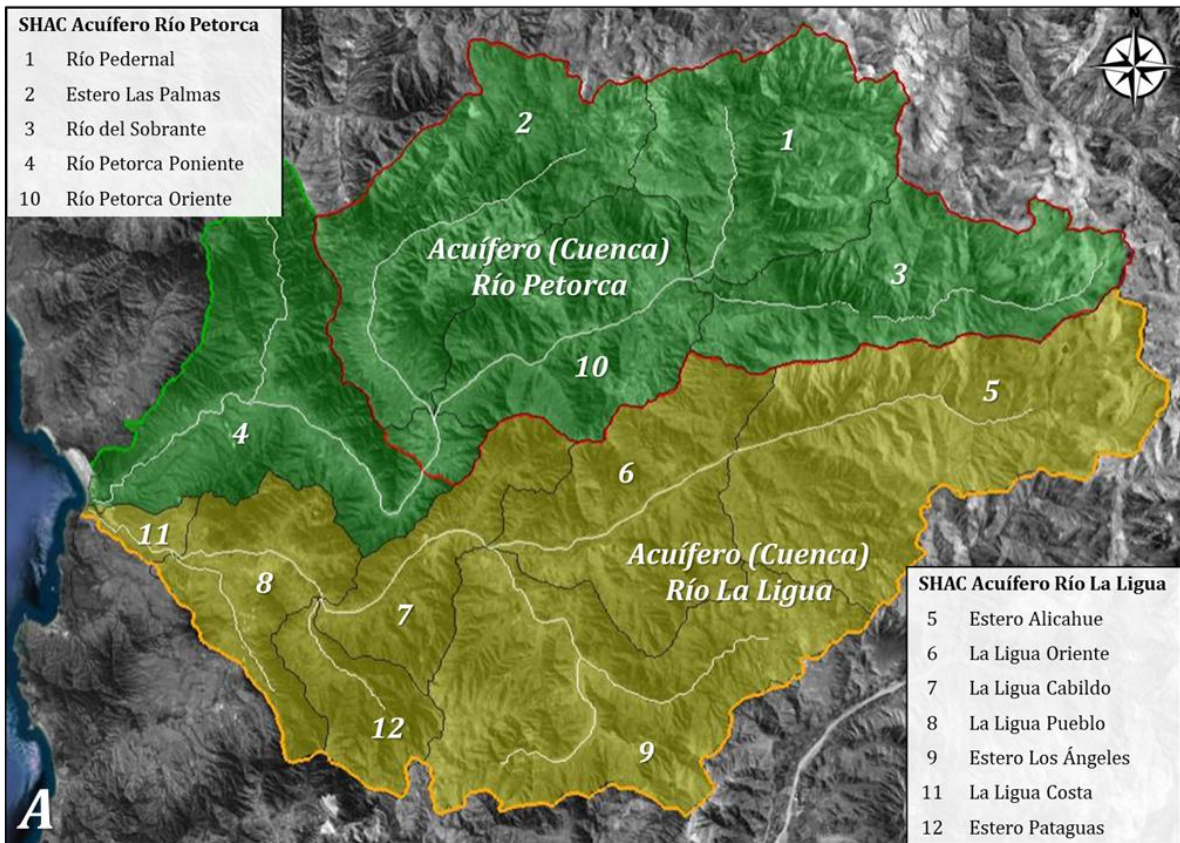


Fig. 60. A) Acuíferos Río Petorca y Río La Ligua, y Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) definidos por la DGA (2014). B) Mapa geológico de las cuencas Petorca y La Ligua, elaborado por AC Ingenieros (2019).

Los modelos conceptuales que describen a este acuífero en la literatura consultada consideran como fronteras impermeables a las laderas de los cerros y la roca consolidada (de menor conductividad hidráulica?) que infrayace bajo estos depósitos, lo cual es una interpretación equivocada. El mal entendido “**basamento**” del Acuífero Río Petorca, definido así en todos los reportes y estudios consultados, corresponde a la roca consolidada (formaciones cretácicas) que se diferencia claramente de los depósitos no consolidados que sobreyacen a las secuencias rocosas, pero en ningún caso es el basamento del sistema hidrogeológico del que habla Tóth en el modelo de los SFAG<sup>61</sup>. Por tanto, cuando se habla del “Acuífero Río Petorca” se hace referencia a la parte somera del sistema de flujos locales que transitan subterráneamente por los fondos de los valles. Esta aproximación deja fuera al agua subterránea que circula por el resto de los materiales geológicos, ubicados a mayor profundidad (en el plano vertical) y fuera de las fronteras de los lechos fluviales (en el plano horizontal).

Por los motivos expuestos, se sugiere que el concepto “acuífero” debe ser repensado y redefinido, para que pueda representar con mayor fidelidad al sistema hidrogeológico y prestar mayor utilidad en los estudios del agua subterránea. Un modelo ideal de administración y gestión de agua debiera desarrollar un método de cartografía nacional de los SFAG (lo que implica contar con mapas a escalas unificadas y de detalle adecuado, del referente geológico y geomorfológico, tipos de suelos y vegetación, hidrología superficial y subterránea, química e isotopía del agua), perfiles geológicos, y una red de monitoreo de agua (superficial y subterránea) que genere datos en tiempo real, y sistematizados en una plataforma de acceso público.

### 6.2.3. BALANCE HIDROLÓGICO: ES LA APROXIMACIÓN ADECUADA PARA ESTUDIAR Y ADMINISTRAR EL AGUA SUBTERRÁNEA?

El **Balance Hidrológico** es un concepto derivado de la hidrología superficial, que supone que en una cuenca cerrada, para un espacio definido e intervalo de tiempo determinado, se cumple el principio de conservación de masas, que está representado por: ***Variación en el almacenamiento de la cuenca = Entradas - Salidas***. A grandes rasgos, se considera que las “Entradas” son los aportes de agua por precipitación, y las “Salidas” corresponden a las corresponden a los caudales de agua liberados por evapotranspiración y escorrentía. Si las condiciones de la cuenca son las mismas al inicio y al final, en un intervalo de tiempo se cumple que: ***Volumen total de Precipitación = Evotranspiración + Escorrentía***. Notar que se debe cumplir que la infiltración sea uniforme en el tiempo, lo cual es a todas luces irreal.

Erradamente, la hidrología subterránea ha introducido esta ecuación para evaluar el volumen de agua que es “almacenada” en un determinado acuífero. Esto ya representa una contradicción por los motivos expuestos en el punto anterior, respecto a las fronteras de un acuífero, y porque

---

<sup>61</sup> Bajo la visión de los SFAG, un sistema hidrogeológico debe estar limitado en profundidad por la **roca basamento**: unidad geológica conformada por rocas metamórficas y/o intrusivas, de naturaleza impermeable, que infrayace a la unidad por la que circulan los **flujos regionales** (Carmona *et al.*, 2017).

el medio subterráneo no es un almacén de agua, no es un sistema hidráulicamente cerrado. Por el contrario, la realidad es que el agua fluye constantemente y jamás se detiene en un acuífero; y un sistema hidrogeológico es un sistema complejo, abierto en todas direcciones.

Por otro lado, se observa una grave inconsistencia respecto al tiempo en el que se evalúa el Balance Hidrológico vs el tiempo que demora la infiltración del agua a través del suelo, hasta llegar a los diferentes SFAS, lo cual puede tardar desde días hasta miles de años. El Balance Hidrológico se establece a partir de tasas anuales de recarga (según las precipitaciones caídas en 1 año, sin considerar la distribución desigual de los patrones de precipitación durante el año), tiempo absurdamente despreciable frente a las escalas de tiempo de circulación del agua subterránea.

La ecuación del Balance Hidrológico para un acuífero está integrada por caudales representados por las siguientes variables, cuyas explicaciones y requerimientos para su estimación se encuentran en la Tabla 6.2:

$$\Delta \text{ Almacenamiento} = P + Q_{es} + Q_{ea} + QR - (ET + Q_{sm} + Q_{sa} + Q_b)$$

Tabla 6.2. Variables que intervienen en el Balance Hidrológico de un "acuífero", con sus respectivos datos requeridos para el cálculo de la variable (adaptado de Custodio y Llamas, 1996).

Variable	Requerimientos para cálculo o estimación de la variable
<b>Entradas desde:</b>	
P: Precipitaciones	Interpolación de datos meteorológicos
Q <sub>es</sub> : Aguas superficiales	Medición de aforos en ríos y manantiales*
Q <sub>ea</sub> : Acuíferos adyacentes	Cálculo a partir de la transmisividad (espesor saturado, conductividad hidráulica), gradiente piezométrico
QR: Recarga artificial	Estimación a partir del Inventario de la Autoridad del Agua**
<b>Salidas (descargas) a través de:</b>	
ET: Evapotranspiración	Estimación con datos meteorológicos, tipos de suelo y vegetación
Q <sub>sm</sub> : Cuerpos de agua superficial y Manantiales	Medición de aforos en ríos y manantiales*
Q <sub>sa</sub> : Acuíferos adyacentes	Cálculo a partir de la transmisividad, gradiente piezométrico
Q <sub>b</sub> : Extracción en pozos	Estimación a partir del Inventario de la Autoridad del Agua**

\* Los valores de recarga y descarga medidos en los cauces superficiales pueden ser menores al margen de error de los aforos o del Balance Hidrológico superficial. \*\* Debe considerar el retorno al acuífero de las aguas utilizadas no consumidas o su integración en los cauces superficiales (retorno por riego, infiltración de canales, desagües, etc.).

A excepción del caudal de entrada y salida medido en cuerpos superficiales (Q<sub>es</sub> y Q<sub>sm</sub>), el resto de las variables son calculadas o estimadas en forma indirecta a partir de otros datos de diversa naturaleza, cuya certeza depende en gran medida de la calidad de los datos asequibles. Entonces surgen algunos cuestionamientos: ¿cómo es posible estimar la cantidad de agua que sale del sistema a través de la extracción en pozos, si no existe un control efectivo por parte de la DGA? ¿Cómo cuantificar el agua extraída en pozos ilegales? ¿Cuáles son los límites y

propiedades del acuífero en cuestión y de los acuíferos adyacentes? ¿Las estaciones meteorológicas se encuentran adecuadamente distribuidas en la zona de estudio como para generar una interpolación estadística adecuada de los datos?

Es evidente que en Chile aún no se cuenta con los recursos económicos ni con la voluntad política como para generar bases de datos de calidad (provenientes de una red de estaciones de muestreo/monitoreo/medición con distribución y densidad adecuadas) que permitan estimar con un grado de certeza aceptable las variables del Balance Hidrológico. En consecuencia, los modelos y simulaciones de escenarios de “disponibilidad hídrica” basados en esta metodología probablemente conducen a resultados equívocos e inciertos. Sin embargo, este es el referente teórico y metodológico sobre el cual se basan las políticas públicas y la administración del agua en el país, incluyendo la declaración de zonas de restricción y prohibición. En otras palabras, el cálculo de la “disponibilidad” de un acuífero y los criterios para su “protección” se basan en un grave desconocimiento e incertidumbre. Los efectos de estas malas decisiones pueden ser muy difíciles de reparar.

Es de anotar que en ciertos casos se usa el concepto de **transmisividad**, definida como el “caudal a través de una sección de un acuífero de anchura unidad bajo un gradiente hidráulico unitario” (WMO-UNESCO, 2012), que se obtiene mediante la relación:  $T = K * b$ , donde  $K$  es la conductividad hidráulica y  $b$  es el espesor saturado. La transmisividad se utiliza para describir la cantidad de agua que se puede transmitir **horizontalmente** por un medio saturado, y obtener la velocidad del flujo subterráneo, término básico al calcular la migración de contaminantes. Sin embargo, este concepto deja fuera las componentes verticales de flujo del agua subterránea, y el espesor saturado ( $b$ ) usualmente es considerado sólo parcialmente, ya que debiera abarcar la profundidad al basamento, como fue expuesto en la sección anterior.

Otro aspecto relevante es que la autoridad del agua, al definir la “disponibilidad de un acuífero” y su categoría de restricción o prohibición, sólo está considerando la cantidad de agua supuestamente almacenada en un determinado acuífero, sin importar si esta agua es apta para el consumo humano o si es potencialmente peligrosa para la salud, tal como fue cuestionado en la jornada de cartografía participativa por los asistentes (trabajo de campo; enero, 2020). En consecuencia, se sugiere que la evaluación del agua subterránea y la determinación de su “disponibilidad” para diferentes usos, debe necesariamente incluir un análisis en términos de volúmenes de agua así como también de su calidad química, bacteriológica y radiactiva.



### 6.3. FUENTES POTENCIALES DE CONTAMINACIÓN Y MANEJO DE RESIDUOS

Durante el desarrollo de este trabajo se consultó a informantes clave de la comuna de Petorca cuáles son las fuentes potenciales de contaminación del agua subterránea percibidas por la población (sección 3.3.2), identificando las siguientes fuentes:

2. Sustancias agrotóxicas utilizadas por las empresas agrícolas, especialmente en los monocultivos de aguacate destinados a exportación, que son los que ocupan mayor extensión en la comuna.
3. Desechos mineros dispuestos en forma inadecuada, algunos a escasos metros de cultivos, cursos de agua y comunidades humanas. Estos depósitos carecen de infraestructura de aislamiento e impermeabilización, y por tanto se encuentran directamente expuestos a los agentes atmosféricos de dispersión como el viento y el agua, que pueden movilizar estos sedimentos tóxicos al suelo y desde ahí infiltrarse al agua subterránea.
4. Desechos domiciliarios y aguas negras, que presentan un deficiente manejo y disposición sanitaria, y por tanto los lixiviados pueden fácilmente infiltrarse en el agua subterránea.

Dentro de los alcances de este trabajo, se trató de buscar evidencias para corroborar o descartar las sospechas planteadas, con base en el análisis químico de elementos mayores y traza de muestras de agua subterránea. El objetivo principal de estos análisis es modelar químicamente el sistema hidrogeológico, lo cual no incluye componentes microbiológicos (virus, bacterias y hongos) ni agroquímicos (herbicidas, pesticidas, etc.). Por lo tanto, no es posible caracterizar a cabalidad una posible contaminación por agrotóxicos, lixiviados de desechos domiciliarios y aguas negras. Sin embargo, dentro de los análisis realizados se obtuvo concentraciones anómalas de  $\text{NO}_3$  y  $\text{SO}_4$  (Capítulo 5), que exceden los límites de la Norma Chilena Oficial para consumo humano (NCh409/1.Of.2005) y para riego (NCh1333.Of78). Ambas especies están directamente relacionadas con procesos orgánicos (contaminación por desechos orgánicos o aguas residuales, descomposición de materia orgánica) o químicos (contaminación por residuos industriales y uso de fertilizantes). Por otro lado, altos contenidos de  $\text{SO}_4$  pueden indicar también contaminación por lixiviados mineros. En conclusión, la evidencia de campo sugiere que es altamente probable que la calidad del agua estudiada esté siendo afectada por las actividades antrópicas señaladas por los informantes de este estudio.

Respecto a evidencias de contaminación por la actividad minera en la comuna de Petorca, se detectó **Mo y Mn** excediendo las Normas Chilenas Oficiales. Estos elementos están asociados genéticamente a los depósitos polimetálicos presentes en la comuna de Petorca, y sus mayores concentraciones fueron halladas en los pozos de Los Comunes y Calle Larga, donde también se obtuvo los valores más bajos (reductores) del potencial óxido-reductor (Eh), posiblemente asociado a la presencia de sulfuros en profundidad. Es posible que en este caso los valores anómalos de Mo y Mn tengan un origen natural, por lo que no se trataría de una fuente de contaminación, como en el caso de  $\text{NO}_3$  y  $\text{SO}_4$  que sí tienen un origen antrópico. Sin embargo, dada la cercanía entre estos pozos y jales mineros (Fig. 16, ANEXO 6), no se descarta que estos elementos provengan de dichos residuos, sobre todo considerando que no están debidamente

aislados y resguardados. El desborde del relave (jale) en el sector de Los Comunes ocurrido el 22 de agosto de 2021<sup>62</sup> (posterior a la campaña de muestreo) seguramente va a alterar la química del suelo y del agua subterránea conforme las precipitaciones y el agua de riego disuelve y moviliza el material derramado, lo cual sí constituye evidentemente una fuente de contaminación.

Dada la abundancia de depósitos polimetálicos en el área de estudio (Fig. 27) y la consiguiente presencia de depósitos de desechos mineros (Fig. 16, ANEXO 6), se esperaba encontrar una mayor concentración de metales pesados en el agua subterránea analizada, pero los resultados muestran en general contenidos aceptables de metales disueltos, según las Normas Chilenas Oficiales. Varios de los informantes claves de este estudio mencionaron su preocupación sobre la posible contaminación de los productos frutícolas cultivados cerca de jales mineros, y solicitaron la realización de análisis químicos a dichos productos, pero esta tarea está fuera de los alcances del presente trabajo.

Para tener una idea, el **relave (jale) Petronila**, derivado de la extracción de sulfuros de Au en las cercanías de la ciudad de Petorca, fue caracterizado por Ramírez (2019), quien señaló que la capa superior del jale está conformada por un 61% de material fino (limos y arcillas), entre los que se cuentan Pb y As. Es decir, estos elementos altamente tóxicos pueden ser fácilmente removidos y trasladados en suspensión por el viento, lo que constituye un riesgo de contaminación no sólo del suelo y el agua (superficial y subterránea), sino que amenaza directamente a la salud de las personas por exposición a través de vías respiratorias. Además, en la capa superior del jale se presentan concentraciones altamente contaminantes<sup>63</sup> de Cu (1,661.1 ppm), Zn (3,675.3 ppm), Mn (4,466.7 ppm) y As (384.8 ppm).

Por otra parte, el pH medido en el jale oscila entre 7.52 y 8.43, lo que sugiere que las fases minerales sulfuradas potencialmente generadoras de **drenaje ácido** (por oxidación de la pirita) son neutralizadas por los carbonatos existentes. Otro factor que en este caso inhibe la formación de drenaje ácido es la baja tasa de precipitación (Ramírez, 2019), como también fue sugerido por Basoalto (2019) para el relave Dulcinea, ubicado en el sector de Pedernal. Cabe recordar que los factores necesarios para la generación de un drenaje ácido incluyen condiciones aerobias (presencia de oxígeno) y cantidades suficientes de agua, promovidos por la acción catalizadora de bacterias y temperaturas cálidas (Aduvire, 2006).

En conclusión, a pesar de que en los análisis químicos efectuados en el presente trabajo no se detectó concentraciones importantes de metales pesados en el agua subterránea, no se descarta que el prolongado déficit de precipitaciones impida la disolución y movilización de estos metales hacia los flujos subterráneos, encontrándose en la actualidad mayormente acumulados en los suelos, lo cual no deja de representar una fuente inminente de contaminación al agua subterránea.

---

<sup>62</sup> Noticiero SoyQuilota: <https://www.soychile.cl/Quilota/Sociedad/2021/08/27/720534/derrame-relave-minero-petorca.aspx>

<sup>63</sup> Estándares para mediciones de calidad de suelos en Chile. SAG (Servicio Agrícola Ganadero).



En consecuencia, se sugiere adoptar medidas de mitigación para la estabilización y aislamiento de los depósitos de jales mineros, con el fin de evitar la propagación de elementos tóxicos, como la colocación de barreras físicas y cubiertas vegetales. Paralelamente, se debe implementar alguna alternativa de manejo de drenaje ácido, como por ejemplo: (a) Adición de material neutralizante, como carbonatos, que alcalinizan el pH e inhiben la precipitación de hidróxidos. (b) Extracción pasiva de sulfatos mediante adición de bacterias sulfato-reductoras que reducen la acidez y ayudan a eliminar metales pesados y sulfatos. (c) Cubiertas de materia orgánica (ejemplo: lodos, aserrín) en la superficie de los jales, para inhibir la infiltración de agua y limitar el ingreso de oxígeno, y así evitar la oxidación de los sulfuros (véase trabajos: Fundación Chile, 2015; Ramírez, 2019).

#### **6.4. CONSIDERACIONES PARA UNA GESTIÓN INTEGRAL Y SUSTENTABLE DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN PETORCA**

Las sugerencias planteadas a continuación están inspiradas en el trabajo realizado por un equipo de investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México, integrado por C. Carmona Lara, J. Carrillo-Rivera, G. Hatch-Kuri, R. Huizar-Álvarez<sup>†</sup> y M. Ortega-Guerrero, concretado en la “Ley del Agua Subterránea: una propuesta” (2017). Este documento nació como respuesta a los intentos de ciertos sectores políticos que buscaban privatizar el agua en México (propuesta conocida como “Ley Korenfeld”), y presenta una excelente síntesis teórica y metodológica de la aplicación de la Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea en la gestión y legislación del agua subterránea. Cabe mencionar que países desarrollados como Canadá, Australia, Estados Unidos, Reino Unido, Holanda, Hungría, Japón y China, basan su política económica-social en el conocimiento de los sistemas de flujo, dentro de una gestión integral del agua (Carmona *et al.*, 2017; Garza *et al.*, 2018).

Los resultados obtenidos en el presente estudio señalan que el agua que actualmente está sosteniendo los ecosistemas, el abastecimiento de agua potable y las actividades económicas en la comuna de Petorca, corresponde a un sistema de flujos locales de agua subterránea. Tal vez las empresas agrícolas y de servicios sanitarios privados logren penetrar sistemas de flujos intermedios a través de pozos más profundos, pero es sólo una hipótesis sin comprobar porque no fue posible acceder a pozos de sus propiedades. De cualquier forma, cada sistema de flujo de agua subterránea interactúa de diferente manera con el ambiente; las respuestas de los sistemas de flujo a las perturbaciones del ambiente serán, por lo tanto, diferentes.

#### **¿Qué implicancias tiene para la población de Petorca depender únicamente de sistemas de flujos locales de agua subterránea?**

Los flujos locales, por definición, son aquellos cuya recarga y descarga se produce dentro de una misma cuenca, recorriendo trayectos cortos y someros, en relación con los flujos intermedios y regionales. Debido a su posición dentro del esquema hidrogeológico, los flujos

locales están íntimamente relacionados y comunicados con los procesos y perturbaciones que suceden en superficie, y cualquier alteración en las condiciones de recarga o tránsito se verán manifestadas en las zonas de descarga con un tiempo mucho menor, provocando impactos directos y fácilmente apreciables. En consecuencia, **los sistemas de flujos locales son los más susceptibles** a verse afectados (en términos de su calidad, volumen y dinámica) por disturbios ocurridos en superficie, ya sea de origen natural o antrópico: variaciones en los patrones climáticos, eventos geológicos (erupciones volcánicas, actividad tectónica), cambios de uso de suelo, eliminación de la cobertura vegetal, contaminación de suelos y cuerpos de agua, uso de fertilizantes o descarga de productos químicos, recarga artificial, etc.

En caso de encontrarse manifestaciones de flujos intermedios y regionales, ello implicaría que su zona de recarga se encuentra más alejada, probablemente fuera de los límites administrativos de la comuna, lo que implica que el control que puedan tener las instituciones u organismos de administración del agua sobre las condiciones de recarga y tránsito de estos flujos, sea muy escaso o nulo. Por otro lado, dado que este tipo de flujos tiene trayectos más extensos en distancia y en tiempo, los efectos de cambios o perturbaciones superficiales podrán ser apreciados con un importante desfase temporal (décadas o cientos de años), lo cual también puede limitar las acciones de respuesta por parte de las instituciones administradoras.

El caso de la cuenca de Petorca es muy interesante en este sentido, ya que han agotado prácticamente todos sus cuerpos de agua superficial y la parte somera de los flujos de agua subterráneos (que forman parte del sistema de flujos locales). Si esta tendencia no se revierte, pronto la población se verá forzada a acudir a los **sistemas de flujos intermedios**, que se encuentran bajo los locales, para satisfacer sus requerimientos de agua. Esto implicaría cambios importantes en la calidad del agua extraída, ya que los flujos intermedios presentan, en relación con los flujos locales, una mayor temperatura y salinidad, pH más alcalino, condiciones redox más reductoras, mayor conductividad eléctrica, menor contenido de oxígeno disuelto y mayor proporción de sulfatos y cloruros vs bicarbonatos. Por otro lado, ignorar los SFAS incrementa el riesgo de desaparición o contaminación de lagos, ríos y manantiales, porque se desconoce cuál es el tipo de flujo que los alimenta, de dónde viene y con qué elementos ambientales y antrópicos interactúa en su camino.

Por tal motivo, se sugiere que en el corto plazo se realice un estudio que profundice la búsqueda de los sistemas intermedios y regionales, dentro y fuera de los límites administrativos de la comuna de Petorca, con el fin de conocer el funcionamiento del sistema hidrogeológico completo (hasta la roca basamento, de edad pre-Cretácico), la calidad y propiedades fisicoquímicas de cada tipo de flujo y su distribución espacial. Con esta información básica será posible disminuir significativamente la brecha de incerteza actual, incrementar las posibilidades de control y planeación de los escenarios futuros, en coordinación con los actores de administración del agua de las cuencas adyacentes, y definir programas y políticas de protección del agua subterránea en forma integral.

## ¿Qué significa proteger el agua subterránea?

Proteger el agua subterránea significa entender y resguardar todas las fases del ciclo hidrológico y todos los elementos del ambiente con los que interactúa el agua en su recorrido subterráneo: (1) Proteger las zonas de recarga, tránsito y descarga de los flujos subterráneos. (2) Proteger la cubierta vegetal que asegura la estabilidad del suelo e inhibe su erosión, manteniendo su función de filtrado y limpieza al agua que se infiltra en el subsuelo. (3) Proteger los cuerpos de agua superficial, manantiales, humedales y pantanos. (4) Limitar el uso de sustancias contaminantes y asegurar una adecuada disposición de desechos domiciliarios e industriales. (5) Establecer y reservar caudales ecológicos. (6) Reforzar las capacidades de vigilancia y fiscalización, por parte del Estado y también de la población.

Paralelamente, es indispensable contar con programas de educación ambiental permanentes en los niveles escolares, y de capacitación del personal vinculado con la gestión y administración del agua. Por último, es muy importante contar con una red robusta de monitoreo del agua subterránea, y canales de participación y comunicación entre organizaciones y las autoridades, que permitan la detección temprana de cualquier alteración en el comportamiento del agua y una adecuada toma de decisiones.

En definitiva, para avanzar hacia una gestión integral y sustentable del agua subterránea, se deben considerar los siguientes puntos:

1. Es urgente aumentar el conocimiento sobre el funcionamiento del agua subterránea, con una visión integral y sistémica, superando el concepto errado que se tiene sobre el “acuífero”. Las unidades de estudio del agua subterránea (llámese acuífero o la denominación apropiada) deben definirse en función de criterios geológicos e hidrogeológicos, con base en la distribución de unidades geológicas de escala regional.
2. Se debe perfeccionar la metodología que se utiliza para el estudio, evaluación y modelación del agua subterránea. El Balance Hidrológico no aplica a los sistemas de flujo subterráneos, porque se basa en supuestos incoherentes con los sistemas hidrogeológicos. Tampoco aplica a las realidades latinoamericanas, caracterizadas por el limitado acceso a datos de calidad, que aseguren cálculos con un grado aceptable de error y certeza.
3. Se requiere incrementar el cuerpo profesional/técnico especializado en aguas subterráneas (hidrogeología), y actualizar el marco teórico que rige las prácticas de medición y evaluación. En este sentido, la Teoría de los Sistemas de Flujo de Agua Subterránea constituye la manera más acertada de modelar la distribución y el comportamiento del agua subterránea que se maneja hoy en el mundo, y genera información indispensable para una gestión integrada y sostenible del agua.
4. Para definir los sistemas de flujo de agua subterránea de una región dada, se requiere conocer, con una perspectiva regional: (a) la profundidad a la roca basamento para

establecer el límite inferior de circulación de los flujos regionales; (b) las características químicas, isotópicas y fisicoquímicas del agua subterránea en puntos estratégicos de descarga; (c) mapas (de escala equivalente) con información topográfica, geológica y geomorfológica, de tipos de vegetación y suelo; d) la profundidad y dirección del flujo en los planos horizontal y vertical (visión 3D del sistema hidrogeológico).

5. Una vez que se genere información hidrogeológica actualizada y robusta, bajo los criterios y metodologías adecuados, se está en condiciones de elaborar planes de gestión y protección del agua subterránea, que aseguren el abastecimiento de agua en forma eficiente, equitativa y de calidad. Definitivamente, no se puede (bien) administrar lo que se desconoce.
6. Un modelo ideal de administración y gestión del agua subterránea, necesita nutrirse de información hidrogeológica actualizada, mediante una red de monitoreo en ríos, lagos y pozos. Estos datos deben ser sistematizados en una plataforma virtual de acceso público, gratuito y en tiempo real, para asegurar tiempos de reacción adecuados.
7. Se necesita incrementar la transparencia y desarrollar un sistema de vigilancia y fiscalización, en el que también deben participar actores no gubernamentales; el involucramiento de las comunidades es fundamental.
8. Por último, dada su vital importancia, el agua no debe ser entendida como un recurso económico o mercancía, no puede ser sujeto de especulación, acaparamiento ni de lucro. El agua debe ser un bien de uso público al que todas las personas puedan acceder. El Estado de Chile debe garantizar el derecho humano al agua y saneamiento y asegurar su disponibilidad, tanto en cantidad como en calidad, para las generaciones presentes y futuras.

## 7. CONCLUSIONES

El presente trabajo de Geografía Ambiental buscó conocer el funcionamiento, estado y distribución de los SFAS en la comuna de Petorca, Región de Valparaíso (Chile Central), y su relación con los componentes del medio natural y social, en el contexto local de desabastecimiento de agua y conflictos por su inequitativo acceso. Para alcanzar tales objetivos, se aplicaron entrevistas y cartografía participativa para identificar los actores involucrados en el sistema hidrosocial de Petorca, y caracterizar las relaciones y dinámicas sociales en torno al agua. Posteriormente, se realizó un muestreo de agua subterránea en pozos y manantiales, y la medición de parámetros fisicoquímicos, para conocer la calidad del agua subterránea (composición química e isotópica) e inferir su origen y evolución hidrogeoquímica. Con estos datos se elaboró un modelo hidrogeológico conceptual, aplicando la TSFAS (Tóth, 1963). También se buscó identificar fuentes de afectación (naturales y antrópicas) al agua subterránea, en términos de cantidad y calidad. Una vez comprendida la relación entre el agua subterránea y la forma en que es utilizada, administrada y gestionada, se identificó una serie de falencias del actual modelo de gestión de agua, para finalmente presentar ciertas consideraciones hidrogeológicas para su mejoramiento.

El escenario hidrosocial de Petorca puede caracterizarse de la siguiente manera:

1. El modelo de administración y gestión de agua en Chile, amparado en su Constitución Política y el Código de Aguas impuestos en dictadura (1973-1990), ha promovido la concepción del agua como una mercancía sujeta a las lógicas del mercado, permitiendo su apropiación, acumulación y despojo. Este modelo garantiza el derecho privado sobre el territorio para el uso del agua, sin embargo, no garantiza el derecho humano al agua y saneamiento de la población. Tampoco resguarda la integridad de las fuentes de agua, lo que impide asegurar el sustento de las comunidades humanas y de los ecosistemas.
2. El principal actor del sistema hidrosocial en la comuna de Petorca son las organizaciones de APR (Agua Potable Rural): un sistema de abastecimiento comunitario de agua potable para zonas rurales. En la comuna existen 26 APRs, agrupadas en la Unión Comunal de APRs de la cuenca del Río Petorca. Con base en relaciones de cooperación y trabajo coordinado, y con el apoyo de la Oficina de Asuntos Hídricos (Municipalidad de Petorca), las APRs han logrado abastecer de agua a numerosas localidades abandonadas por el Estado de Chile. Además, existen organizaciones de usuarios del agua cuyo fin es extraer y repartir el agua entre los titulares de derechos, y construir obras de captación y drenaje: (a) Juntas de Vigilancia; (b) Asociaciones de Canalistas; (c) Comunidades de Aguas Subterráneas (CASUB).
3. La severa sequía en Petorca ha provocado el agotamiento de los cuerpos superficiales de agua, por lo que el agua subterránea es la única fuente de abastecimiento, cuyo acceso está determinado por poderes económicos. En el conflicto por el agua se enfrentan pobladores organizados en busca de recuperar su acceso al agua, y empresarios agrícolas que concentran la mayor parte de los derechos de agua en la comuna y cuentan con recursos económicos y técnicos para alcanzar flujos de agua subterránea profundos, acaparando el agua incluso ilegalmente. La autoridad nacional del agua (DGA), ha agudizado el problema al permitir la extracción de agua sin ninguna planificación, regulación ni fiscalización, y sin

definir prioridades para su uso ni reservar caudales ecológicos. La repartición inequitativa del agua ha afectado profundamente el paisaje natural y cultural en todos sus niveles: agua, clima, suelo, biodiversidad y sociedad.

4. Con base en los elementos que conforman el modelo de administración y gestión de agua en Petorca, se concluye que existe una sostenida privación del acceso y disfrute del agua, cuyo origen es el sistema político-económico que determina la forma de relación entre agua y sociedad. Este sistema ha promovido la construcción de un espacio de vulnerabilidad hídrica de sus habitantes, que se entiende como la condición que determina la susceptibilidad de un grupo humano a ser privados o limitados del goce y uso del agua, y su grado de capacidad de prevenir, afrontar, manejar y recuperarse del impacto derivado de la afectación de sus fuentes de agua. Dicha afectación puede manifestarse como la alteración de la calidad y/o cantidad de agua que impide satisfacer los requerimientos de agua de la población, así como asegurar la permanencia de las fuentes de agua para las generaciones venideras y el sostenimiento de los ecosistemas. Las causas que provocan tales afectaciones al agua o la privación del acceso al agua, pueden originarse por factores naturales, antrópicos o por una combinación de ambos.
5. Frente a la crisis del agua en Petorca, el discurso de las autoridades se ha centrado en responsabilizar a la megasequía y el cambio climático; sin embargo, los componentes sociales de la vulnerabilidad hídrica expuestos en este trabajo evidencian que las causas son de carácter antrópico, y que las condiciones climáticas quedan subordinadas como un factor simplemente agravante. Es más, gracias a los eventos de sequía presentados desde la década del 90 fue posible desenmascarar la raíz de esta crisis: el modelo chileno de libre mercado, gestado en dictadura y profundizado por los posteriores gobiernos “democráticos”. La mayor parte del agua en la cuenca de Petorca se encuentra en el subsuelo. Por tanto, el real problema a resolver es la inequitativa repartición del agua (donde criterios éticos para el bien común deben prevalecer a los económicos con beneficio privado) y la carencia de recursos para el desarrollo de tecnologías e infraestructura hídrica, que permita abastecer de agua a toda la población, en suficiente calidad y cantidad, y de forma eficiente, sostenible y autónoma.

Respecto al funcionamiento, estado y distribución de los SFAS en la comuna de Petorca, y su relación con los componentes del medio natural, es posible concluir lo siguiente:

1. La composición química del agua estudiada es resultado del intemperismo de las rocas presentes (volcánicas intermedias-ácidas, granitoides y calizas). Esta interacción agua-roca está limitada en este caso por el corto tiempo de residencia del agua en ambiente subterráneo. Además, se sugiere la participación de (a) flujos de retorno por riego en terrenos agrícolas, que aumentan la concentración de los iones disueltos en el agua, y (b) oxidación de sulfuros asociados a los yacimientos hidrotermales de la zona, que liberan  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Fe}^{+3}$  al agua, y por otra parte, alteran su pH y el potencial redox.
2. Las evidencias fisicoquímicas (bajos valores de temperatura, conductividad eléctrica; alto contenido de oxígeno disuelto; pH neutro a ligeramente ácido) e hidrogeoquímicas (predominio de  $\text{HCO}_3^-$ , bajas concentraciones de  $\text{STD}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Li}^+$ ) indican que todas las



muestras estudiadas de agua subterránea corresponden a flujos de reciente infiltración, con un tiempo de residencia corto en el subsuelo, que en conjunto integran un sistema de flujos locales. Dentro de este sistema existen variaciones de temperatura, conductividad eléctrica, potencial redox y concentración de bicarbonatos vs sulfatos, que manifiestan diferentes condiciones de circulación y grados de interacción agua-roca, pero que no representan contrastes suficientes para definir un sistema de flujos intermedio o regional.

3. Las evidencias ambientales en superficie del carácter local del agua subterránea son: (a) ausencia de manantiales termales, suelos salinos y vegetación halófila; (b) manantiales con régimen estacional o intermitente; (c) estrecha relación entre la variabilidad climática y la variación de volúmenes de descarga en ríos, esteros, manantiales y pozos.
4. A diferencia de lo planteado por los estudios hidrogeológicos revisados, que indican que el agua subterránea en la cuenca de Petorca viaja a través de los depósitos cuaternarios que rellenan los fondos de los valles, considerando impermeables las rocas volcano-sedimentarias cretácicas adyacentes a estos valles, en este trabajo se sugiere que los flujos locales de agua subterránea circulan a través de todas las unidades geológicas que conforman la estructura geológica somera de la cuenca. Evidencia de ello es la abundancia de manantiales en las laderas de los cerros y al interior de labores mineras ubicadas a cientos de metros sobre los fondos de los valles, donde no existen tales depósitos cuaternarios, y la transmisión de agua es promovida por oquedades y complejos sistemas de fracturas y fallas.
5. Según lo señalado por informantes clave (enero, 2020), existen sitios con condiciones favorables donde se concentra un mayor volumen de agua subterránea (ejemplo: Hierro Viejo - La Ñipa y Río Tinto), lo cual es coherente con la conjunción de sistemas de fracturas y fallas, y el mayor espesor de los depósitos cuaternarios que evidencian estudios geofísicos (GCF Ingenieros, 2011) para estos sectores. En este sentido, destaca el rol de los sistemas de falla de Hierro Viejo - Los Tornos y de Quebrada de Castro (N20°W/80°SW; mecanismo dextral ± transpresivo), que han propiciado el espacio (mediante el descenso relativo de rocas cretácicas) para la mayor acumulación de sedimentos. Además, los informantes señalaron 4 niveles que aportan agua en los pozos del Río Petorca, los cuales se hallan a una profundidad de 3-4 m, 7-9 m, ~20 m y ~100 m. Actualmente están agotados los dos niveles más someros.
6. Con base en la composición isotópica de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ , se determinó una fuente meteórica con diferentes condiciones de recarga: (1) Continental más frío y mayor elevación en el Valle El Sobrante. (2) Ambiente más cercano a la costa, de menor elevación y más cálido, en el Valle de Las Palmas y La Ligua. (3) Condiciones intermedias en el Valle de Pedernal y Petorca. Dado que se trata de flujos locales, la zona de recarga de todas estas muestras se encuentra dentro de la misma cuenca, donde varían significativamente las elevaciones (900 m s.n.m. en el SW de la comuna, hasta 3,600 m s.n.m. en la cabecera del Río El Sobrante).
7. Dado que no se encontró evidencias de flujos regionales en la comuna de Petorca y que no se cuenta con estudios geofísicos que reporten la profundidad del basamento (unidad geológica impermeable que limita la máxima profundidad de circulación de los flujos regionales), no fue posible delimitar en este trabajo el sistema hidrogeológico en su parte más profunda. Pero al aplicar la TSFAS con una perspectiva regional (fuera de los límites de la comuna de Petorca), y al observar los patrones topográficos, es posible suponer que los

flujos regionales provienen de la parte alta de la Cordillera de Los Andes, donde descenderían hasta alcanzar la roca basamento a altas profundidades, para luego transitar de Este a Oeste bajo la cuenca de Petorca a través de las unidades pre-cretácicas que subyacen a las rocas aflorantes. Los flujos regionales descargarían en el sector costero (Longotoma) o incluso bajo del mar. Por su parte, el sistema de flujos intermedios (de los cuales tampoco se halló evidencia en el área de estudio) se ubicaría a una profundidad intermedia entre los flujos locales y regionales, descargando junto o en sectores cercanos a los regionales.

En cuanto a la calidad del agua subterránea, en 7 puntos de muestreo se detectaron concentraciones de Mn, Mo, NO<sub>3</sub> y SO<sub>4</sub> que exceden los límites para consumo humano y riego, según la normativa oficial chilena. Los altos valores de NO<sub>3</sub> se asocian a la contaminación del agua por procesos orgánicos (desechos orgánicos, aguas residuales, descomposición de materia orgánica) o químicos (residuos industriales y fertilizantes). Los altos niveles de SO<sub>4</sub> se pueden explicar por la oxidación de los sulfuros en los depósitos polimetálicos de la comuna, ya sea por la interacción roca-agua subterránea o por contaminación de lixiviados mineros; otra fuente probable son los fertilizantes agrícolas. Los valores anómalos de Mn y Mo pueden vincularse a los yacimientos y lixiviados de relaves (jales) que se hallan próximos a los pozos contaminados. Estos resultados confirman las fuentes de afectación al agua subterránea identificadas por los habitantes de Petorca que participaron en este estudio (enero, 2020): contaminación por actividad agrícola, desechos mineros, aguas negras y desechos domiciliarios.

Respecto a las falencias identificadas en el actual modelo de administración y gestión del agua en Petorca, desde un punto de vista hidrogeológico, se concluye lo siguiente:

1. Existe un desconocimiento sobre el agua subterránea, su relación con el ambiente y su rol como agente geológico, lo cual conlleva a una inadecuada gestión y uso del agua, deficientes planes de gestión territorial, y aporta a la construcción social del riesgo de desastres.
2. La unidad de estudio y de administración del agua subterránea (el acuífero) presenta inconsistencias en cuanto a: (a) la definición de sus límites y extensión espacial, ya que responden a criterios administrativos y no hidrogeológicos; (b) su evaluación como una entidad aislada e hidráulicamente inconexa de los acuíferos vecinos; (c) los supuestos irreales en la formulación de modelos: fronteras del dominio con nula permeabilidad o de carga constante, medios geológicos homogéneos y/o isotrópicos, propiedades constantes del agua subterránea (densidad, temperatura), y aplicación de métodos estadísticos errados.
3. La evaluación del agua subterránea se basa en el balance hidrológico, cuya aplicación a sistemas hidrogeológicos es inconsistente porque: (a) supone que un acuífero es un sistema hidráulicamente cerrado; (b) su cálculo se basa en variables estimadas (no medidas) cuya certeza depende en gran medida de la calidad de los datos (las redes chilenas de monitoreo climático e hidrológico son deficientes); (c) considera escalas de tiempo inconsistentes con los procesos de recarga y tránsito de los diferentes tipos de flujos subterráneos.

4. La “disponibilidad de un acuífero” está determinada únicamente por el cálculo del balance hidrológico, es decir, sólo se considera la cantidad de agua subterránea y no se pone atención a su calidad, lo cual limita notablemente su uso y supone riesgos para la salud humana.

Se recomienda a las autoridades locales de Petorca considerar en sus planes y estrategias territoriales el estudio del agua subterránea aplicando las bases teóricas y metodológicas de los SFAS, ya que proporciona el enfoque más actualizado e integral sobre el funcionamiento de los sistemas hidrogeológicos. El caso de Petorca es crítico porque su población y ecosistemas dependen exclusivamente de flujos locales, es decir, los más susceptibles a ser afectados (en su calidad, volumen y dinámica) por disturbios superficiales de origen natural o antrópico. Si la actual tendencia de abatimiento de los niveles de agua subterránea no se revierte, pronto la población se verá forzada a acudir a los sistemas de flujos intermedios para satisfacer sus requerimientos de agua. Esto implicaría profundizar los pozos y extraer agua con importantes cambios en su calidad y propiedades, ya que los flujos intermedios presentan, en relación con los flujos locales, una mayor temperatura y salinidad, pH más alcalino, propiedades más reductoras, mayor conductividad eléctrica, menor contenido de oxígeno disuelto, y mayor proporción de sulfatos y cloruros vs bicarbonatos.

Una vez comprendido el funcionamiento del agua subterránea y su relación con el ambiente, junto con las formas de interacción entre agua y sociedad en la parte media-alta de la cuenca de Petorca, queda en evidencia que la problemática del agua está construida por dos condiciones: (1) Calidad y cantidad original (natural) y distribución en el medio subterráneo, determinados por la configuración de los SFAG en este territorio, incluyendo la influencia de los patrones hidroclimáticos. (2) Disputas entre los diversos actores hidrosociales y las relaciones de poder entre ellos, determinadas por las diferencias en las capacidades de capital, tecnología y fuerza de trabajo, lo que a su vez define la forma en que el agua es extraída, acumulada y repartida entre los usuarios. Por tal motivo, se hace indispensable abordar el estudio del agua integrando múltiples disciplinas, comprendiéndola como un sistema altamente complejo en el que interactúan procesos atmosféricos, (hidro)geológicos y sociales.

Finalmente, es preciso comentar que este trabajo comenzó con un Chile oprimido y despojado de sus riquezas naturales, y al concluirlo se percibe un país diferente, transitando un proceso constituyente por mandato popular que devolvió la esperanza de recuperar los derechos sociales arrebatados en dictadura, entre ellos, consagrar al agua como un bien nacional de uso público inapropiable y el reconocimiento del acceso al agua y saneamiento como un derecho humano fundamental.

## REFERENCIAS

- AC Ingenieros. 2019. Actualización de la modelación del sistema acuífero La Ligua-Petorca. Informe Final, S.I.T. N° 442. División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Santiago.
- Aduvire, O. 2006. Drenaje ácido de mina. Generación y tratamiento. Tratamiento de Aguas Acidas de Mina. Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. Obtenido de: [http://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258\\_0000001.pdf](http://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf).
- Aguirre, L. 1960. Geología de Los Andes de Chile Central, Provincia de Aconcagua. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín 9: 70 p. Santiago.
- Alcaraz, F. 2012. El bosque y la maquia esclerófila. Geobotánica, Universidad de Murcia, España. Obtenido de: <https://www.um.es/docencia/geobotanica/ficheros/tema25.pdf>.
- Alwang, J., P. Siegel and S. Jorgensen. 2001. Vulnerability: a view from different disciplines, Social Protection Discussion Paper Series, Banco Mundial Washington.
- Ampuero-Tobar, F.; Bahamondes, J.; Bernard, I.; Cifuentes, E.; Crisóstomo, E.; Hernández, Y.; Jorquera, C.; Larrère, C.; Morales, P.; Oliveros, V.; Perales, C.; Schulz, C.; Sepúlveda, J.; Thibaut, R.; Valencia, M.; Yévenes, E. 2018. Caracterización isotópica mediante  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de la zona inferior de la cuenca del río Biobío, VIII región, Chile. Nota Geológica. Pyroclastic Flow, 8 (1) 1-4 p. Journal of Geology – ISSN 0719-0565.
- Arellano, A. 2017. Corte Suprema zanjó polémica disputa por derechos de agua en Petorca. CIPERCHILE, 04.05.2017. Obtenido de: <https://ciperchile.cl/2017/05/04/corte-suprema-zanjo-polemica-disputa-por-derechos-de-agua-en-petorca/>.
- Ares, P. y Risler, J. 2013. Manual de Mapeo Colectivo: Recursos cartográficos críticos para procesos territoriales de creación colectiva. 1a ed. Buenos Aires: Tinta Limón.
- Arumí, J.L. y Oyarzún, R.A. 2006. Las aguas subterráneas en Chile. Boletín Geológico y Minero, 117 (1), 37-45 p. ISSN: 0366-0176.
- Ávila, P. 2008. Vulnerabilidad socioambiental, seguridad hídrica y escenarios de crisis por el agua en México. Ciencias número 90, abril-junio, 46-57 p.
- Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. 2014. Modelación Hidrogeológica de los acuíferos de Ligua y Petorca. Informe Final. Santiago.
- Baeza, E. 2018. Sequía y Escasez Hídrica: conceptos relacionados, situación actual y experiencia comparada en varios países para abordar el problema. Asesoría Técnica Parlamentaria. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. SUP114292.
- Bakker, K., 2002. From state to market? Water mercantilización in Spain. Environment and Planning A 34 (5), 767-790 p.
- Banco Mundial. 2011. Chile: Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Departamento de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Región para América Latina y el Caribe. Documento N° 63392.
- Basoalto, C. 2019. Caracterización mineralógica y su relación con el potencial de contaminación del relave abandonado, “Dulcinea” ubicado en la comuna de Petorca, Región de Valparaíso. Memoria para optar al título de Geóloga. Facultad de Ingeniería, Universidad Andrés Bello, Viña del Mar, Chile.
- BCN (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile). 2013. Reportes Estadísticos y Comunales, 2013. Obtenido de: <http://reportescomunales.bcn.cl/>
- Birkmann, J. (2013) Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies and to enhance adaptation: Discussion of conceptual frameworks and definitions. En Birkmann, J. (ed.) Measuring vulnerability to natural hazards: towards disaster resilient societies. (Segunda edición). Tokyo y New York: United Nations University, p. 9-79.
- Bocco, G., y Urquijo, P. 2013. Geografía ambiental: reflexiones teóricas y práctica institucional. Región y sociedad, 25(56), 75-102. Obtenido de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-39252013000100003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-39252013000100003&lng=es&tlng=es).
- Bolaños-Alfaro, J., Cordero-Castro, G., y Segura-Araya, G. 2017. Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). Revista Tecnología en Marcha, 30(4), 15. 15-27 p. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>

- Bolados, P.; Henríquez, F.; Ceruti, C. & Sánchez, A. 2018. La eco-geo-política del agua: una propuesta desde los territorios en las luchas por la recuperación del agua en la Provincia de Petorca (Zona Central de Chile). *Revista Rupturas* 8 (1), Costa Rica. ISSN 2215-2466. 167-199 p.
- Börgel, R. 1983. *Geografía de Chile: geomorfología*. Instituto Geográfico Militar: 182 p. Santiago.
- Boschetti, T.; Cifuentes, J.; Iacumin, P. y Selmo, E. 2019. Local Meteoric Water Line of Northern Chile (18°S–30°S): An Application of Error-in-Variables Regression to the Oxygen and Hydrogen Stable Isotope Ratio of Precipitation. *Water* 2019, 11, 791; doi: 10.3390/w11040791.
- Boyce, D. 2015. Modelo de evolución tectónica y paleogeográfica del margen andino en Chile Central durante el Cretácico Medio-Tardío: El registro estructural y sedimentario en la Formación Las Chilcas. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias, Mención Geología. Departamento de Geología. Universidad de Chile.
- Bryman, A. 2008. Of methods and methodology. *Qualitative Research in Organizations and Management: An International Journal*. 3. 159-168 p. DOI: 10.1108/17465640810900568.
- Budds, J. 2012. La demanda, evaluación y asignación del agua en el contexto de escasez: un análisis del ciclo hidrosocial del valle del río La Ligua, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 52: 167-184 p.
- Bujes, N. 2015. Estudio de la propiedad del agua subterránea del acuífero del Río Petorca en la Región de Valparaíso, Chile. Memoria para optar al título profesional de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Cade-Idepe Consultores. 2004. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Volumen 5. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago.
- Campbell, D. 2005. Termocronología del sector comprendido entre los ríos Rocín y Aconcagua: Implicancias en la evolución meso-cenozoica de la zona. Memoria de título, Departamento de Geología, Universidad de Chile: 113 p.
- Camus, F.; Boric, R.; Skewes, M. 1986. El distrito de oro el bronce y su relación con la Caldera Morro Hediondo, Región de Valparaíso, Chile. *Revista Geológica de Chile* No. 28-29, 95 -101 p.
- Camus, F.; Boric, R.; Skewes, M. A.; Castelli, J. C.; Reichhard, E.; Mestre, A. 1991. Geologic, structural, and fluid inclusion studies of El Bronce epithermal vein system, Petorca, central Chile. *Economic Geology*, 86(6), 1317-1345 p.
- Carmona, C., Carrillo-Rivera, J., Hatch, G., Huizar, R. y Ortega, M. 2017. *Ley del Agua Subterránea: una propuesta*. UNAM, México. ISBN: 978-607-02-8997-2. DOI: <http://dx.doi.org/10.14350/sc.04>
- Carrillo-Rivera, J. y Ouyse, S. 2013. Evaluation of Groundwater Flow System Functioning in Mexico to Reduce Drought Impacts. En "Drought in Arid and Semi-Arid Regions: A multidisciplinary and cross-country perspective". Schwabe, K.; Albiac, J.; Connor, J.; Hassan, R.; Meza, L. (eds). Springer, 269-280.
- Carrillo-Rivera, J. y Cardona, A. 2012. Groundwater Flow Systems and Their Response to Climate Change: A Need for a Water-System View Approach, *American Journal of Environmental Sciences*, V8, 220-235 p.
- Carrillo-Rivera, J., Huizar, R., Cardona, A., Varela, G., Granel, E. y Zenteno, G. 2007. Impactos ambientales relacionados con el uso inadecuado del agua subterránea en México. *Nuevo Atlas Nacional de México*, IGg, UNAM.
- Carrillo-Rivera, J., Ouyse, S. y Hernández-García, G. 2013. Integrative Approach for Studying Water Sources and their Vulnerability to Climate Change in Semi-Arid Regions (Drâa Basin, Morocco). *International Journal of Water Resources and Arid Environments* 2(1): 26-36 p. ISSN 2079-7079.
- Carrillo-Rivera, J., Peñuela, L.; Huizar, R.; Cardona, A.; Ortega, M.; Vallejo, J.; Hatch, G. 2016. Conflictos por el agua subterránea. Capítulo 10 en libro: *Geografía de México, Una reflexión espacial contemporánea* (pp. 151-166, Tomo I). Edición: 2016. Instituto de Geografía, UNAM. Editores: Omar Moncada Maya y Álvaro López López.
- Casado, J., Calvo, D., Monteverde, E. y Alfonso, P. 2013. Determinación del origen de los sulfatos disueltos en las aguas de La Cuenca del Llobregat en el Bages. Libro de Actas del III Congreso Internacional de Geología y Minería Ambiental para el Ordenamiento Territorial y el Desarrollo. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/20584>.
- Castree, N.; Demeritt, D. y Liverman, D. 2009. Introduction: Making Sense of Environmental Geography. En "A Companion to Environmental Geography". Castree, D.; Demeritt, D.; Liverman, D.; Rhoads, B. (eds) Wiley-Blackwell, Chichester, UK: 1-15 p.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 2011. Antecedentes sobre producción frutícola y vitícola de la Región de Valparaíso. Publicación Ciren N° 138. ISBN 978 - 956 - 7153 - 89 - 3.

- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 1997. Estudio Agrológico V Región, Descripciones de Suelos.
- Clark I. y Fritz P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrology*. CRC Press, Boca Raton, Fl., 328 p.
- CNR (Comisión Nacional de Riego). 1979. Estudio integral de riego de los valles de Aconcagua, Putaendo, Ligua y Petorca: Nivel de Factibilidad. Elaborado por CICA Ingenieros Consultores, Binnie & Partners, Hunting Technical Services Ltd. Santiago.
- CNR (Comisión Nacional de Riego). 1995. Estudio a nivel de diagnóstico del Proyecto Aconcagua, V Región. Volumen III. 1. Caracterización del valle. 1.3 Estudio de los recursos hídricos.
- Costa, E. 2016. Diagnóstico para un Cambio: Los Dilemas de la Regulación de las Aguas en Chile. *Revista Chilena de Derecho*, 43(1), 335-354 p. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34372016000100014>.
- CR2 (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia). 2015. Report to the Nation: The Central Chile Mega-Drought. Technical report from the Center for Climate and Resilience Research. 30 pp. Santiago-Chile. Obtenido de: <http://www.cr2.cl/megasequia>.
- Craig, H. 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters, *Science*, 133 (3465), 1702-1703. <http://dx.doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>.
- Custodio, E. y Llamas, M. R. 1996. *Hidrología Subterránea*. Tomo I y II. Ed. Omega, Barcelona, España. 2a. Edición corregida.
- Cutter, S., Emrich, C., Webb, J. y Morath, D. 2009. *Social Vulnerability to Climate Variability Hazards: A Review of the Literature*. Final report to Oxfam America. Hazards and Vulnerability Research Institute, University of South Carolina.
- DGA (Dirección General de Aguas). 2014. Determinación de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común, Áreas de Restricción, acuíferos de los ríos Petorca y La Ligua. Informe Técnico DARH N° 69, SDT N° 352.
- DGA (Dirección General de Aguas). 2016a. El Agua, un bien escaso. Capítulo 3, Atlas del Agua de Chile. División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Serie de Estudios Básicos DGA, S.S.S. N° 6. I.S.B.N. 978-956-7970-30-8.
- DGA (Dirección General de Aguas). 2016b. Gestión del Agua. Capítulo 4 en el Atlas del Agua de Chile. División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas. Serie de Estudios Básicos DGA, S.S.S. N° 6. I.S.B.N. 978-956-7970-30-8.
- DGA (Dirección General de Aguas). 2017. Inventario Nacional de Acuíferos. Informe técnico SDT N° 403. División de Estudios y Planificación, Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas.
- Diario UChile. 2021. Greenpeace: "Fallo a favor de Petorca demuestra que el acceso al agua debe ser un tema constitucional". Publicado el 25 de marzo 2021 en revista digital. Obtenido de <https://radio.uchile.cl/2021/03/25/greenpeace-fallo-a-favor-de-petorca-demuestra-que-el-acceso-al-agua-debe-ser-un-tema-constitucional/>.
- Dickinson, J.E., Land, M., Faunt, C.C., Leake, S.A., Reichard, E.G., Fleming, J.B; Pool, D.R. 2006. Hydrologic framework refinement, ground-water flow and storage, water-chemistry analyses, and water-budget components of the Yuma area, Southwestern Arizona and Southeastern California. Reston, Virginia. Scientific Investigation Report 2006-5135. <http://pubs.usgs.gov/sir/2006/5135/>.
- Domenico, P.A.; Schwartz, F.W. 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology*, 2a ed., John Wiley & Sons, Inc.
- DRH (Departamento de Recursos Hídricos). 2016. Estudio básico diagnóstico para desarrollar plan de riego en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca. Informe Final para la CNR, Tomo II. Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.
- Edáfica. 2020. Inventario de humedales urbanos y actualización catastro nacional de humedales. Licitación 608897-16-LE19 del Ministerio del Medio Ambiente.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2018. Progresos en el nivel de estrés hídrico: valores de referencia mundiales para el indicador 6.4.2 de los ODS. Roma. FAO y ONU-Agua. 58 pp. Licencia: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. ISBN 978-92-5-130988-9.
- FNB-IOM (Food and Nutrition Board & Institute of Medicine). 2001. Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc. A report of the panel on micronutrients (20418). Washington D.C. National Academy Press.
- Fock, A.; Charrier, R.; Farías, M.; Muñoz, M. 2006. Fallas de vergencia oeste en la Cordillera Principal de Chile Central: Inversión de la cuenca de Abanico (33°-34°S). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, Publicación Especial 6: 48-55 p.



- Folke, C. 2006. Resilience: the emergence of a perspective for social-ecological systems analyses. *Global Environmental Change*, N°16, 253-267 p.
- Fontes, J.C. 1986. Environmental isotopes in groundwater hydrology, in *Handbook of environmental isotope geochemistry*, Vol I by Fritz P. y Fontes J.C., pp 75-140. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Freeze, R.A. y Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, 589 p.
- Fritz, P., Cherry, J.A., Weyer, K.U., Sklash, M. 1976. Interpretation of Environmental Isotope and Hydrochemical Data in Groundwater Hydrology (Int. At. Energy Agency, Vienna), 111-130 p.
- Fundación Chile. 2015. Catastro de Medias y Tecnologías para la Prevención, Control y Tratamiento del Drenaje Minero. Documento elaborado para SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería). Obtenido en: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/Catastro-de-Medidas-y-Tecnologias.pdf>
- García-Casal, M. N.; Landaeta, M.; Adrianza de Baptista, G.; Murillo, C.; Rincón, M.; Bou Rached, L.; Bilbao, A.; Anderson, H.; García, D.; Franquiz, J.; Puche, R.; García, O.; Quintero, Y.; Peña-Rosas, J. P. 2013. Valores de referencia de hierro, yodo, zinc, selenio, cobre, molibdeno, vitamina C, vitamina E, vitamina K, carotenoides y polifenoles para la población venezolana. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 63(4), 338-361 p. [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0004-06222013000400010&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-06222013000400010&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Garreaud, R; Boisier, J.; Rondanelli, R.; Montecinos, A.; Sepúlveda, H.; Veloso-Aguila, D. 2019. The Central Chile Mega Drought (2010-2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40:421-439. DOI: 10.1002/joc.6219.
- Garza, S.; Carrillo-Rivera, J. y Huizar, R. 2018. *Coloquios sobre el agua subterránea en México*. Primera edición 2018. Senado de la República, LXIII Legislatura, México.
- GCF Ingenieros Ltda. 2011. Diagnóstico de los recursos subterráneos en el sistema hídrico Ligua y Petorca. Informe Final. Comisión Nacional de Riego, Ministerio de Agricultura.
- Gilberto J.; Estay, H. 1978. Seasonal water stress in some Chilean matorral shrubs. *Bot Gaz* 139: 236-260.
- Gleick, P. 1996. Basic Water Requirements for human Activities: Meeting Basic Needs. *Water International*, 21 (1996) 83-92. Obtenido de: [http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/citla/Lecturas\\_Temas\\_selecto\\_IV\\_AGUA/basic\\_water\\_needs\\_IN\\_WATER\\_INTERNATIONAL\\_21.pdf](http://sgpwe.izt.uam.mx/files/users/uami/citla/Lecturas_Temas_selecto_IV_AGUA/basic_water_needs_IN_WATER_INTERNATIONAL_21.pdf)
- Gobierno de Chile. 2012. Chile Cuida su Agua. Estrategia Nacional de Recursos Hídricos: 2012-2025. Obtenido de: [https://www.mop.cl/Documents/ENRH\\_2013\\_OK.pdf](https://www.mop.cl/Documents/ENRH_2013_OK.pdf).
- Guilarte, T. R. 2011. Manganese and Parkinson's disease: a critical review and new findings. *Ciência & Saúde Coletiva*, 16(11), 4519-4566. <https://doi.org/10.1590/s1413-81232011001200028>.
- Harvey, D. 2003. *The New Imperialism*, Oxford University Press, Oxford, 253 p. ISBN: 01 9926 4317. *Investigaciones Geográficas*, 56, 160. <https://doi.org/10.14350/rig.30102>. Traducción castellana (2003): *El nuevo imperialismo*. Madrid: Akal. *Cuestiones de Antagonismo*.
- Hatch-Kuri, G. 2021. Aguas subterráneas transfronterizas y fracking: invisibilidad y fragmentación en el contexto de la integración energética de América del Norte. *Geocrítica Scripta Nova, Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales, Universitat de Barcelona*. ISSN: 1138-97 Vol. 25, Núm. 1 (2021), p. 169-193.
- Hatch-Kuri, G.; Carrillo-Rivera, J. 2021. Conceptos científicos y sus implicaciones políticas en el manejo de las aguas transfronterizas México-Estados Unidos: ¿Acuífero transfronterizo o aguas subterráneas transfronterizas? *Agua y Territorio*, 21 1-16 p. Enero-Junio 2023, Universidad de Jaén (España). DOI 10.17561/AT.21.5738.
- Hem, J. D. 1985. *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water*. U.S Geological Survey, Water-Supply Paper 2254, (Third Edition). Obtenido en: <https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2254/pdf/wsp2254a.pdf>.
- Hidalgo, C. 2011. Aproximación a la Dirección de Flujo Magmático y Variaciones Composicionales, Mineralógicas y Texturales de Diques Máficos del Complejo Plutónico Illapel. Memoria de Título. Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Hidrogestión. 2019. La Ligua y Petorca: Radiografía de una realidad hídrica. 5a Jornada Técnica ALHSUD 2019. La Ligua y Petorca "Una mirada a la realidad actual, contexto histórico y propuesta de solución". Centro de Extensión U. de Talca (sede Santiago), 31.07.2019.
- Holling, C. S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4:1-23.

- IGRAC (International Groundwater Resources Assessment Center). 2015. Transboundary Aquifers of the World. Netherlands: UNESCO International Hydrological Programme.
- INDH (Instituto Nacional de Derechos Humanos). 2012. Informe anual de derechos humanos en Chile. Informe Anual 2012.
- INDH (Instituto Nacional de Derechos Humanos). 2021. Balance mensual querellas INDH. Estado de avance de las querellas presentadas por el INDH en el contexto de la crisis social. Datos actualizados al 06 de septiembre de 2021. Recuperado de <https://www.indh.cl/>.
- INE (Instituto Nacional de Estadística). 2015. Compendio estadístico 2015.
- INE (Instituto Nacional de Estadística). 2019. División política administrativa y censal. Región de Valparaíso. Departamento de Geografía. Obtenido en: <https://geoarchivos.ine.cl/File/pub/poblaci%C3%B3n-y-vivienda-valpara%C3%ADso.pdf>.
- INN (Instituto Nacional de Normalización). 1999. Norma Chilena Oficial NCh1333.Of78. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos.
- INN (Instituto Nacional de Normalización). 2006. Norma Chilena Oficial NCh409/1.Of.2005. Agua Potable – Parte 1 –Requisitos.
- Jara, P. 2013. Tectónica Meso-Cenozoica en la Cordillera Principal de Chile Central entre 32° y 33°S. Análisis a partir de nuevos antecedentes de campo y modelamiento analógico (Doctoral dissertation, Ph. D. Thesis (Unpublished), Departamento de Geología, Universidad de Chile: 277 p.
- Jara, P. y Charrier, R. 2014. Nuevos antecedentes estratigráficos y geocronológicos para el Meso-Cenozoico de la Cordillera Principal de Chile entre 32° y 32°30'S: Implicancias estructurales y paleogeográficas. *Andean geology*, 41(1), 174-209 p.
- Jouravlev, A.S. 2010. Código de Aguas de Chile: desafíos pendientes. Presentación a la Dirección General de Aguas, Santiago, 15 de Julio 2010.
- Kachadourian-Marras, A.; Alconada-Magliano, M.; Carrillo-Rivera, J.; Mendoza, E.; Herrerías-Azcue, F.; Silva, R. 2020. Characterization of Surface Evidence of Groundwater Flow Systems in Continental Mexico. *Water* 2020, 12, 2459; doi: 10.3390/w12092459.
- Kammeyer, C. 2017. The World's Water Challenges 2017. Pacific Institute. Obtenido de: <http://bcn.cl/246lp>.
- Khan, K.; Factor-Litvak, P.; Wasserman, G. A.; Liu, X., Ahmed, E.; Parvez, F.; Slavkovich, V.; Levy, D.; Mey, J.; van Geen, A.; Graziano, J. H. 2011. Manganese Exposure from Drinking Water and Children's Classroom Behavior in Bangladesh. *Environmental Health Perspectives*, 119(10), 1501-1506 p.
- Kotliarenco, M.; Cáceres, I.; Fontecilla, M. 1997. Estado de arte en resiliencia. Washington: Organización Panamericana de la Salud.
- Larraín, S.; Aedo, M.P.; Navarrete, K.; Villarroel, C. 2010. Marco Jurídico para la gestión de agua en Chile: Diagnóstico y desafíos. Programa Chile Sustentable. I.S.B.N.: 978-956-7889-44-0.
- Levi, B. 1970. Burial metamorphic episodes in the Andean Geosyncline, Central Chile. *Geologische Rundschau*, Vol. 59, p 994-1013.
- Linton, J.; Budds, J. 2014. The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. *Geoforum* 57 (2014) 170-180 p.
- Luebert, F. y Plissock, P. 2012. Variabilidad Climática y Bioclimas de la Región de Valparaíso, Chile. *Investigaciones Geográficas* (44): 41-56 p.
- Mansilla, S. 2007. Línea de base. Estrategia regional de biodiversidad. Sitio: "Altos de Petorca y Alicahue". CONAMA Región Valparaíso, Unidad de Protección de Recursos Naturales.
- Marcos, O. 2001. Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, N° 26 (2001), 59-80 p.
- Margat, J. 1968. Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine a la pollution: bases de la cartographie. BRGM Publication 68-SGL 198, BRGM, Orleans, Francia.
- Maureira, H.; Kuijk, F. 2017. Escenarios Hídricos 2030: Indicador de déficit hídrico en Aguas Subterráneas de Chile. Informe Final (Consultoría).
- Mehta, L. 2007. Whose scarcity? Whose Property? The case of water in western India. *Land use Policy*, vol. 24, n°4, 654-663 p.
- Merlet, H.; Herrera, A.; Díaz, T. 2018. Visualizador SIG Región de Valparaíso: aptitud agrícola suelo-clima actual y clima proyectado, para especies de frutales priorizadas. CIREN. Obtenido de <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/26820>.

- Ministerio de Justicia de Chile. 1981. Código de Aguas. Decreto con fuerza de Ley. Obtenido de: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=5605>.
- Ministerio del Interior y Seguridad Pública de Chile. 2015. Política Nacional para los Recursos Hídricos. Delegación Presidencial para los Recursos Hídricos.
- Mook, W., 2000. Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Principles and Applications. UNESCO-EIA. 6 vol.
- Moscoso, R.; Padilla, H.; Rivano, S. 1982. Geología de la Hoja Los Andes, Región de Valparaíso. Santiago. IIG. Carta Geológica de Chile nº052. Obtenido de: <https://hdl.handle.net/123456789/18653>.
- Moshfiqur, S.; Kippler, M.; Tofail, F.; Bölte, S.; Derakhshani, J.; Vahter, M. Manganese in drinking water and cognitive abilities and behavior at 10 years of age: a prospective cohort study. 2016. Environmental Health Perspectives.
- Mundaca, R. 2014. La Privatización de las Aguas en Chile, Causas y Resistencias. Editorial América en Movimiento, Santiago de Chile.
- OPS (Organización Panamericana de la Salud). 1980. Criterios de Salud Ambiental 5. Nitratos, nitritos y compuestos de N-nitroso. Servicio de Publicaciones y Documentación de la OPS/OMS. México, D.F.
- Ortega, N. 2009. La Crisis hídrica de la Ciudad de México: Dimensiones y alternativas. Premio Casa del Tiempo 2009, Categoría Ensayo en Ciencias Sociales.
- Parada, M.A.; Rivano, S.; Sepúlveda, P.; Hervé, M.; Hervé, F.; Puig, A.; Munizaga, F.; Brook, M.; Pankhurst, R.; Snelling, N. 1988. Mesozoic and Cenozoic plutonic development in the Andes of Central Chile (30°30'-32°30'S). Journal of South American Earth Science, Vol. 1, No. 3, 249-260 p.
- Parkhurst, D.; Appelo, C. 2013. Description of input and examples for PHREEQC version 3: a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Chapter 43 of Section A: Groundwater in Book 6 Modeling Techniques. U.S. Geological Survey, Reston, VA. DOI 10.3133/tm6A43. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/tm6A43>.
- Peet, R. 1977. Radical Geography: Alternative Viewpoints on Contemporary Social Issues. Maaroufa Press geography series, Michigan. 387 pp. ISBN 0884250067, 9780884250067.
- Peña, H. 2003. Taller nacional hacia un plan nacional de gestión integrada de los recursos hídricos en Chile. Marco conceptual. Diciembre 2003.
- Peñuela, L. y Carrillo-Rivera, J. 2012. Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. ISSN 0188-4611, Núm. 81, 2013, 18-32 p.
- Pérez, R. 2018. Patrimonio geológico de la Comuna de Petorca (32°S – 32°24'S): Análisis de lugares de interés geológico y su contextualización en un modelo de evolución paleogeográfico. Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Price, M. 2007. Agua Subterránea. México. Ed. Limusa. 330 pp.
- Rahman, S. M.; Kippler, M.; Tofail, F.; Bölte, S.; Derakhshani, J.; Vahter, M. 2017. Manganese in Drinking Water and Cognitive Abilities and Behavior at 10 Years of Age: A Prospective Cohort Study. Environmental Health Perspectives, 125(5), 057003. <https://doi.org/10.1289/ehp631>.
- RAE (Real Academia Española). 2022. Diccionario de la lengua española. Obtenido de <https://dle.rae.es/>.
- Ramírez, A. 2019. Caracterización física, mineralógica e implicancias ambientales del relave "Petronila", V Región. Tesis para optar al grado de Geólogo, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Andrés Bello, Santiago, Chile.
- Ramírez, R.; Azcona-Cruz, M. 2017. Efectos tóxicos del manganeso. Artículo de Revisión, Rev Esp Méd Quir. 2017; 22:71-5 p.
- Rivano, S. 1996. Geología de las Hojas Quillota y Portillo. Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología.
- Rivano, S.; Godoy, E.; Vergara, M.; Villarroel, R. 1990. Redefinición de la Formación Farellones en la Cordillera de Los Andes de Chile Central (32°-34°S). Revista Geológica de Chile 17 (2): 205-214 p.
- Rivano, S. y Sepúlveda, P. 1991. Carta Geológica de Chile Nº69. Hoja Illapel. SERNAGEOMIN. 131 p.
- Rivano, S.; Sepúlveda, P.; Boric, R.; Espiñeira, D. 1993. Hoja Quillota y Portillo. V Región. SERNAGEOMIN, Carta Geológica de Chile 73, 1 mapa escala 1:250.000. Acompaña Informe Inédito 7644.
- Rivano, S.; Sepúlveda, P.; Herve, M.; Puig, A. 1985. Cronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31-32 S, Chile. Rev. Geol. Chile, 63-74 p.
- Rivera, D. 2015. Diagnóstico jurídico de las aguas subterráneas. Revista Ius et Praxis, Año 21, Nº 2, 2015, 225-266 p. ISSN 0717-2877.

- Rodríguez M, Daniel. Federico Luebert y Patricio Plissock. 2008. Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile. *Revista de geografía Norte Grande*, (40), 105-107 p. Obtenido de: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022008000200008>.
- USGS (U.S. Geological Service). 2012. Alkalinity and acid neutralizing capacity (ver. 4.0, September 2012): U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 9, chap. 6.6, <https://doi.org/10.3133/twri09A6.6>.
- Ruiz, N. 2012. La definición y medición de la vulnerabilidad social. Un enfoque normativo. *Investigaciones Geográficas* (77), 63–74 p.
- Rybertt, J. 2019. Hidrogeología y modelo conceptual del acuífero de Petorca en el sector alto de la cuenca del río Petorca, Región de Valparaíso. Tesis Para Optar al Grado de Geóloga. Departamento Geología, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Andrés Bello, Viña del Mar, Chile.
- Salazar, B. 1999. Evaluación de la Cuenca del Río Pedernal en Función de su Utilización Agrícola Sustentable, en base a Parámetros Geográfico – Físicos, en la Comuna de Petorca, Quinta Región. Tesis para optar al Grado de Licenciado en Geografía y al Título de Geógrafo. Instituto de Geografía, Facultad de Recursos Naturales, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile.
- Sánchez-Murillo, R., Aguirre-Dueñas, E., Gallardo-Amestica, M., Moya-Vega, P., Birkel, C., Esquivel-Hernández, G., Boll, J. 2018. Isotopic characterization of waters across Chile. En: Rivera, D.A., Godoy-Faundez, A., Lillo-Saavedra, M. (eds.), *Andean Hydrology* (Capítulo 9). CRC Press, 205–230 p. <https://doi.org/10.1201/9781315155982-9>.
- Schmidt, S.; Hatch-Kuri, G.; Carrillo-Rivera, J. 2022. Agua. El Oro Invisible. Centro de Estudios Económicos, Políticos y de Seguridad, Obras Completas # 78, Cuadernos para el debate. 1ª edición, 2022. D.R. 145 p. ISBN: 9798429829272.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) e Instituto Nacional de Ecología. 2012. Género, Ambiente y Contaminación por Sustancias Químicas (Primera edición). Google Books. ISBN: 978-607-8246-13-7.
- Soto, J. 2015. Degradación ambiental del agua subterránea en el entorno de la gestión gubernamental de los recursos hídricos en la Región Lagunera, México. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias y Humanidades para el Desarrollo Interdisciplinarios. Centro de Estudios e Investigaciones Interdisciplinarios, Universidad Autónoma de Coahuila, México.
- Stevens, G. 2012. La vulnerabilidad hídrica en la ciudad de San Luis Potosí. Un análisis espacial. *Revista de El Colegio de San Luis, Nueva época*, año II, número 4. El Colegio de San Luis.
- SUBDERE (Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo). 2011. Estudio Identificación de Territorios Aislados. Estudios y Análisis Territoriales, Chile.
- Tarback, E. y Lutgens, F. 2005. Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física. 8ª edición. Pearson Educación S. A., Madrid.
- The Brisbane Declaration. 2007. “Environmental flows are essential for freshwater ecosystem health and human well-being,” in 10th International River Symposium and International Environmental Flows Conference (Brisbane, QLD), Australia, 2007. <ELOHA/Pages/Brisbane-Declaration.aspx>
- Thiele, R. 1980. Hoja Santiago, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile (29) 21 p.
- Thomas, H. 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el Valle de La Ligua y la Cuesta Barriga. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, No. 2, 86 p. Santiago.
- Tóth, J. 1963. A Theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, V68, pp. 4795-4812.
- Tóth, J. 1970. A conceptual model of the groundwater regime and the hydrogeologic environment. *Journal of Hydrology*, 10:164–176.
- Tóth, J. 2000. Las aguas subterráneas como agente geológico: causas procesos y manifestaciones, *Bol. Geológico y Minero, I. Tec. GeoMin España*, V111, pp.49–26.
- Troncoso, M. 2014. Evidencia geomorfológica de neotectónica en el borde oriental de la depresión Los Andes - San Felipe, Provincia de Los Andes, Región de Valparaíso. Memoria de para optar al grado de Magister en Ciencias, Mención Geología. Departamento de Geología, Universidad de Chile, Chile.
- United Nations. 2013. Water Security and the Global Water Agenda. Institute for water environment and health ISBN 978-92-808-6038-2, United Nations University. A UN-Water Analytical Brief.

- United Nations. 2015. World Population Prospects: The 2015 Revision. Key findings and advance tables. Working Paper No. ESA/P/WP 241.
- Urquiza, A.; Cadenas, H. 2015. Sistemas socio-ecológicos: elementos teóricos y conceptuales para la discusión en torno a vulnerabilidad hídrica. *L'Ordinaire des Amériques*. Obtenido en: <http://journals.openedition.org/ordea/1774>; DOI: 10.4000/ordea.1774.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Second Edition, 1999. Washington, DC.
- USDHHS (U.S. Department of Health and Human Services). 2016. Report on Carcinogens, Fourteenth Edition. National Toxicology Program, Department of Health and Human Services. [https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/roc/content/listed\\_substances\\_508.pdf](https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/roc/content/listed_substances_508.pdf)
- Van Loon, A. F.; Stahl, K.; Di Baldassarre, G.; Clark, J.; Rangelcroft, S.; Wanders, N.; Gleeson, T.; Van Dijk, A.; Tallaksen, L.; Hannaford, J.; Uijlenhoet, R. 2016. Drought in a human-modified world: reframing drought definitions, understanding, and analysis approaches. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 3631-3650, 2016. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3631-2016>
- Van Loon, A. F.; Van Lanen, H. A. 2013. Making the distinction between water scarcity and drought using an observation-modeling framework. *Water Resources Research*, 49(3), 1483-1502. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20147>
- Vergara, A. 2010. Diagnóstico de problemas en la gestión de recursos hídricos: aspectos institucionales para una futura propuesta de modificaciones legales, reglamentarias y/o de prácticas administrativas. Informe preparado para el diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos. Santiago, Chile.
- Vicencio, V. 2017. Informe geológico preliminar sector vertedero de Chincolco. Documento no publicado.
- Vicencio, V.; De la Fuente, D.; Martínez, T.; Bergoeing, J.P.; Bravo, C.; Pérez, R.; Quezada, S.; Stefani, E.; Plaza, S.; Rybertt, J.; Bassi, M.; Pérez, F.; Gallardo, M.; Vivanco, S.; Iriarte, C. 2017. Inventario de geodiversidad de la Comuna de Petorca. Primera etapa del Proyecto Geoparque del Valle de Petorca: Exploración de la Geodiversidad de la Comuna de Petorca (inédito).
- Villarroel, C. 2012. Asociaciones comunitarias de agua potable rural en Chile: diagnóstico y desafíos. Santiago de Chile. Eds: S. Larraín & T. Montecinos. Gráfica Andes. ISBN: 978-956-8299-01-9.
- Wilches, G. 1993. La vulnerabilidad global. En Maskrey, A. (comp.) *Los desastres no son naturales*. Panamá, La Red, p. 11-44.
- Wisner, B.; Blaikie, P.; Cannon, T.; Davis, I. 2004. *At risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*, (2a ed.), Routledge, Londres.
- WMO-UNESCO (World Meteorological Organization - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). 2012. *International Glossary of Hydrology*. WMO-No. 385, Switzerland. ISBN 978-92-63-03385-8.
- WRB (World Reference Base for Soil Resources). 2015. *Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. Informes sobre recursos mundiales de suelos 106*. FAO, Roma.

## BIBLIOGRAFÍA

LGEEPA: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN):  
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública:  
[http://archivos.diputados.gob.mx/Centros\\_Estudio/Cesop/Eje\\_tematico/d\\_mambiente.htm](http://archivos.diputados.gob.mx/Centros_Estudio/Cesop/Eje_tematico/d_mambiente.htm)

DPEJ (Diccionario Panhispánico del Español):  
<https://dpej.rae.es/lema/potabilizaci%C3%B3n#:~:text=Adm.,de%20abastecer%20a%20una%20poblaci%C3%B3n.>

El Observador: <http://www.observador.cl/petorca-empresa-concesionaria-pide-indemnizacion-y-suspender-contrato-del-embalse-las-palmas-por-falta-de-agua-en-la-zona/>

SiSS (Superintendencia de Servicios Sanitarios): <http://www.siss.gob.cl/appsiss/historico/w3-article-3809.html>

El Desconcierto: <https://www.eldesconcierto.cl/nacional/2019/02/04/desmantelan-tuberia-ilegal-que-robaba-agua-en-petorca-para-empresa-productora-de-paltas.html>

Doble Espacio (revista de la Escuela de Periodismo, Universidad de Chile): <http://www.doble-espacio.uchile.cl/2021/07/09/ser-mujer-y-vivir-en-petorca-significa-no-poder-ir-al-colegio-o-a-trabajar-porque-estas-con-la-menstruacion-y-no-tienes-agua/>

Conagua: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>

Medio Cooperativa: <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/region-de-valparaiso/defensora-del-agua-en-petorca-es-amenazada-de-muerte-por-tercera-vez-en/2022-01-11/011634.html>

Mapoteca Digital de la DGA:  
<https://dga.mop.gob.cl/estudiospublicaciones/mapoteca/Paginas/Mapoteca-Digital.aspx>

Estaciones fluviométricas: <https://camels.cr2.cl/>

Lenntech: <https://www.lenntech.com/calculators/accuracy/accuracy-water-analysis.htm>

Noticiero SoyQuilota: <https://www.soychile.cl/Quillota/Sociedad/2021/08/27/720534/derrame-relave-minero-petorca.aspx>



## ANEXO 1

### PROTOCOLO DE TRABAJO DE CAMPO:

#### CALIBRACIÓN DE EQUIPOS Y MEDICIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS

*Elaborado por Denisse De la Fuente Vivanco. Gracias al conocimiento y experiencia de Flor Navarrete, José Joel Carrillo-Rivera y Antonio Cardona.*

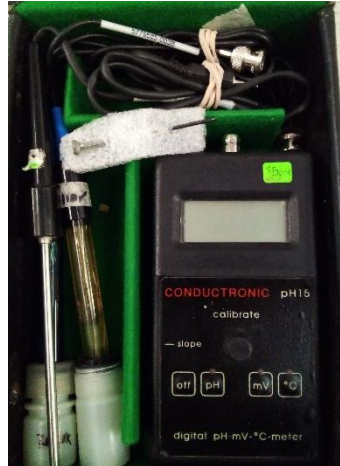
### CALIBRACIÓN DE EQUIPOS

#### Listado de equipos:

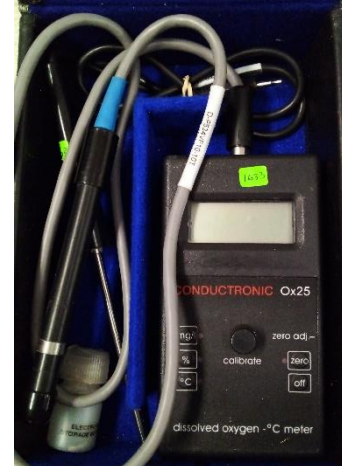
1. Medidor de pH- $\mu$ S- $^{\circ}$ C (Conductronic, modelo PC18): electrodos de pH, Conductividad eléctrica y Temperatura
2. Medidor de pH-mV- $^{\circ}$ C (Conductronic, modelo pH15): electrodos de pH, Potencial Redox y Temperatura
3. Medidor de OD- $^{\circ}$ C (Conductronic, modelo Ox25): electrodos de Oxígeno disuelto y Temperatura



Medidor pH- $\mu$ S- $^{\circ}$ C



Medidor pH-mV- $^{\circ}$ C



Medidor OD- $^{\circ}$ C

La calibración de estos equipos se realiza en laboratorio, en forma previa a su utilización en campo. **IMPORTANTE:** Antes y después de realizar cualquier medición, se debe enjuagar los electrodos con agua destilada y secarlos suavemente con papel toalla.

#### 1. Medidor de pH- $\mu$ S- $^{\circ}$ C

Enchufar los electrodos en la cabecera del equipo, en las entradas asignadas: T (temperatura), pH y C (Conductividad eléctrica, C.E.). Presionar cualquier botón para encender el equipo. Primero calibrar pH y luego C.E.; **NO** apagar el equipo después de medir pH.

- 1.1. **pH:** El extremo del electrodo de pH debe mantenerse dentro de cartucho con KCl cuando no esté siendo utilizado. Para calibrar el sensor de pH se utilizan soluciones buffers de pH conocido = 4, 7 y 10. Introducir los electrodos



de pH y T juntos en el buffer a medir y presionar el botón “pH”; luego de unos segundos girar la perilla de “pH calibrate” hasta alcanzar el valor estable de pH 4, 7 o 10, según corresponda. Para buffer 7 girar perilla, y luego al cambiar al buffer 4 o 10 (lavando sensor con agua destilada) se calibra con tornillo lateral. Si se espera un pH entre 7 y 4: primero calibrar 7 (con perilla) y luego 4 (con tornillo). Si se espera un pH entre 7 y 10, primero 7 (con perilla) y después 10 (tornillo).

**1.2. C.E.:** se debe asegurar que el electrodo quede sumergido mínimo 1 cm sobre los agujeros de ventilación de la celda; para ello, efectuar la medición en un tubo de centrifugo. Agitar suavemente la celda de arriba hacia abajo para desalojar las burbujas que pueden haber quedado atrapadas en la celda. La solución estándar tiene una conductividad de 14.13  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Antes de introducir los electrodos, agitar suavemente la solución. Introducir los electrodos de C.E y T juntos en la solución estándar. Para calibrar, se gira el tornillo ubicado en el costado izquierdo del equipo, hasta alcanzar el valor de 14.13 en pantalla.

## **2. Medidor de pH-mV-°C**

Enchufar los electrodos en la cabecera del equipo, en las entradas asignadas: T (temperatura) y V (Potencial óxido-reducción, ORP); electrodo de pH es sólo de respaldo. Para calibrar el sensor de ORP presionar el botón mV y utilizar el Estándar Redox que tiene un valor de 200 – 275 mV. Introducir los electrodos de ORP y T en la solución estándar y calibrar girando la perilla hasta obtener un valor entre 200 y 275 mV. **IMPORTANTE:** NO exponer nunca el Estándar Redox al sol.

## **3. Medidor de OD-°C**

Enchufar los electrodos en la cabecera del equipo, en las entradas asignadas: T (temperatura) y O (Oxígeno disuelto, O.D.). **IMPORTANTE:** NO desconectar el electrodo de O.D. ya que tarda mucho tiempo en calibrarse. El extremo del electrodo de O.D. debe mantenerse humedecido dentro del cartucho (esponja saturada con solución polarizadora) cuando no esté siendo utilizado. Para calibrar se utiliza el Estándar  $\text{O}_2$  de  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , sumergiendo el electrodo de OD y T a una profundidad mínima de 40 mm. La calibración debe considerar la altura sobre nivel del mar a la que se encuentra el equipo, para realizar corrección por efecto de altitud (ver tabla de corrección al interior del equipo).

### **Consideraciones generales:**

Todos los equipos deben ser calibrados cada vez que serán utilizados (sobre todo para medir pH; si las condiciones no cambian mucho, no es necesario calibrar el resto de los equipos). Caso especial: sensor de OD, que debe ser calibrado al aire libre en campo ajustando el % de oxígeno según valores de presión barométrica (elevación sobre nivel del mar), sin desconectar el electrodo (previamente calibrado en laboratorio por sumersión en solución libre de oxígeno).

No medir el pH con diferentes aparatos, utilizar siempre el mismo. Siempre se debe introducir el sensor de T junto con el sensor del parámetro que se va a medir.

## MEDICIÓN DE PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Antes de efectuar cualquier medición, se debe calibrar los equipos en laboratorio. En campo, antes de comenzar a medir, se deja correr el agua del pozo por unos 15 minutos aproximadamente. Posteriormente, se instala un sistema de mangueras para canalizar la salida del agua hacia la celda y el recipiente de buffers, los cuales se calibran para un pH determinado (entre 4 y 7 o entre 7 y 10, dependiendo del tipo de agua a muestrear). A continuación se procede a colocar los electrodos en las celdas de medición y se registran los valores entregados por los equipos. **IMPORTANTE:** todos los sensores y materiales deben lavarse con agua destilada antes y después de ser utilizados, y secados suavemente con papel toalla.



Los datos que se deben registrar en cada punto de medición son los siguientes:

### Datos generales:

- Coordenadas de ubicación con GPS
- Localidad
- Fecha
- Temperatura ambiente
- Duración del muestreo
- Uso del agua
- Tipo de bomba
- Tiempo de bombeo
- Caudal de extracción
- Diámetro de descarga
- Número de muestras

### Parámetros del agua subterránea:

- Temperatura
- pH
- Oxígeno disuelto
- Potencia de óxido-reducción (Eh)
- Sales totales disueltas (STD)
- Conductividad eléctrica (CE)

Los parámetros medidos se deben registrar cada 10-15 minutos, en una tabla como la siguiente:

Hora		12:30	12:40	12:50	13:00	13:10	13:20	13:30	13:40
T (°C)		26.9	26.7	26.5	27	27		27.1	27.1
Eh (mV)		231	232	219	219	218	217	222	221
O <sub>2</sub>	%	10	8	6	9	7	8	9	7
	mg/l	00.5	10.6	10.1	09.7	09.7	09.6	09.5	09.3
C.E. (μS/cm)		415	417	418	418	418	416	414	414
pH		7.17	7.24	7.23	7.26	7.27	7.27	7.27	7.35

## TITULACIÓN

Se mide al final, después del muestreo, cuando los parámetros se hayan estabilizado.

Objetivo: calcular la cantidad de carbonatos o bicarbonatos, por medio de método de GRAN, a partir de la cantidad de ácido agregado. Primero se mide si hay bicarbonatos (Fenolftaleína) y luego si hay carbonatos. La prueba de titulación se realiza en un matraz Erlenmeyer que debe ser enjuagado con agua destilada, y luego enjuagar 3 veces con agua de muestra, antes de depositar la muestra de agua **filtrada** en el matraz. Medir 100 ml de muestra en una probeta (previamente enjuagada con agua destilada) y verterla en el matraz. La prueba requiere agregar sustancias siguiendo las siguientes secuencias:

1. **Fenolftaleína** (4 gotas), para probar la existencia de carbonatos.
  - a) Si la solución se mantiene incolora, implica que  $\text{pH} < 8.3$  e inexistencia de carbonatos ( $\text{CO}_3$ ); por tanto, el constituyente de la alcalinidad es el bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ). Agregar indicador de color (Verde de Bromocresol).
  - b) Si la solución se vuelve rosa, implica que  $\text{pH} > 8.3$  y que el constituyente de la alcalinidad es el  $\text{CO}_3$ . Agregar  $\text{H}_2\text{SO}_4$  tomando lectura del volumen utilizado, hasta lograr nuevamente la transparencia de la muestra.
2. **Verde de Bromocresol** (6 gotas): el agua incolora se torna de color azul. Agregar  $\text{H}_2\text{SO}_4$  tomando lectura del volumen utilizado, hasta obtener un color verde (transición: color gris) o hasta perder el color que tenía.
3. **Ácido sulfúrico** ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ): añadir gota por gota utilizando el **titulador digital** (que cuantifica las gotas). A medida que se va añadiendo el  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , la muestra de agua va cambiando de color. El consumo de ácido indica la alcalinidad que mide el contenido de  $\text{CO}_3$  o  $\text{HCO}_3$ , según corresponda.

El matraz se debe mover suavemente en forma circular para homogenizar la mezcla; si se agita fuerte se forma  $\text{CO}_2$  y con ello se altera el resultado. No es necesario cambiar las mangueritas dosificadoras en cada punto de muestreo.

Medir pH con equipo desde el inicio de la prueba, sacar el sensor cada vez que se agrega el ácido hasta alcanzar un  $\text{pH} = 3,5$ . La cantidad de ácido utilizado (en gotas) y el pH correspondiente se registran en una tabla como la siguiente:

Nacido:  $V_{\text{muestra}}: 100 \text{ ml}$   $Ml = \# \text{digts} / 800$   
Vol. Ácido; 1.6 N titulación:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\text{H}_2\text{SO}_4$	0	10	30	40	60	77	80			
pH	7.26	6.89	6.66	6.51	6.07	4.41	3.59			

El color cambia cuando se acaban los carbonatos por el ácido agregado.

Se debe hacer la medición 2 veces para asegurar la certeza de la medición, si no se obtiene igual resultado, realizar nuevamente. Medir titulación al principio de las mediciones (en general) y luego al finalizar el muestro (2 veces cada uno) \*el agua puede variar su calidad al transcurrir tiempo de bombeo. Si ácido está muy concentrado (cambio de color en inicio de prueba), agregar doble de muestra de agua (nunca diluir el ácido).

## ANEXO 2

### PROTOCOLO DE TRABAJO DE CAMPO: MUESTREO DE AGUA SUBTERRÁNEA (ANÁLISIS QUÍMICO E ISOTÓPICO)

*Elaborado por Denisse De la Fuente Vivanco.*

*Gracias al conocimiento y experiencia de Flor Navarrete y José Joel Carrillo-Rivera.*

Una vez que los parámetros fisicoquímicos se encuentren estables (sin variación considerable), se procede a tomar muestras de agua subterránea. En cada punto de muestreo, se debe coleccionar 6 botellas de agua para los siguientes análisis (puede variar según los métodos analíticos de cada laboratorio):

- 1) Metales o Cationes
- 2) Aniones
- 3) Carbonatos/bicarbonatos
- 4) Isótopos
- 5) Nitratos (según indicaciones de cada laboratorio)
- 6) Respaldo

Cada 5 puntos de muestreo aproximadamente, se debe tomar un set de muestras duplicadas y enviarlas al laboratorio como un punto de muestreo diferente. De esta forma, se puede tener un control sobre la precisión de los resultados entregados por el laboratorio.

Las botellas para Metales deben estar previamente lavadas con ácido nítrico 10%. El resto de las botellas están lavadas con extran (jabón bajo en fosfatos).

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Los envases de polietileno y las contratapas se deben lavar y enjuagar con agua destilada y luego con agua a muestrear 3 veces antes de rellenar con muestra (agitar fuertemente).
2. Etiquetar los envases indicando número de muestra, lugar y fecha.
3. Las muestras de agua se extraen con la jeringa (60 ml) desde la celda de captación conectada a la salida del pozo, y se rellenan los envases.
4. Para cerrar los envases, se pone la contratapa y luego la tapa, teniendo la precaución de no dejar burbujas de aire al interior del envase (moviendo suavemente la botella con la contratapa sobrepuesta), ya que el CO<sub>2</sub> puede reaccionar con el agua modificando su composición.
5. Para analizar **metales**, la muestra de agua debe ser **filtrada**, luego se agita levemente, se añaden 10 gotas de HNO<sub>3</sub> (conservador) y se vuelve a agitar suavemente.
6. Para analizar **nitratos**, se debe agregar 13 gotas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (conservador).
7. Si el agua está turbia, se debe filtrar con filtro grande + embudo, y luego con filtro pequeño.
8. Una vez cerradas y rotuladas las muestras, se guardan en una hielera con elementos refrigerantes para mantener una temperatura óptima de conservación (4°C) mientras son transportadas al laboratorio. Resguardar las muestras en bolsas ziploc para evitar el desgaste de los rótulos al interior de la hielera.
9. Se debe tomar una **muestra de respaldo** (1 en cada punto de muestreo), en el caso de que el laboratorio llegara a requerir una mayor cantidad de muestra.

10. Con el fin de testear la validez de los resultados entregados por el laboratorio, se debe tomar un set de **muestras dobles o duplicadas** (1 de cada 5 puntos de muestreo) que se envían a laboratorio como muestras “normales” de forma tal que el investigador pueda comparar resultados de 2 muestras que debieran arrojar la misma composición.

#### Conservantes para muestras

- **Nitratos:** 13 gotas de  $H_2SO_4$  (ácido sulfúrico)
- **Metales:** 10 gotas de  $HNO_3$  (ácido nítrico de alta pureza)

\*preguntar al Laboratorio especificaciones para conservar las muestras, cada laboratorio tiene sus propios requerimientos de conservación.

#### Filtración de las muestras

Las muestras para análisis de **Metales (Cationes)** se deben filtrar con filtros de diámetro 0.45  $\mu m$  (los filtros se montan en el portafiltro en el mismo sentido en que se encuentran en la caja). Utilizar un filtro para cada muestra (cambiar después de filtrar). El resto de las muestras NO es necesario filtrarlas, a excepción de apreciarse turbidez del agua.

#### Cierre de las muestras

Para asegurar la muestra, se debe poner una contratapa (previamente lavada con agua de la muestra) antes de cerrar la tapa. Es muy importante asegurar que no queden burbujas de aire al interior de la botella, ya que el  $CO_2$  puede alterar los parámetros a analizar. Para ello se mueve la botella cuidadosamente para movilizar las burbujas hacia la abertura de la botella.

#### Rotulación de las muestras

Cada botella debe ser rotulada con la siguiente información:

- Nombre de la muestra
- Nombre del pozo
- Localidad
- Fecha
- Tipo de análisis: M, A, I, N o B, según corresponda

Se debe registrar los siguientes datos:

Muestra para:	Tipo de envase	Volumen (ml)	Conservador*	Filtrada?
Aniones (A)	<i>Polietileno</i>		<i>Ninguno</i>	
Metales (M)	<i>Polietileno</i>		<i>HNO<sub>3</sub></i>	
Nitratos (N)	<i>Polietileno</i>		<i>H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i>	
Carbonatos/bicarbonatos (C/B)	<i>Polietileno</i>		<i>Ninguno</i>	
Isótopos (I)	<i>Polietileno</i>		<i>Ninguno</i>	
Respaldo (R)	<i>Polietileno</i>		<i>Ninguno</i>	



## ANEXO 3

### PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA MEDIDOS EN CAMPO

*T (°C) agua: temperatura del agua subterránea, medida en grado celcius. Eh: potencial de óxido-reducción, medido en milivolts (mV). O.D.: oxígeno disuelto en el agua subterránea, medido en porcentaje (%) y en miligramos por litro (mg/l). C.E.: conductividad eléctrica del agua subterránea, medida en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . pH: pH del agua subterránea. T (°C) amb: temperatura ambiental, medida en grado celcius.*

#### P02: El Carmen (pozo)

Hora	10:04	10:15	10:25	10:36	10:46	10:56	11:05	11:16	
T (°C) agua	21.1	21.0	21.4	24.0	24.6	24.8	24.7	29.3	
Eh (mV)	184	213	218	220	219	222	221	219	
O.D.	%	72	68	66	69	69	67	66	61
	mg/l	6.0	6.1	6.0	6.1	6.1	6.0	6.1	5.3
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	566	541	561	559	559	558	557	554	
pH	6.59	6.57	6.57	6.59	6.53	5.52	6.5	6.54	
T (°C) amb	19.0	20.0	20.0	21.0	21.0	21.5	22.0	22.5	

#### P03: Los Molinos (pozo)

Hora	13:06	13:16	13:26	13:36	13:50	14:02	14:12	14:23	14:33	
T (°C) agua	21.3	21.9	22.3	22.4	24.0	24.4	24.4	24.1	23.8	
Eh (mV)	110	119	118	122	128	132	136	143	146	
O.D.	%	60	64	59	58	60	55	50	48	48
	mg/l	5.2	5.5	5.1	5.0	5.0	4.5	4.1	3.9	3.9
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	630	621	618	618	619	635	630	638	641	
pH	6.79	6.64	6.67	6.74	6.94	6.98	7.61	6.97	6.96	
T (°C) amb	24.5	25.0	25.0	25.5	28.0	28.0	29.0	29.0	29.5	

#### P04: La Ñipa (pozo)

Hora	10:28	10:42	10:52	11:02	11:12	11:22	11:32	11:42	
T (°C) agua	19.9	19.0	19.1	19.2	19.7	19.8	20.2	20.7	
Eh (mV)	142	154	153	151	152	153	168	162	
O.D.	%	54	53	54	54	54	51	56	54
	mg/l	4.9	4.8	4.9	4.9	4.9	4.6	5.0	4.9
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	224	233	236	236	232	229	226	227	
pH	6.69	6.78	6.79	6.81	6.83	6.91	6.87	7.02	
T (°C) amb	24.0	24.0	25.0	24.0	23.5	25.0	25.0	25.0	

#### P05 = P01: El Peñón (pozo)

Hora	13:08	13:18	13:28	13:38	13:52	14:05	14:16	14:28	14:40	14:52	
T (°C) agua	21.2	21.5	21.5	21.7	21.8	21.9	21.6	21.9	21.7	21.8	
Eh (mV)	155	160	162	166	168	174	177	174	176	177	
O.D.	%	72	71	66	59	59	58	55	57	58	59
	mg/l	6.3	6.2	5.8	5.2	5.2	5.0	4.8	5.8	5.0	5.1
C.E. ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	673	684	659	730	685	722	725	716	723	758	
pH	6.59	6.29	6.26	6.33	6.50	6.63	6.67	6.78	6.98	6.80	
T (°C) amb	31.5	32.0	32.0	32.0	32.0	32.5	33.0	33.0	33.0	33.5	

**P06: Calle Larga (pozo)**

Hora	19:06	19:16	19:28	19:38	19:49	19:59	20:09	20:20	20:30	
T (°C) agua	19.5	19.3	19.3	19.3	19.2	19.0	18.8	18.8	18.2	
Eh (mV)	38	47	42	41	39	36	39	23	20	
O.D.	%	66	68	68	70	67	68	62	64	67
	mg/l	6.0	6.2	6.2	6.4	6.2	6.3	5.6	6.0	6.3
C.E. (µS/cm)	417	150	150	146	156	135	338	309	105	
pH	6.42	6.41	6.48	6.55	6.69	6.85	6.83	6.75	6.68	
T (°C) amb	32.0	32.0	33.0	33.0	32.5	31.5	31.0	29.5	29.0	

**P07: Pedernal (manantial)**

Hora	10:43	10:54	11:05	11:15	11:25	11:36	11:45	11:56	12:06	
T (°C) agua	26.2	27.0	28.0	28.9	29.9	30.2	30.6	31.4	31.4	
Eh (mV)	128	137	140	143	144	146	149	154	155	
O.D.	%	97	99	98	101	91	93	97	101	95
	mg/l		7.6	7.5	7.6	6.7	6.7	6.9	7.2	6.7
C.E. (µS/cm)	376	374	368	364	343	357	354	344	357	
pH	7.80	7.73	7.66	7.66	7.71	7.56	7.51	7.54	7.63	

**P08: Chalaco (pozo)**

Hora	17:47	17:58	18:09	18:19	18:30	18:41	18:51		
T (°C) agua	22.2	21.8	21.6	21.9	22.6	23.2	23.7		
Eh (mV)	75	71	72	71	69	68	66		
O.D.	%	67	65	64	63	63	62	59	
	mg/l	5.7	5.6	5.5	5.4	5.4	5.2	4.9	
C.E. (µS/cm)	408	407	398	406	403	401	405		
pH	6.16	5.96	6.04	6.26	6.36	6.44	6.56		
T (°C) amb	27.5	28.0	29.0	29.0	28.5	28.5	28.0		

**P09: Chincolco (pozo)**

Hora	10:26	10:38	10:51	11:03	11:15	11:26	11:38	11:55	12:06
T (°C) agua	18.7	18.8	18.8	18.9	19.0	19.3	19.7	20.4	20.6
Eh (mV)	176	179	181	178	181	178	185	190	191
O.D.	%	44	46	45	45	45	45	44	45
	mg/l	4.0	4.2	4.2	4.2	4.1	4.1	4.0	3.9
C.E. (µS/cm)	480	478	483	482	481	478	477	481	483
pH	6.66	6.63	6.70	6.75	6.77	6.83	6.92	6.77	6.75
T (°C) amb	18.5	19.0	19.5	20.5	24.0	24.0	26.0	29.0	30.0

**P10: Río Tinto (pozo)**

Hora	18:55	19:05	19:15	19:25	19:35	19:46	19:56	20:06	
T (°C) agua	19.4	19.0	18.7	18.7	18.8	18.5	18.4	18.2	
Eh (mV)	130	142	141	148	164	161	160	122	
O.D.	%	55	54	53	55	54	57	57	54
	mg/l	5.0	4.9	4.8	5.0	4.5	5.2	5.3	5.0
C.E. (µS/cm)	665	665	663	666	667	662	664	668	
pH	6.30	6.28	6.31	6.36	6.41	6.43	6.57	6.64	
T (°C) amb	27.5	27.0	26.5	26.0	25.5	25.0	25.0	24.5	

**P11 = P12: Sta. Julia (pozo)**

Hora	9:01	9:12	9:22	9:32	9:42	9:53	10:03	10:13	10:24	10:34	
T (°C) agua	18.3	18.5	18.5	18.5	18.4	18.6	18.6	18.8	18.7	18.9	
Eh (mV)	150	159	162	169	172	173	173	178	178	166	
O.D.	%	77	74	70	71	68	68	67	65	88	82
	mg/l	7.0	6.7	6.4	6.5	6.2	6.2	6.1	5.9	8.0	7.4
C.E. (µS/cm)	527	552	518	524	521	517	516	508	507	486	
pH	6.13	6.25	6.32	6.38	6.43	6.48	6.50	6.55	6.61	6.66	
T (°C) amb	18.0	18.0	18.5	19.0	20.0	20.0	21.0	21.5	21.5	22.0	

**P13: Palquico (pozo)**

Hora	12:04	12:15	12:26	12:37	12:48	12:59	13:11
T (°C) agua	21.1	22.1	22.4	22.1	22.4	23.1	23.0
Eh (mV)	159	153	159	158	149	155	153
O.D.	%	146	124	139	139	125	122
	mg/l	12.6	10.1	11.7	11.7	10.4	9.9
C.E. (µS/cm)	581	628	613	615	615	618	618
pH	6.57	6.63	6.66	6.61	6.60	6.64	6.67
T (°C) amb	28.0	28.0	26.0	25.0	25.0	25.0	25.0

**P14: Las Palmas (pozo)**

Hora	15:20	15:31	15:42	15:53	16:03	16:13	16:26	16:37	16:49
T (°C) agua	27.1	27.4	22.9	22.0	21.9	21.9	21.8	21.7	21.6
Eh (mV)	138	142	153	155	156	158	158	159	159
O.D.	%	56	53	56	56	51	49	52	48
	mg/l	4.9	4.2	4.9	4.9	4.5	4.3	4.6	4.2
C.E. (µS/cm)	761	777	736	728	739	729	709	696	675
pH	6.13	6.16	6.30	6.28	6.22	6.28	6.70	6.54	6.48
T (°C) amb	35.0	35.0	35.5	35.5	36.0	36.0	37.0	38.0	40.0

**P15: Valle Los Olmos (Pozo)**

Hora	11:58	12:13	12:23	12:33	12:47
T (°C) agua	20.6	20.2	20.2	20.3	20.3
Eh (mV)	113	135	136	137	140
O.D.	%	58	64	74	66
	mg/l	5.2	5.8	6.7	6.0
C.E. (µS/cm)	433	446	450	448	447
pH	6.57	6.24	6.39	6.46	6.39
T (°C) amb	30.0	29.5	29.5	29.5	30.0

**P16: Los Comunes (pozo)**

Hora	14:48	14:58	15:09	15:19	15:29	15:40	15:50
T (°C) agua	21.3	21.3	31.3	21.5	21.4	21.6	21.9
Eh (mV)	1	-7	-7	-8	-6	-6	-5
O.D.	%	68	85	86	80	81	83
	mg/l	5.9	7.5	7.6	7.0	7.1	7.3
C.E. (µS/cm)	524	515	506	513	502	496	474
pH	7.10	6.93	6.94	6.86	6.90	6.94	6.79
T (°C) amb	35.0	35.0	35.0	35.0	35.5	36.0	36.0

# ANEXO 4

## RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICOS

### Componentes mayores

mg/L	LD	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.1	214.9	149	210.1	194.8	215.8	154.7	168.1	160.4	219.6	171.9	194.8	200.6	200.6	196.7	189.1	183.4
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.03	222.41	101.13	61.76	304.02	224.49	107.66	44.75	77.53	66.83	246.57	67.84	68.82	166.89	280.37	57.39	154.36
Cl	0.03	28.41	39.13	50.53	21.16	29.83	7.19	2.53	7.13	6.68	16.22	34.27	35.51	21.75	39.31	12.73	13.21
NO <sub>3</sub>	0.01	21.33	76.16	58.96	22.3	19.88	39.56	1.17	10.86	15.86	1.23	0.97	0.9	0.82	8.02	1.55	5.02
Na	5	43666	28082	47029	34162	42601	19868	13550	17280	23929	28169	40892	40743	25825	36277	19401	26244
K	30	1871	509	1586	1367	1807	850	154	667	988	977	1195	1153	892	1201	591	961
Ca	10	126499	62331	69791	123254	126604	67748	62308	60279	78147	105549	59185	59101	81817	110805	67597	89399
Mg	1	20997	29652	25308	33651	20736	16525	11097	15931	16411	22568	25917	23372	29850	38196	16146	16826

### Componentes menores y traza

µg/l	LD	P01	P02	P03	P04	P05	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
Li	1	1	<1	<1	<1	2	<1	<1	<1	<1	<1	2	2	2	1	<1	1
Be	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Al	2	28	<2	<2	5	24	<2	3	25	<2	8	<2	<2	3	<2	4	4
Si	10	14844	14812	21346	13935	13727	14093	10728	15247	16193	14528	20290	19805	13743	19557	15027	15316
Sc	1	3	3	4	3	3	3	2	3	3	3	5	4	3	4	3	3
Ti	0.1	2.7	2.6	3.7	2.5	2.6	2.4	1.9	3	2.7	2.7	3.7	3.4	2.3	3.3	2.6	2.8
V	0.1	6.8	3	19.2	2.8	6.5	2.5	1.8	3.7	7.3	3.1	12.3	11.8	3.9	4.2	4.9	0.3
Cr	0.5	0.6	<0.5	0.6	0.8	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
Mn	0.1	3.1	1.2	0.6	2.3	3.2	48.7	1.4	8.6	<0.1	2.7	0.4	0.4	1.1	1.1	0.3	155.1
Fe	10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	66	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	84
Co	0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.084	<0.005	0.018	<0.005	0.101	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.013	<0.005	<0.005	0.853
Ni	0.3	2.3	<0.3	6.4	<0.3	1.9	<0.3	8.1	3.7	<0.3	<0.3	4.7	4.4	23.6	0.6	<0.3	2.7
Cu	0.2	1.9	1.2	1.9	3	1.8	1.7	0.5	0.8	<0.2	1.1	1.8	1.1	5.3	2.6	<0.2	0.6
Zn	0.5	178.1	26.1	11.3	14.7	162.4	8.9	6.7	313.2	<0.5	92.7	9.7	9.5	67.1	8.4	11.6	59.6
Ga	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Ge	0.01	0.03	<0.01	0.08	0.01	0.03	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	0.03	0.03	<0.01	0.01	<0.01	0.04
As	0.03	1.48	0.38	1.11	1.3	1.26	1.24	4.31	1.95	3.16	0.94	0.95	0.9	0.21	0.2	1.7	2.31
Se	0.2	2	0.6	0.4	1.8	2.2	1	<0.2	1.1	0.8	1.8	0.6	0.9	0.6	1.3	0.9	0.7
Rb	0.005	0.953	0.368	0.245	0.639	0.844	0.599	0.194	0.428	0.298	0.326	0.25	0.272	0.501	0.426	0.221	1.068
Sr	0.04	549.01	137.99	258.68	546.14	542.84	274.58	264.04	229.42	373.62	528.59	241.54	239.86	323.58	386.06	297.73	431.67
Y	0.003	0.119	<0.003	<0.003	<0.003	0.12	<0.003	<0.003	0.235	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003	<0.003
Zr	0.01	0.05	<0.01	<0.01	<0.01	0.05	<0.01	<0.01	0.06	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.12
Nb	0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
Mo	0.1	0.8	0.8	14.6	1.4	0.8	1	0.6	0.8	0.5	1.5	3.9	3.2	5.2	7.2	1.1	2.1
Ag	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Cd	0.01	0.04	<0.01	0.03	<0.01	0.04	0.03	0.03	0.1	<0.01	0.03	0.04	<0.01	0.01	0.02	<0.01	<0.01
In	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Sn	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Sb	0.01	0.06	<0.01	<0.01	0.02	0.05	0.07	0.02	0.03	<0.01	0.03	<0.01	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	0.06
Te	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
Cs	0.001	0.014	0.003	<0.001	0.004	0.014	0.048	0.064	0.059	0.003	0.006	0.008	0.002	0.002	0.002	0.003	0.047
Ba	0.1	49.6	7.6	43.8	39.6	45.3	22.5	20.9	20.9	24.2	18.6	23	22.2	45.3	42.8	21.4	22.9
La	0.001	0.102	<0.001	<0.001	<0.001	0.1	<0.001	<0.001	0.194	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.001
Ce	0.001	0.103	<0.001	<0.001	0.005	0.1	<0.001	<0.001	0.136	<0.001	<0.001	0.031	0.031	<0.001	0.005	<0.001	0.025
Pr	0.001	0.015	<0.001	<0.001	<0.001	0.015	<0.001	<0.001	0.024	<0.001	<0.001	0.008	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Nd	0.001	0.068	<0.001	<0.001	<0.001	0.061	<0.001	<0.001	0.091	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.006	<0.001	<0.001
Sm	0.001	0.006	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.016	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Eu	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Gd	0.001	0.009	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.019	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.023	<0.001	<0.001
Tb	0.001	0.003	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.005	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Dy	0.001	0.015	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.032	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Ho	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.005	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Er	0.001	0.014	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.022	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Tm	0.001	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.003	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Yb	0.001	0.008	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.019	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Lu	0.001	0.005	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.011	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Hf	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Ta	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
W	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.08	0.09	<0.02	0.33	<0.02
Hg	0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
Tl	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Pb	0.01	0.85	<0.01	<0.01	<0.01	0.86	<0.01	<0.01	4.75	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Bi	0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
Th	0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
U	0.001	0.452	0.221	4.376	0.667	0.457	0.352	0.151	0.161	0.269	0.564	1.111	1.147	1.528	3.341	0.579	0.442
B	3	64	46	85	68	66	61	27	31	64	49	11	11	11			

## ANEXO 5

### Requisitos para agua potable (Norma Chilena Oficial 409/1.Of2005; INN, 2006)

#### Elementos esenciales

Elemento	Expresado como elementos totales	Límite máximo mg/L
Cobre	<i>Cu</i>	2,0
Cromo total	<i>Cr</i>	0,05
Fluoruro	$F^{-}$	1,5
Hierro	<i>Fe</i>	0,3
Manganeso	<i>Mn</i>	0,1
Magnesio	<i>Mg</i>	125,0
Selenio	<i>Se</i>	0,01
Zinc	<i>Zn</i>	3,0

#### Elementos o sustancias no esenciales

Elemento o sustancia	Expresado como elementos o sustancias totales	Límite máximo mg/L
Arsénico	<i>As</i>	0,01 <sup>1)</sup>
Cadmio	<i>Cd</i>	0,01
Cianuro	$CN^{-}$	0,05
Mercurio	<i>Hg</i>	0,001
Nitrato	$NO_3^{-}$	50
Nitrito	$NO_2^{-}$	3
Razón nitrato + nitrito	<sup>2)</sup>	1
Plomo	<i>Pb</i>	0,05

1) Con el informe previo de la Superintendencia de Servicios Sanitarios, la Autoridad Competente de salud podrá establecer el plazo en que se deberá alcanzar el límite máximo señalado para el arsénico por aquellos servicios de agua que al momento de entrar en vigencia esta norma lo sobrepasan. Este plazo no podrá superar los 10 años y se fijará considerando la infraestructura que se requiera implementar para ello, conforme al plan de contingencia que presente la respectiva empresa. En todo caso, y sujeto también a informe previo de la Superintendencia de Servicios Sanitarios, el tiempo que se conceda para alcanzar el límite de 0,03 mg/L no podrá superar los cinco años.

2) Suma de las razones entre la concentración medida de cada uno y su respectivo límite máximo.

## Estándares para Aguas de Regadío (Norma Chilena Oficial NCh1333.Of87; INN, 1999)

### Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego

Elemento	Unidad	Limite máximo
Aluminio (Al)	mg/l	5,00
Arsénico (As)	mg/l	0,10
Bario (Ba)	mg/l	4,00
Berilio (Be)	mg/l	0,10
Boro (B)	mg/l	0,75
Cadmio (Cd)	mg/l	0,010
Cianuro (CN)	mg/l	0,20
Cloruro (Cl)	mg/l	200,00
Cobalto (Co)	mg/l	0,050
Cobre (Cu)	mg/l	0,20
Cromo (Cr)	mg/l	0,10
Fluoruro (F)	mg/l	1,00
Hierro (Fe)	mg/l	5,00
Litio (Li)	mg/l	2,50
Litio (cítricos) (Li)	mg/l	0,075
Manganeso (Mn)	mg/l	0,20
Mercurio (Hg)	mg/l	0,001
Molibdeno (Mo)	mg/l	0,010
Niquel (Ni)	mg/l	0,20
Plata (Ag)	mg/l	0,20
Plomo (Pb)	mg/l	5,00
Selenio (Se)	mg/l	0,020
Sodio porcentual (Na)	%	35,00
Sulfato (So <sub>4</sub> =)	mg/l	250,00
Vanadio (V)	mg/l	0,10
Zinc (Zn)	mg/l	2,00



## ANEXO 6

### Catastro de Depósitos de Relaves (jales) en la comuna de Petorca

Base de datos del Servicio Nacional de Geología Minería (SERNAGEOMIN). Actualización: 10-08-2020.

Recuperado de <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>.

Empresa	Faena	Nombre instalación	Tipo instalación	Mena	Coordenadas UTM	Estado
Cia. Minera Can-can	Bronce de Petorca	Depósito de arenas	Tranque de relave	Oro	N 6436491.11 E 316721.346	Inactivo
Cia. Minera Can-can	Bronce de Petorca	Terrazas 2	Embalse	Cobre	N 6432828.3 E 314783.889	Inactivo
Cia. Minera Can-can	Bronce de Petorca	Terrazas 1	Tranque de relave	Oro	N 6432707.56 E 315230.151	Inactivo
Cia. Minera Can-can	Bronce de Petorca	El Durazno	Tranque de relave	Oro	N 6432612.31 E 315515.902	Inactivo
Asociación pirquineros Petorca	La vega 2	Minera La vega	Embalse	Cobre	N 6433386.63 E 323100.77	Inactivo
Sindicato pirquineros de Petorca	La vega	Minera La Vega	Embalse	Cobre	N 6433388.22 E 323091.246	Activo
Sindicato pirquineros de Petorca	La vega	Minera la vega	Embalse	Cobre	N 6433389.27 E 323148.396	Activo
Petronila Díaz	Petronila Díaz	Petronila Díaz	Tranque de relave	Oro	N 6429749.54 E 317788.886	Abandonado
Pats	Planta Pats	Planta Pats	Embalse	Oro	N 6431146.62 E 322955.98	Inactivo
Soc. Minera Gama	Planta Los Molles	Los molles 1	Tranque de relave	Oro-cobre	N 6430861.5 E 266215.281	Abandonado
Cia. Minera Hierro Viejo	Planta Hierro Viejo	Hierro Viejo 1	Tranque de relave	Cobre	N 6427005.43 E 310125.404	Abandonado
Cia. Minera Hierro Viejo	Planta Hierro Viejo	Hierro Viejo 2	Tranque de relave	Cobre	N 6426964.95 E 310069.048	Abandonado
Trapiches	3 tranques	3 tranques	Tranque de relave	Oro	N 6429448.22 E 316692.169	Inactivo
Minera Chincolco spa	Planta Chincolco	Manuel Fernández	Embalse	Cobre	N 6433485.28 E 323387.613	Activo
Antawara spa	Antawara	Antawara	Embalse	Cobre	N 6435678.74 E 323507.53	Activo
Minera La Merced e.i.r.l.	Planta beneficio de minerales	Embalse	Embalse	Cobre	N 6433693.24 E 323679.71	Inactivo
Comercial e inversiones Hasparren	Planta minera Black Colt	Zorrito	Embalse	Oro	N 6434122.33 E 323772.11	Inactivo
Comercial e inversiones Hasparren	Planta minera Black Colt	Los burros	Embalse	Oro	N 6433995.33 E 323763.643	Activo
Desconocido	Desconocido	S/I	Embalse	Cobre	N 6433550.37 E 323120.91	Inactivo
Desconocido	Planta Los Hoyos	Los Hoyos	Tranque de relave	Oro	N 6450764 E 327437.01	Inactivo
Desconocido	Planta Dulcinea	Dulcinea	Tranque de relave	Cobre	N 6442277.67 E 330319.13	Abandonado
Desconocido	Planta tránsito (Las Palmas)	Tranque 1-2-3-4	Tranque de relave	Cobre	N 6438408.57 E 297481.86	Abandonado