



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS**

**DIRECCIÓN REGIONAL DE AGUAS –
REGIÓN DE VALPARAÍSO**

PLAN ESTRATÉGICO DE GESTIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS LIGUA, PETORCA Y QUILIMARÍ

CUENCAS LIGUA Y PETORCA

INFORME FINAL

REALIZADO POR:

**UTP PLATAFORMA DE INVESTIGACIÓN EN
ECOHIDROLOGÍA Y ECOHIDRÁULICA LIMITADA
ECOHYD Y UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO UV**

S.I.T N°458

SANTIAGO, AGOSTO 2020

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

**Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Sr. Alfredo Moreno Charme**

**Director General de Aguas
Ingeniero Comercial Sr. Óscar Cristi Marfil**

**Jefe División Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Sr. Mauricio Lorca Miranda**

**Inspectora Fiscal
Ingeniera Civil Sra. Andrea Osses Vargas**

**Inspectores Fiscales Subrogantes
Ingeniero Civil Sr. Paul Dourojeanni Schlotfeldt
Ingeniero Civil Agrícola Sr. Héctor Neira Opazo**

**Especialista SIG
Cartógrafo Sr. Guillermo Tapia Molina**

**Asesor Modelación Integrada
Pedro Sanzana Cuevas**

**UTP PLATAFORMA DE INVESTIGACIÓN EN ECOHIDROLOGÍA Y
ECOHIDRÁULICA LIMITADA – ECOHYD Y UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO UV
(UTP ECOHYD-UV)**

**Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Sr. Matías Peredo Parada**

**Profesionales Equipo Especialistas
Bióloga Sra. Rafaela Retamal Díaz
Ingeniero Civil Sr. David Poblete López
Ingeniera Civil Sra. Diana Quevedo Tejada
Ingeniera Ambiental Sra. Anahí Ocampo Melgar
Ingeniera Civil Sra. Pilar Barría Sandoval
Ingeniero Civil Alonso Arriagada Monreal
Ingeniero Civil Sr. Oscar Melo Contreras**

**Profesionales Equipo Complementario
Biólogo Marino y Ambiental Sr. Shaw Nozaky Lacy
Ingeniero Civil Sr. Felipe Figueroa Barrientos
Ingeniero Civil Sr. Diego Soto Rodríguez
Socióloga Sra. Camila Donoso Acosta
Antropólogo Social Sr. Mauricio Cortez
Ingeniero Civil Sr. Juan Pablo Herane
Ingeniero Forestal Sr. Raúl Díaz Vasconcellos
Ingeniero Civil Sr. Felipe Aguilar Morales**

ESTRUCTURA DEL INFORME FINAL EMPASTE Y DOCUMENTOS ANEXOS

- **Informe final**
- **Resumen ejecutivo**
- **Anexo A - Abreviaturas**
- **Anexo B - Referencias**
- **Anexo C - Glosario**
- **Anexo D – Acciones del Plan**
- **Anexo E - Antecedentes recopilados**
- **Anexo F – Aspectos metodológicos del plan de cuenca**
- **Anexo G - Proyecto SIG**
- **Anexo H - Modelo hidrológico acoplado**
- **Anexo I – Detalles procesos participativos**
- **Anexo J – Descripción y diagnóstico de la cuenca**
- **Anexo K - Plan de acción**

ÍNDICE

Página

1. INTRODUCCIÓN	11
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo general	13
1.1.2 Objetivos específicos	14
2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA	15
2.1 DIMENSIÓN FÍSICA Y ECONÓMICA	17
2.1.1 Geomorfología	17
2.1.2 Geología e Hidrogeología	19
2.1.3 Edafología	22
2.1.4 Red de drenaje y acuíferos	24
2.1.5 División política-administrativa	26
2.1.6 Demografía	28
2.1.7 Actividad económica	29
2.1.7.1 Valor de la producción regional	29
2.1.7.2 Empleo regional por sector económico	29
2.1.7.3 Principales actividades económicas en la cuenca	30
2.2 Clima	30
2.2.1 Caracterización climática	30
2.2.2 Recursos hídricos	32
2.2.3 Valores extremos	33
2.2.4 Escenarios de cambio climático	35
2.3 Dimensión ambiental	36
2.3.1 Calidad del agua	36
2.3.2 Unidades Ecosistémicas	37
2.3.2.1 Ecosistemas terrestres	37
2.3.2.2 Ecosistemas acuáticos	39
2.3.2.3 Áreas silvestres protegidas	40
2.3.3 Glaciares	42
2.4 Infraestructura Hídrica	42
2.4.1 Obras Hidráulicas	42
2.4.2 Obras de conducción y distribución. Obras de Riego	44
2.4.3 Redes de monitoreo	46
2.5 Nuevas fuentes de agua	52
2.5.1 Acuíferos profundos	52
2.5.2 Recarga de acuíferos	52
2.5.3 Desalinización	52
2.5.4 Cosecha de aguas lluvia y captación de humedad en el aire	53
2.5.5 Uso aguas servidas tratadas	54

2.6	Gobernanza del agua a nivel de cuenca	54
2.6.1	Mapa de agentes	55
2.6.1.1	Institucionalidad pública de la gestión del agua	55
2.6.1.2	Organizaciones de Usuarios de Agua	58
2.6.1.3	Organizaciones sociales	61
2.6.1.4	Relación entre los distintos actores	62
3.	DEMANDA	66
3.1	Consumo Humano	66
3.1.1	Actual	68
3.1.2	Histórico	69
3.1.3	Proyectado	69
3.1.4	Eficiencia del uso	71
3.2	Demandas Ambientales	71
3.2.1	Demanda Evapotranspiración	72
3.2.2	Caudal ecológico	73
3.3	Demanda Agrícola	75
3.3.1	Demanda actual	75
3.3.2	Valores de Coeficientes de cultivos	77
3.3.3	Demanda Histórica	80
3.3.4	Demanda proyectada	81
3.3.5	Eficiencia del uso	81
3.4	Demanda de otros usos	83
4.	OFERTA HÍDRICA	84
4.1	Agua superficial	84
4.1.1	Capacidad física de la cuenca	85
4.1.1.1	Calidad de Aguas	86
4.1.1.2	Proyectada	90
4.1.2	Derechos concedidos en aguas superficiales	90
4.2	Agua subterránea	94
4.2.1	Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC)	94
4.2.2	Stock, recarga y calidad actual	98
4.2.3	Derechos concedidos en aguas subterráneas	103
5.	BALANCE DE AGUA	106
5.1	Modelo de simulación	106
5.1.1	Descripción del modelo elaborado	106
5.1.2	Situación actual	111
5.1.2.1	Balance hídrico	111
5.1.2.2	Balance hidrogeológico	113
5.1.3	Situación proyectada	114
5.1.3.1	Balance hídrico	114
5.1.3.2	Balance hidrogeológico	116
5.2	Brechas	117
5.2.1	Brechas en situación actual	117
5.2.2	Brechas proyectadas	121
5.2.3	Brechas de ecosistemas	121

5.2.4	Brechas de coordinación	122
5.2.5	Brechas de información	128
5.2.5.1	Brechas de información de monitoreo	128
5.2.5.2	Brechas de información de conocimiento	129
5.2.5.3	Brechas de acceso a la información	131
5.2.5.4	Brechas de información de capacidades	131
5.3	Sustentabilidad	131
5.3.1	Resultados	132
5.4	Indicadores hídricos de la cuenca	140
5.4.1	Indicadores bajo condición histórica	141
5.4.2	Indicadores bajo condición futura	142
5.5	Análisis de sensibilidad	143
5.5.1	Descripción de escenarios de simulación	143
5.5.2	Resultados obtenidos y comparación de escenarios	146
5.6	Mercado de aguas	150
5.6.1	Aspectos generales	150
5.6.2	Descripción de la dinámica del mercado de aguas en las cuencas de la Ligua y Petorca	150
6.	ACCIONES DEL PLAN	153
6.1	Gobernanza	154
6.2	Fortalecimiento de Organizaciones de Usuarios de Agua	157
6.3	Recuperación de Acuíferos	159
6.4	Nuevas fuentes de agua	161
6.5	Mejoras de eficiencia	164
6.6	Sistemas de Información	166
6.7	Capital humano	170
6.8	Medio Ambiente	172
7.	CARTERA DE INICIATIVAS	174
7.1	Impacto sobre la brecha	177
7.2	Beneficio percibido por los actores locales	178
7.3	Evaluación económica	179
7.4	Plazos de implementación de las acciones	182
7.5	Alternativas seleccionadas	186
7.6	Evaluación conjunta del Plan	189
7.6.1	Indicadores	189
7.6.2	Criterios de sustentabilidad	197
7.7	Líneas de acción	200
8.	IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN	202
8.1	Hitos de referencia en la implementación del Plan	202
8.2	Estrategia de implementación	203
8.2.1	Aspectos institucionales	204
8.2.2	Aspectos de cultura del Agua	205
8.2.2.1	Gobernanza y Gestión Integrada de Recursos Hídricos	205
8.2.2.2	Eficiencia en el uso del recurso	206
8.2.2.3	Sustentabilidad del recurso	206

8.2.3	Aspectos de financiamiento	206
9.	MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL PLAN	207
9.1	Plan de Monitoreo	208
9.1.1	Indicadores de déficit hídrico	208
9.1.2	Indicadores de gestión	208
9.1.3	Indicadores de información	209
9.1.4	Seguimiento	209
9.2	Mecanismos para el análisis y toma de decisiones	209
10.	BRECHAS E INSTANCIAS DE MEJORAS	209
10.1	Información y conocimiento de la cuenca	209
10.2	Implementación del modelo hidrológico acoplado	210
10.3	Efectividad de las iniciativas propuestas	210

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1-1. Mapa conceptual metodológico del Plan Estratégico de Gestión Hídrica en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.....	12
Figura 2-1. Área de estudio.....	16
Figura 2-2. Geomorfología de las cuencas Río Ligua y Río Petorca.....	18
Figura 2-3 Geología en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.	21
Figura 2-4 Edafología en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.	23
Figura 2-5. Red de drenaje y acuíferos de las cuencas Río Ligua y Río Petorca.	25
Figura 2-6 Comunas presentes en las cuencas de los ríos Ligua y Petorca.....	27
Figura 2-7 Distribución de la población urbana y rural en las cuencas de los ríos Ligua y Petorca	28
Figura 2-8 Proyección de crecimiento poblacional del 2002 al 2035 para las comunas de la Provincia de Petorca.....	29
Figura 2-9 Clasificación climática de Köppen-Geigger escala 1:1.500.000.	31
Figura 2-10 Climograma cuenca río La Ligua entre 1979 a 2016.	32
Figura 2-11 Climograma cuenca río Petorca, intervalo entre 1979 a 2016.	33
Figura 2-12 Media móvil de precipitaciones, estación DGA Alicahue.	34
Figura 2-13 Media móvil de precipitaciones, estación DGA Longotoma.....	34
Figura 2-14 Factores para la precipitación mensual.	35
Figura 2-15 Factores de sesgo para la temperatura mensual [°C].	36
Figura 2-16 Pisos vegetacionales presentes en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.....	38
Figura 2-17. Tipos de humedales y tipos de SP en cuencas La Ligua y Petorca.	41
Figura 2-18 Ubicación de los embalses proyectados en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.	44
Figura 2-19 Ubicación de canales de riego en las cuencas Ligua y Petorca.	45
Figura 2-20 Ubicación de las estaciones meteorológicas vigentes administradas por INIA y DMC	47
Figura 2-21. Ubicación de las estaciones fluviométricas presentes en las cuencas Río Ligua y Río Petorca	48
Figura 2-22 Ubicación de las estaciones meteorológicas presentes en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.	49
Figura 2-23. Ubicación de las estaciones de niveles de pozos presentes en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.	50
Figura 2-24. Ubicación de las estaciones de calidad de agua superficial y subterránea presentes en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.....	51
Figura 2-25 Mapa principales actores en las cuencas de Ligua y Petorca	57
Figura 2-26 Matriz influencia/interés actores en las cuencas de Ligua y Petorca.....	58
Figura 2-27 Estado de las OUA en las cuencas de Ligua y Petorca.....	59

Figura 2-28 Derechos de agua otorgados a Comunidades de Aguas Subterráneas en las cuencas de Ligua y Petorca.	60
Figura 2-29 Institucionalidad actual del agua en las cuencas de los ríos Ligua y Petorca y la relación entre los distintos actores	65
Figura 3-1 Esquema metodológica de determinación de las demandas de agua potable rural y urbana para la condición actual y proyectada.	66
Figura 3-2 Distribución espacial de los Servicios Sanitarios Rurales MOP en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.....	67
Figura 3-3 Evolución histórica de consumo de agua potable	69
Figura 3-4 Evolución histórica y proyectada de consumo de agua potable.	70
Figura 3-5 Relación porcentual de la evapotranspiración de vegetación silvestre respecto a los niveles de precipitación en la cuenca del río Ligua.	72
Figura 3-6 Relación porcentual de la evapotranspiración de vegetación silvestre respecto a los niveles de precipitación en la cuenca del río Petorca.	73
Figura 3-7 Caudal ecológico mensual, SHACs de las cuencas río La Ligua y Petorca.	74
Figura 3-8 Zona de riego modeladas por cultivos.	76
Figura 3-9 Demanda agrícola real para el año 2018 en las cuencas La Ligua y Petorca. .	77
Figura 3-10. Valores de coeficiente de cultivo "Kc" utilizados en la modelación WEAP-MODFLOW.	78
Figura 3-11. Evapotranspiración anual de cultivos, cuenca río La Ligua.....	79
Figura 3-12. Evapotranspiración anual de cultivos, cuenca río Petorca.....	80
Figura 3-13 Demanda agrícola real y potencial histórica en las cuencas La Ligua y Petorca.	81
Figura 3-14 Eficiencia de riego intrapredial, río La Ligua.	82
Figura 3-15 Eficiencia de riego intrapredial, río Petorca.	83
Figura 4-1. Curva de variación estacional, estación fluviométrica "Alicahue en Colliguay", cuenca río La Ligua. Intervalo 1979 -2018.	84
Figura 4-2. Curva de variación estacional, estación fluviométrica "Río Pedernal en Tejada" y "Río sobrante en Piñadero", cuenca río Petorca. Intervalo 1979 -2018.	85
Figura 4-3. Caudal natural en la cuenca del río La Ligua y río Petorca.....	86
Figura 4-4. Evaluación de la calidad de agua mediante diagrama piper en la (A) cuenca del río La Ligua y (B) cuenca del río Petorca.....	87
Figura 4-5 Distribución espacial de los derechos de agua superficiales en las cuencas Río ligua y Río Petorca.....	93
Figura 4-6 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) cuencas Ligua – Petorca.	95
Figura 4-7 Zonas de prohibición en las cuencas Río Ligua y Río Petorca	97
Figura 4-8 Recarga sistema Ligua - Petorca	98
Figura 4-9 Recarga cuenca Petorca	100
Figura 4-10 Recarga cuenca La Ligua.	101
Figura 4-11 Recarga por SHAC en cuenca Río Petorca.	102
Figura 4-12 Recarga por SHAC en cuenca Río Ligua.	103
Figura 4-13 Distribución espacial de los derechos de agua subterráneos en las cuencas Río ligua y Río Petorca	105

Figura 5-1 Topología entre modelos WEAP-MODFLOW y flujos de intercambio para cada paso de tiempo	107
Figura 5-2. Dirección de flujos que se tienen entre las distintas unidades de modelación de cada una de las cuencas de Ligua-Petorca.	108
Figura 5-3. Diagrama de flujo de acuíferos de WEAP que hace la interacción con MODFLOW en las cuencas del modelo Ligua-Petorca.	109
Figura 5-4. Indicador de eficiencia KGE en estaciones Fluviométricas y subcuencas VIC.	110
Figura 5-5. Indicador de eficiencia Sesgo en pozos monitoreados por DGA.	111
Figura 5-6 Balance Hídrico anual de la cuenca del Río Petorca.	112
Figura 5-7 Balance Hídrico anual de la cuenca del Río Ligua	113
Figura 5-8 Balance hídrico proyectado hasta el año 2060 para el rio Ligua basado en escenario CSIRO.....	115
Figura 5-9 Balance hídrico proyectado hasta el año 2060 para el rio Petorca basado en escenario CSIRO.....	116
Figura 5-10 Demanda insatisfecha para riego en las cuencas del rio Ligua y Petorca ...	118
Figura 5-11 Brecha para agua potable rural en las cuencas del río Ligua y Petorca.....	119
Figura 5-12 Brecha hídrica en las cuencas del río Ligua y Petorca en el periodo 2010-2019	120
Figura 5-13 Déficit hídrico medio proyectado para la década 2040-2050 en los ríos Ligua y Petorca considerando escenario MIROC	121
Figura 5-14 Diagrama de coordinación entre actores, actual y deseado para las cuencas de Ligua y Petorca	123
Figura 5-15 Mesas del agua vigentes en las cuencas de los ríos Ligua y Petorca.	124
Figura 5-16 Autoevaluación de las organizaciones de usuarios de agua en la Provincia de Petorca.	127
Figura 5-17 Transacciones de DAA en la cuenca de la Ligua reportada por estudios previos.....	152
Figura 5-18 Transacciones Transacciones de DAA en la cuenca del río Petorca reportada por estudios previos.....	152
Figura 7-1 Criterios considerados para la priorización de las actividades a implementar en el Plan Estratégico.	175
Figura 7-2 Distribución del impacto de reducción de la brecha en cada eje definido.....	178
Figura 7-3 Distribución de la aceptación por parte de actores locales de las acciones propuestas.	179
Figura 7-4 Metodología de obtención del CAPEX (Capital Expenditure) y OPEX (Operational Expenses).....	180
Figura 7-5 Distribución de los costos de implementación y operación de las acciones evaluadas en las cuencas del rio Ligua y Petorca.	181
Figura 7-6 Distribución de los costos (MU\$D) de las acciones.	182
Figura 7-7 Distribución de la priorización de acciones.	189
Figura 7-8 Esquema temporal de la simulación del PEGH para las cuencas de los ríos Ligua y Petorca	190
Figura 7-9 Variación de la brecha total al implementar el PEGH en la cuenca del río Ligua	192

Figura 7-10 Evolución temporal de la brecha agrícola bajo escenario histórico, futuro y con la implementación del Plan en la cuenca del río Ligua.....	193
Figura 7-11 Evolución temporal de la brecha de agua potable bajo escenario histórico, futuro y con la implementación del Plan en la cuenca del río Ligua.....	193
Figura 7-12 Variación de la brecha total al implementar el PEGH en la cuenca del río Petorca	194
Figura 7-13 Evolución temporal de la brecha agrícola bajo escenario histórico, futuro y con la implementación del Plan en la cuenca del río Petorca.....	195
Figura 7-14 Evolución temporal de la brecha de agua potable bajo escenario histórico, futuro y con la implementación del Plan en la cuenca del río Petorca.....	196
Figura 7-15 Satisfacción demanda agrícola subcuenca Estero Patagua (criterios CS3) .	199
Figura 7-16 Satisfacción demanda agrícola SHAC Río La Ligua Oriente (criterio CS3....	200
Figura 8-1 Línea de tiempo de implementación de las acciones y su prioridad de implementación.....	204
Figura 8-2 Distribución de los costos de implementación y operación del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de las cuencas Ligua y Petorca.....	207

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Tabla 2-1 Caudales asociados a OUA en las cuencas de Ligua y Petorca.	59
Tabla 3-1 Demanda hídrica actual de Consumo de agua potable por SHAC (Mm ³ /año), año 2019.....	68
Tabla 3-2 Demanda hídrica proyectada de consumo de agua potable rural y urbana por SHAC (Mm ³ /año), años 2030-2050.	71
Tabla 3-3 Determinación de las tasas de uso de agua anual para cada nodo de consumo minero en Ligua-Petorca.....	83
Tabla 4-1. Derechos de aprovechamiento de agua superficiales de las cuencas Ligua y Petorca.	91
Tabla 4-2 Recarga directa promedio decadal sistema Ligua - Petorca	98
Tabla 4-3 Recarga directa promedio decadal Petorca.....	99
Tabla 4-4 Recarga directa promedio decadal Ligua.....	100
Tabla 4-5 Derechos de aprovechamiento de agua subterráneos de las cuencas Ligua y Petorca.	104
Tabla 5-1. Balance hídrico subterráneo Cuenca río La Ligua, período histórico	113
Tabla 5-2. Balance hídrico subterráneo Cuenca río Petorca, período histórico	114
Tabla 5-3. Balance hídrico subterráneo, cuenca Río La Ligua (2020-2050)	116
Tabla 5-4. Balance hídrico subterráneo, cuenca Río Petorca (2020-2050)	117
Tabla 5-5 Evaluación comparativa de mesas del agua en la Provincia de Petorca.	125
Tabla 5-6 Carencia de cantidad de estaciones de monitoreo en las cuencas de los ríos Ligua y Petorca.	129
Tabla 5-7. Criterio de sustentabilidad 1, cuenca La Ligua	132
Tabla 5-8. Criterio de sustentabilidad 1, cuenca Petorca	133
Tabla 5-9. Caudales de afloramiento y recarga cuenca río La Ligua	135
Tabla 5-10. Caudales de afloramiento y recarga cuenca río Petorca	136
Tabla 5-11. Caudales de oferta y demanda río La Ligua	138
Tabla 5-12. Caudales de oferta y demanda río Petorca	139
Tabla 5-13 Indicadores de brecha, cobertura de la demanda y variación del acuífero para la condición histórica en la cuenca del río Ligua	141
Tabla 5-14 Indicadores de brecha, cobertura de la demanda y variación del acuífero para la condición histórica en la cuenca del río Petorca	141
Tabla 5-15 Indicadores de brecha, cobertura de la demanda y variación del acuífero para la condición futura en la cuenca del río Ligua	142
Tabla 5-16 Indicadores de brecha, cobertura de la demanda y variación del acuífero para la condición futura en la cuenca del río Petorca	142
Tabla 5-17 Escenarios generados para simulación de efectividad de las medidas.	144

Tabla 5-18 Escenarios base generados para simulación de efectividad de las medidas.	145
Tabla 5-19 Resultados de la simulación de los escenarios como promedio decadal 2040-2050 en las cuenca del río Ligua.....	147
Tabla 5-20 Resultados de la simulación de los escenarios como promedio decadal 2040-2050 en las cuenca del río Petorca.....	149
Tabla 5-21 Número y valor de las transacciones del mercado de aguas de las cuencas del río Ligua y Petorca, 2014-2018.	153
Tabla 6-1 Resumen de las acciones necesarias para disminuir las brechas identificadas sobre la gobernanza en los ríos Ligua y Petorca.....	156
Tabla 6-2 Resumen de las acciones necesarias para disminuir las brechas identificadas en las OUA en los ríos Ligua y Petorca.....	158
Tabla 6-3 Resumen de las acciones necesarias sobre la recuperación de acuíferos identificadas sobre la demanda insatisfecha en los ríos Ligua y Petorca.	160
Tabla 6-4 Resumen de las acciones necesarias sobre la incorporación de nuevas fuentes identificadas sobre la demanda insatisfecha en los ríos Ligua y Petorca.	162
Tabla 6-5 Resumen de las acciones necesarias sobre el aumento en la eficiencia de riego identificadas sobre la demanda insatisfecha en los ríos Ligua y Petorca.	165
Tabla 6-6 Resumen de las acciones identificadas sobre la carencia de información para la caracterización del recurso hídrico en los ríos Ligua y Petorca.	167
Tabla 6-7 Resumen de las acciones identificadas sobre la debilidades en capital humano asociadas a OUA en los ríos Ligua y Petorca.	171
Tabla 6-8 Resumen de las acciones necesarias para disminuir las brechas identificadas sobre las unidades ambientales y sus servicios ecosistémicos en la cuenca de los ríos Ligua y Petorca.	173
Tabla 7-1 Priorización de las acciones.	177
Tabla 7-2 Plazos de implementación de las acciones.	183
Tabla 7-3 Priorización de las acciones definidas.	186
Tabla 7-4 Promedio decadales de los indicadores del plan PEGH en los ríos Ligua y Petorca y su comparación con el escenario futuro e histórico.	191
Tabla 7-5 Cumplimiento de los criterios de sustentabilidad por SHAC aplicando el PEGH en las cuencas del Río Ligua y del Río Petorca	198
Tabla 8-1 Rol de las instituciones sectoriales y regionales en la implementación del Plan.	204

1. INTRODUCCIÓN

La Dirección General de Aguas (DGA) es el organismo del Estado de Chile que se encarga de planificar el desarrollo del recurso agua en las fuentes naturales, con el fin de formular recomendaciones para su aprovechamiento, promoviendo su gestión y administración en un marco de sustentabilidad, interés público y asignación y uso eficiente, tanto para el consumo humano, como la producción de bienes y servicios y la conservación del medio ambiente.

Actualmente, dicho contexto es complejo. Se combina la necesidad de información para apoyar una gestión integrada del agua a nivel de cuenca con una alta presión de uso sobre los recursos hídricos en sus diferentes formas y un clima cambiante con pronósticos poco alentadores a nivel mundial de acuerdo al *Intergubernamental Panel for Climate Change* (IPCC, 2014), que acentúan procesos como la megasequía que se vive en Chile desde 2010 (Núñez y Verbist, 2018).

Considerando lo anterior, la DGA inició un plan a nivel país para llevar a cabo el desarrollo de planes estratégicos de gestión hídrica para todas las cuencas del territorio nacional, priorizando la ejecución de estos según la alta presión de uso y la ubicación de la cuenca o cuencas en estudio en zonas afectadas por la crisis climática global y el efecto de la megasequía.

Es así como las cuencas Río Ligua y Río Petorca entró en proceso de ser estudiada desde una visión integral, a escala de cuenca y en un horizonte de tiempo de 30 años al futuro, que permita a los tomadores de decisiones gestionar el recurso hídrico de la cuenca considerando las necesidades de todos los actores relevantes.

El presente informe muestra el trabajo realizado para la elaboración del Plan Estratégico de Gestión de las cuencas Río Ligua y Río Petorca, buscando ser un referente para la Dirección General de Aguas al permitirle conocer la oferta, la demanda actual de agua, determinar un balance hídrico y sus proyecciones futuras.

Este plan consideró diversas actividades que interactuaron entre si, de tal forma que permitieron el diseño de un plan estratégico de gestión hídrica en la cuenca, PEGH *ad hoc* para la cuenca (ver Figura 1-1). Las principales actividades desarrolladas fueron:

1. Recopilación y sistematización de antecedentes.
2. Descripción de la cuenca.
3. Diagnóstico de la cuenca.
4. Modelación hidrológica integrada.
5. Participación ciudadana.
6. Plan de acción.
7. Proyecto de Sistema de Información Geográfica SIG.

Es así como se inició con la caracterización o descripción de la cuenca en ámbitos como aspectos físicos y geográficos, clima, recursos superficiales y subterráneos, infraestructura, calidad de agua y medio ambiente y gobernanza en institucionalidad.

A continuación, se llevará a cabo el diagnóstico de la cuenca a hoy día y a 30 años más, pudiendo determinar la brecha existente entre un estado ideal de la cuenca o para no perder el estado actual diagnosticado. Para el desarrollo del diagnóstico fue fundamental el desarrollo de las entrevistas, reuniones sectoriales y talleres de diagnóstico, actividades de Participación Ciudadana.



Figura 1-1. Mapa conceptual metodológico del Plan Estratégico de Gestión Hídrica en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.

Fuente: Elaboración propia a partir de los requerimientos planteados en las Bases Técnicas 1019-68-LQ19 (Resolución D.G.A. Exenta 1582, 213 de agosto de 2019).

De forma simultánea se desarrollaron la modelación superficial en la plataforma WEAP, la modelación hidrogeológica en MODFLOW, y la integración de ambos modelos; las actividades de participación ciudadana y la elaboración del sistema de información geográfica del PEGH.

Los productos obtenidos de la modelación son fundamentales para el PEGH ya que apoyaron en el análisis de las estrategias de desarrollo, con el fin de tomar las decisiones en función de la mejor información disponible permanentemente. Por su parte, las instancias de participación ciudadana fueron fundamentales en tanto nos acercaron al territorio y permitieron conocer desde la fuente las problemáticas locales tanto acerca del recurso hídrico como de gobernanza e institucionalidad. Finalmente, el sistema de información geográfica facilitó la presentación de la información territorial, su actualización, manipulación y modificaciones futuras, dando trazabilidad y permanencia al conocimiento generado a nivel espacial.

En conjunto, todas estas actividades dieron soporte al diseño del PEGH a 30 años, iniciando por la creación de un portafolio de acciones cuyo objetivo es cerrar las brechas identificadas en los ámbitos de coordinación, información y balance hídrico; priorizando estas en términos económicos, temporales y de impacto en la brecha y la definición de las instituciones y actores involucrados; y, finalmente, poniendo a disposición una hoja de ruta realizable y medible a corto, mediano y largo plazo.

Este PEGH está dirigido principalmente a la DGA, de acuerdo a las funciones otorgadas en el Art. 299 del DFL 1122 (29-Oct-1981, Ministerio de Justicia, Fija Texto del Código de Aguas), y a todas las instituciones del Estado de Chile vinculadas con el uso y gestión del recurso hídrico: Dirección de Obras Hidráulicas DOH, Ministerio de Medioambiente, Ministerio de Agricultura, Ministerio de Energía, Ministerio de Minería, Gobiernos Regionales, entre otras. Así mismo, se privilegia y potencia la participación de Organizaciones de Usuarios de Aguas, Empresas privadas, Sociedad Civil, y todos los usuarios finales en la generación de alianzas público-privadas conducentes a la gestión eficiente del agua y la adaptación de las diversas actividades de desarrollo socioeconómico y medioambiental al cambio climático para así poder satisfacer las necesidades actuales y de futuras generaciones.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Proponer un plan estratégico indicativo para las cuencas de los ríos Ligua y Petorca para que en su realidad se pueda conocer oferta y demanda actual de agua, establecer balance hídrico y sus proyecciones a 30 años, diagnosticar el estado de información, infraestructura e instituciones que toman decisiones respecto al recurso hídrico, y proponer cartera de acciones DGA y público-privado, que permitan suplir la demanda de agua y adaptación al cambio climático, con un portafolio de acciones que aseguren su abastecimiento en cantidad y calidad.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Conocer el estado actual de las cuencas Ligua y Petorca en cuanto a oferta, demanda, balance de agua y sus respectivas herramientas de cálculo (modelos), control de extracciones, calidad fisicoquímica de fuentes de agua superficiales y subterráneas, gobernanza y red hidrométrica superficial, subterránea de calidad, glaciología y nieves (Meteorología).
2. Construir o actualizar modelos de simulación hidrológicos, e integrarlos a nivel superficial-subterráneo
3. Definir acciones para restaurar condiciones de abastecimiento y calidad de las fuentes de agua potable rural y urbana, por tipo de usuario, tanto para fuentes superficiales como subterráneas
4. Diagnosticar estado de la calidad de agua de las fuentes superficiales y subterráneas. Definir acciones para proteger funciones ecosistémicas críticas relacionadas con los cuerpos de agua en el tiempo.
5. Diagnosticar el estado de infraestructura hidráulica actual y proponer acciones para mejorar el monitoreo de las aguas de la cuenca (superficial, subterráneo, de montaña y glaciares).
6. Identificar brechas entre la oferta y la demanda de agua en distintos escenarios de cambio climático, sequía e inundaciones, estableciendo un portafolio de acciones (estrategias de gestión) para reducirlas. Se deberá establecer un caso base y distintos escenarios para la evaluación.
7. Entregar estrategias para mejorar la toma de decisiones, mediante la utilización de modelos operativos de gestión, los cuales deben tener escenarios planificación a corto, mediano y largo plazo, y ser adaptativos en el tiempo.
8. Entregar estrategias para promover y revitalizar la alianza público-privada ay así incrementar cualitativamente la inversión requerida en infraestructura.

2. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA

En el presente capítulo se describen las principales características de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca, tanto a nivel geográfico, como de aspectos político-administrativos, demográficos y relativos a su actividad económica. Asimismo, se recopilan las principales obras de infraestructura en materia hídrica existentes en la cuenca, con el fin de disponer de una visión del estado de inversión actual en diferentes ámbitos (obras de riego, agua potable, extracciones, red hidrométrica de la DGA).

La cuenca del río Ligua se ubica en la región de Valparaíso, específicamente en la provincia de Petorca. Presenta como cuencas colindantes a la cuenca del río Petorca en el norte y a la cuenca del río Aconcagua en el sur. La superficie de la cuenca es de 1.980 km², mientras que la cuenca del río Petorca se ubica en la región de Valparaíso, específicamente en la provincia de Petorca. Presenta como cuencas colindantes a la cuenca del río Quilimarí por el norte y a la cuenca del río Ligua por el sur. La superficie de la cuenca total es de 1.988 km² (ver Figura 2-1).

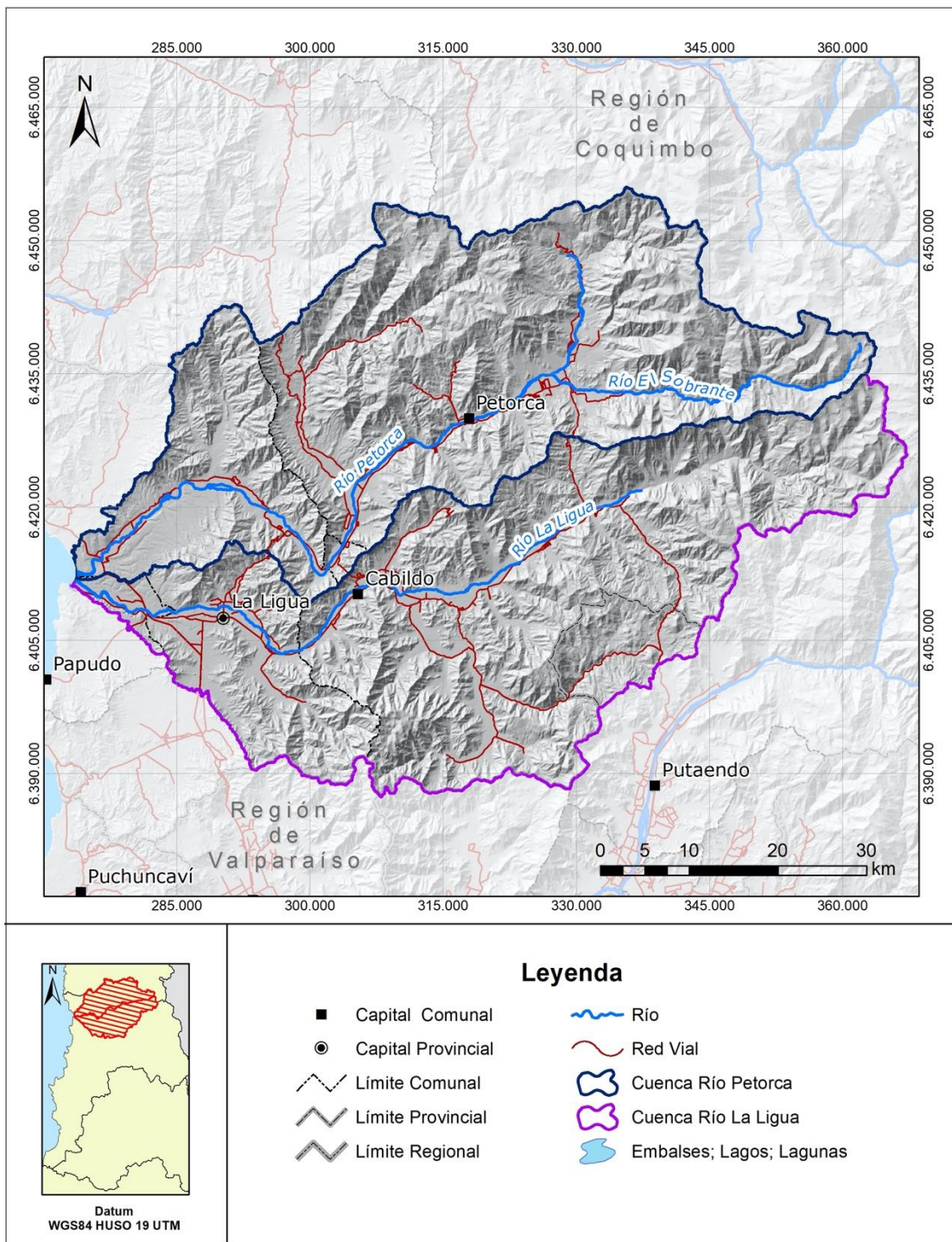


Figura 2-1. Área de estudio.

Fuente: Elaboración propia a partir de información contenida en la Mapoteca Digital DGA (DGA, 2019d).

2.1 DIMENSIÓN FÍSICA Y ECONÓMICA

El objetivo del presente acápite es tener una visión general de las cuencas Río Ligua y Río Petorca en términos geográficos, analizando aspectos relativos a su geomorfología y geología, suelos, drenaje, división político-administrativa y principales actividades económicas.

2.1.1 Geomorfología

La geomorfología característica de la cuenca Río Ligua corresponde a un territorio formado por dos unidades morfológicas fundamentales: las planicies litorales fluviales y marinas o ambas a la vez, en la costa; y una zona montañosa interior donde la cordillera de la Costa y cordillera de Los Andes que se unen desde el punto de vista del relieve (DGA, 2004).

Desde el punto de vista geomorfológico, existe una serie de elementos fisiográficos que podrían ser identificados claramente. Los grupos principales son: Cordillera de Los Andes, valles Transversales y cordillera de la Costa. El Río Ligua escurre por un valle típico de los valles transversales de la zona central.

El valle del Río Ligua desde su confluencia con el estero Alicahue, presenta llanuras fluviales reducidas y su cauce presenta un trazado de tipo recto. En este sector, se presentan las máximas elevaciones, entre las más importantes se encuentran: Cerro Paihuen (1.254 m.s.n.m.), Cerro Asta (1.295 m.s.n.m.) y Cerro Pangué (1.240 m.s.n.m.) por el norte y por el sur Monte Felipe (1.596 m.s.n.m.) y Cerro de la Ciudad (1.562 m.s.n.m.). Desde la localidad de Cabildo hasta su desembocadura en el mar, las llanuras fluviales son más amplias con respecto al tramo anterior y el tipo de trazado que presenta el río es de tipo anastomosado.

La cuenca Río Petorca presenta las mismas unidades morfológicas que la cuenca Río Ligua. El valle del Río Petorca tiene un trazado sinuoso debido a que dos ejes montañosos lo desvían primero hacia el sur y después hacia el norte, produciendo un notable aumento en la longitud de su recorrido; es un valle relativamente angosto, 500 a 2.000 m con bordes irregulares y limitado por altos cerros. El fondo del valle consta de lecho fluvial anastomosado (o trenzado) cubiertos de rodados y sedimentos finos; una o dos terrazas fluviales, provistas de un horizonte discontinuo de suelos situadas en uno o en ambos costados del lecho del río que a mayor altura ocupan gran parte del fondo. Los conos aluviales se sobrepone a las terrazas, aunque sus frentes están erosionados cuando alcanzan hasta 3 los canales de escurrimiento y por ello presentan taludes verticales (SIT RURAL, 2016).

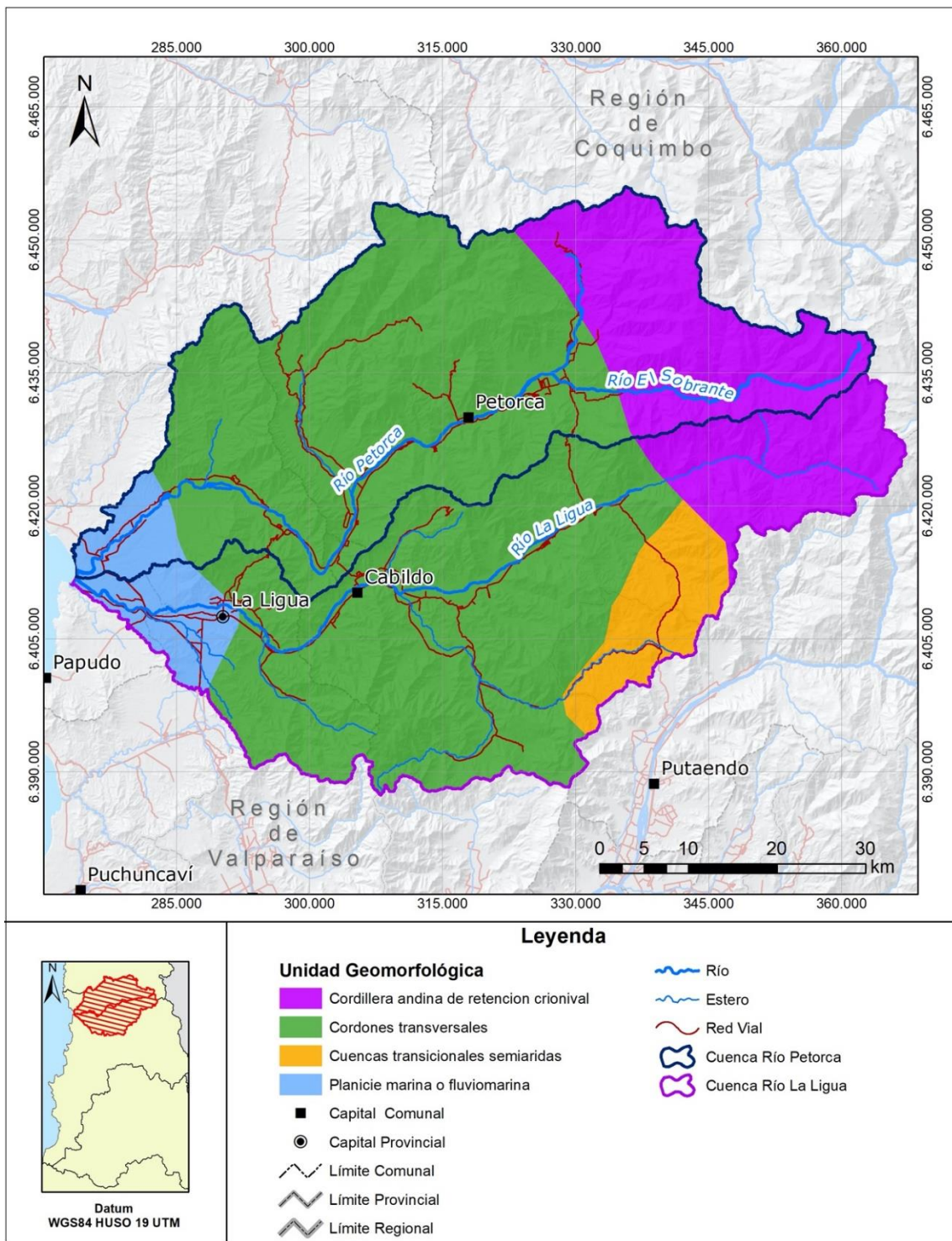


Figura 2-2. Geomorfología de las cuencas Río Ligua y Río Petorca.

Fuente: Elaborado a partir de cartografía disponible en el portal CEDEUS (2021).

2.1.2 Geología e Hidrogeología

En las cuencas Río Ligua y Río Petorca existen secuencias de unidades geológicas que siguen el patrón regional, definido por la existencia de unidades geológicas orientadas en el sentido norte- sur, formadas por rocas sedimentarias y volcánicas que tienen antigüedades desde el Triásico al Pleistoceno y que son atravesadas por los cauces superficiales, los que a su vez están rellenos por sedimentos aluviales, fluviales y eólicos (ver Figura 2-3).

En la cuenca Río Petorca, se pueden apreciar secuencias sedimentarias y volcánicas continentales, con escasas intercalaciones marinas: brechas sedimentarias y volcánicas, lavas andesíticas, ocoítas, conglomerados, areniscas, limolitas calcáreas lacustres con flora fósil; localmente calizas fosilíferas marinas en la base del cretácico inferior y superior (Ki2c) (SIT RURAL, 2016). A su vez, es posible observar la presencia de Dioritas y monzodioritas de piroxeno y hornblenda, granodioritas, monzogranitos de hornblenda y biotita. En sectores de la Cordillera de la Costa, pertenecientes al Cretácico Inferior alto-Cretácico Superior bajo (Kiag) (123-85 Ma). Secuencias y complejos volcánicos continentales: lavas y brechas basálticas a andesíticas, rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas, escasas intercalaciones sedimentarias, del Cretácico Inferior alto (Kia3)4.

En la cuenca Río Ligua, se encuentran las siguientes formaciones:

- a) Formación La Ligua: sobre el zócalo paleozoico, constituida por lavas de queratófiro, brechas y tobas con intercalaciones de pizarras, areniscas, cuarcitas y conglomerados de poco desarrollo, debidamente plegadas, definidas como formación La Ligua de edad Triásica Superior.
- b) Formación Quebrada El Pobre: formación de edad liásico inferior, consiste en areniscas y lutitas con delgadas intercalaciones de rocas volcánicas y areniscas cuarcíferas de transgresión en la base.
- c) Formación Ajial: compuesta por lava queratófírica con intercalaciones de tobas, brechas y rocas sedimentarias lenticulares.
- d) Formación Abanico: secuencia volcano-clástica continental de colores predominantes gris pardo y púrpura rojo grisáceo, que corresponde a una subdivisión de la formación Farellones de edad terciaria inferior.
- e) Formación Farellones: secuencia de rocas volcano-clásticas continentales, en la cual se distinguen tres miembros compuestos principalmente por brechas, tobas, lavas andesíticas, riolíticas y basálticas, conglomerados, tuquitas y lutitas.

Los sedimentos fluviales antiguos, en el sector visible de arenas y gravas gruesas, presentan rodados a menudo muy bien redondeados y con especial abundancia de clastos de rocas graníticas, aunque se ubican en prácticamente todas las unidades rocosas fundamentales reconocibles en la hoya hidrográfica.

Las gravas y arenas fluviales antiguas incluyen algunas capas, generalmente con mayor predominio de finos arcillosos, las cuales presentan una mayor descomposición por meteorización y que parecen revelar lapsos relativamente prolongados durante los cuales cesó o disminuyó el ritmo de acumulación, permitiendo un mejor desarrollo de las acciones de meteorización. Es probable que, en profundidades, por debajo del piso actual

del valle en estudio, las intercalaciones descompuestas sean más abundantes y ellas justificarían la menor calidad de las aguas de los acuíferos inferiores confinados.

Las rocas intrusivas constituyen varias unidades diferentes, denominadas Batolito de la Costa, Batolito Central y Batolito de la Cordillera de los Andes, que se han desarrollado durante el intervalo de tiempo comprendido entre el Paleozoico y el Terciario.

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 ambos valles, se presenta un acuífero libre que se desarrolla prácticamente a lo largo de estos. 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 (Figura 2-3)

En este sector de valles transversales, los terrenos agrícolas están constituidos por terrazas aluviales formados por sedimentos gruesos (bolones, gravas y arenas) procedentes de la erosión de la cadena andina. Su litología dominante es volcánica y plutónica intermedia, con participación menor de rocas sedimentarias. Los suelos presentan un mayor grado de desarrollo, clasificándose principalmente como Aridisoles y en la parte sur como Alfisoles.

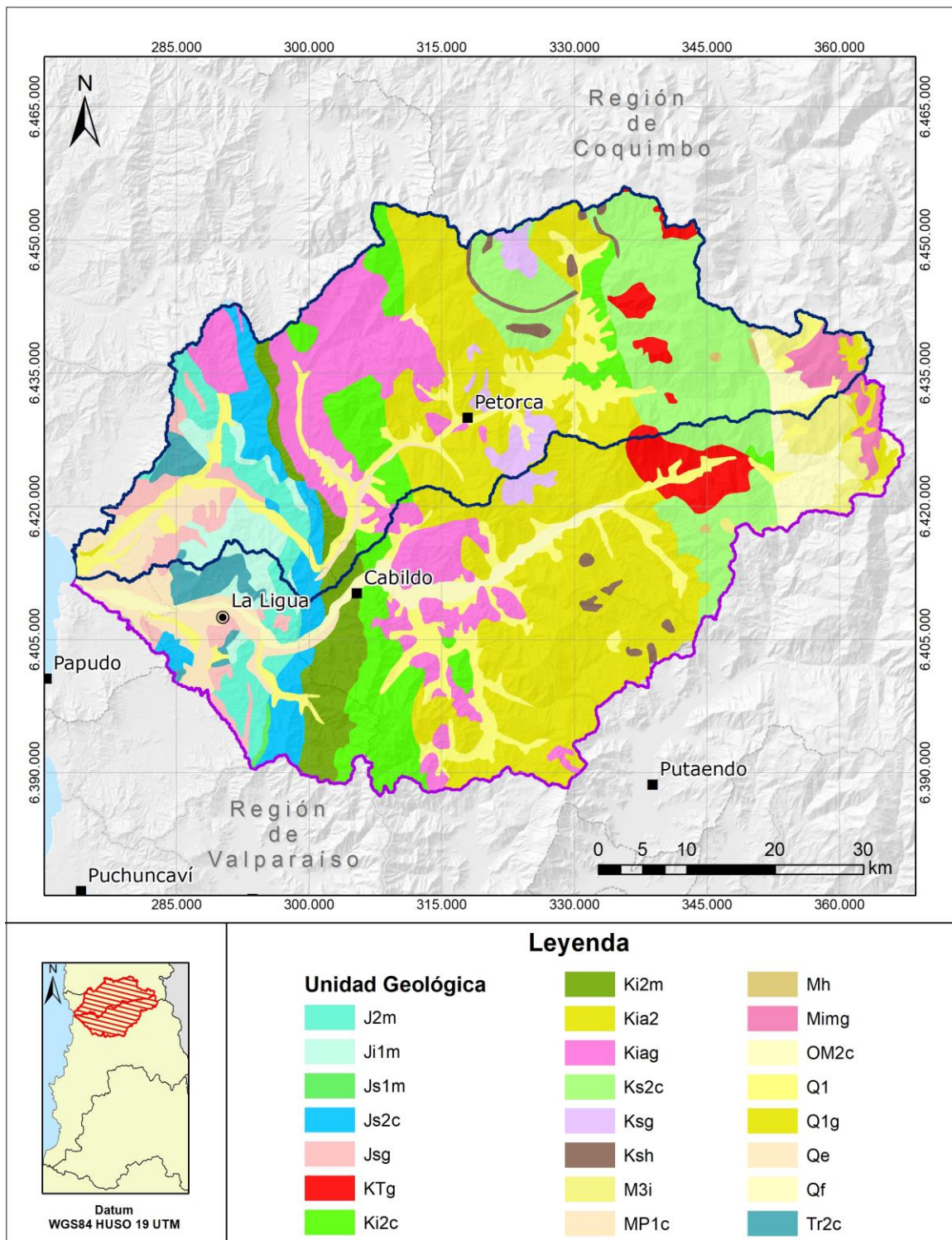


Figura 2-3 Geología en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.

Fuente: Elaboración propia a partir de información SERNAGEOMÍN (2020) y CNR (2016).

2.1.3 Edafología

Las unidades taxonómicas presentes en la cuenca del río La Ligua corresponden a suelos característicos de la Región de Valparaíso:

- Alfisoles: presentes en sectores costeros. Suelos con buen grado de evolución. En la vertiente poniente de la Cordillera de La Costa estos suelos se han desarrollado a partir de roca granítica, con un incremento en el contenido de arcilla en profundidad (DGA, 2004).
- Inceptisoles: situados preferentemente en la costa. Suelos de desarrollo incipiente que forman inclusiones en toda la región, generalmente derivados de terrazas marinas altas y de relieve plano a ligeramente inclinado, de colores pardo rojizos (DGA, 2004).
- Mollisoles: ubicados en el valle central. Suelos aluviales de desarrollo moderado. Sobre estos suelos se desarrolla gran parte de la agricultura de riego (DGA, 2004).

Los suelos de terrazas remanentes constituyen los mejores suelos de la zona y se caracterizan por presentar perfiles profundos, bien desarrollados, de texturas medias a finas, de buena estructura y planos suavemente ondulados. Dichas características, permiten un buen desarrollo radicular y buena retención de humedad, los que se encuentran localizados en la zona del valle (DGA, 2004).

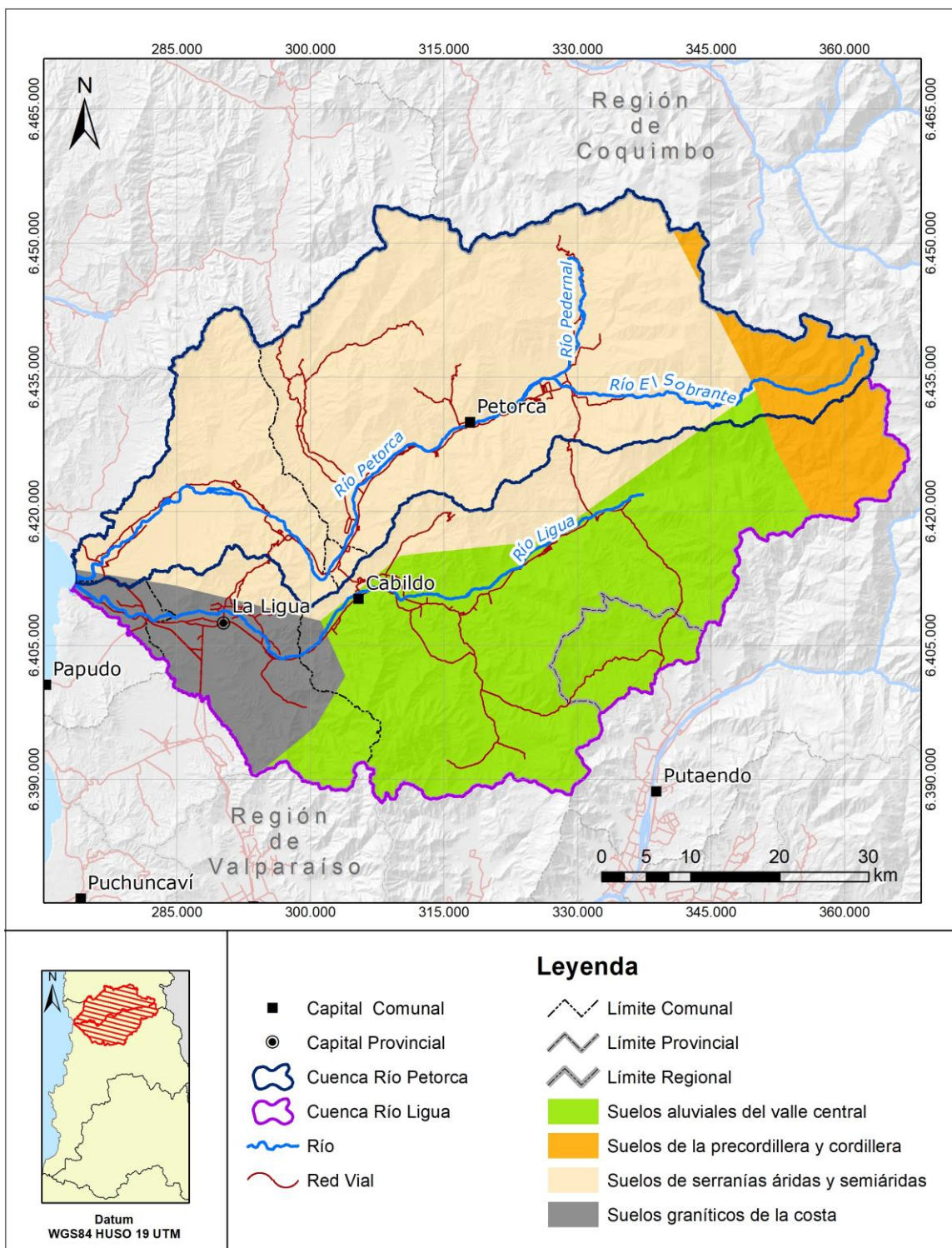


Figura 2-4 Edafología en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.

Fuente: Elaboración propia a partir de información SERNAGEOMÍN (2020) y CNR (2016).

2.1.4 Red de drenaje y acuíferos

La cuenca del río Ligua se ubica en la región de Valparaíso, específicamente en la provincia de Petorca. Presenta como cuencas colindantes a la cuenca del río Petorca en el norte y a la cuenca del río Aconcagua en el sur. La superficie de la cuenca es de 1.980 km² y se inicia a 4.100 m.s.n.m. con el Estero Alicahue (CNR, 2016).

El principal cauce es el río Ligua (longitud igual a 89,3 km) el cual recibe aportes del estero Los Ángeles, Alicahue y La Patagua principalmente. En esta cuenca se evidencia la presencia de la laguna Chepical ubicada en la parte alta de la cuenca (Figura 2-5).

La cuenca del río Petorca se ubica en la región de Valparaíso, específicamente en la provincia de Petorca. Presenta como cuencas colindantes a la cuenca del río Quilimarí por el norte y a la cuenca del río Ligua por el sur. La superficie de la cuenca total es de 1.988 km² y se inicia a 4.100 m.s.n.m. con el Estero del Sobrante (Figura 2-5).

El principal cauce de esta cuenca es el río Petorca (longitud de 101,1 km), el cual se forma de la unión de los ríos Sobrante y Pedernal. Además, el Río Petorca recibe aportes del Estero Las Palmas y el Estero Ossandón.

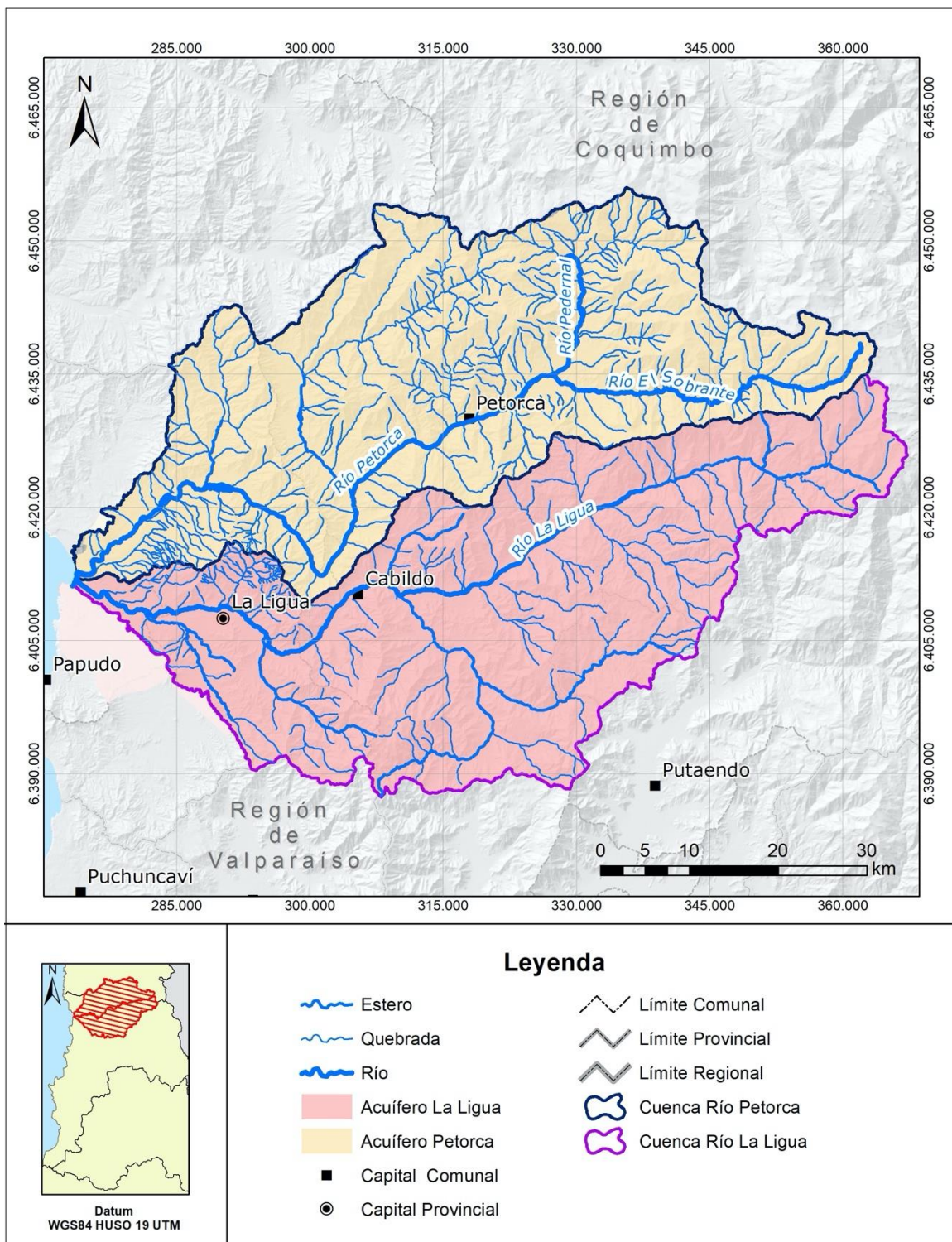


Figura 2-5. Red de drenaje y acuíferos de las cuencas Río Ligua y Río Petorca.

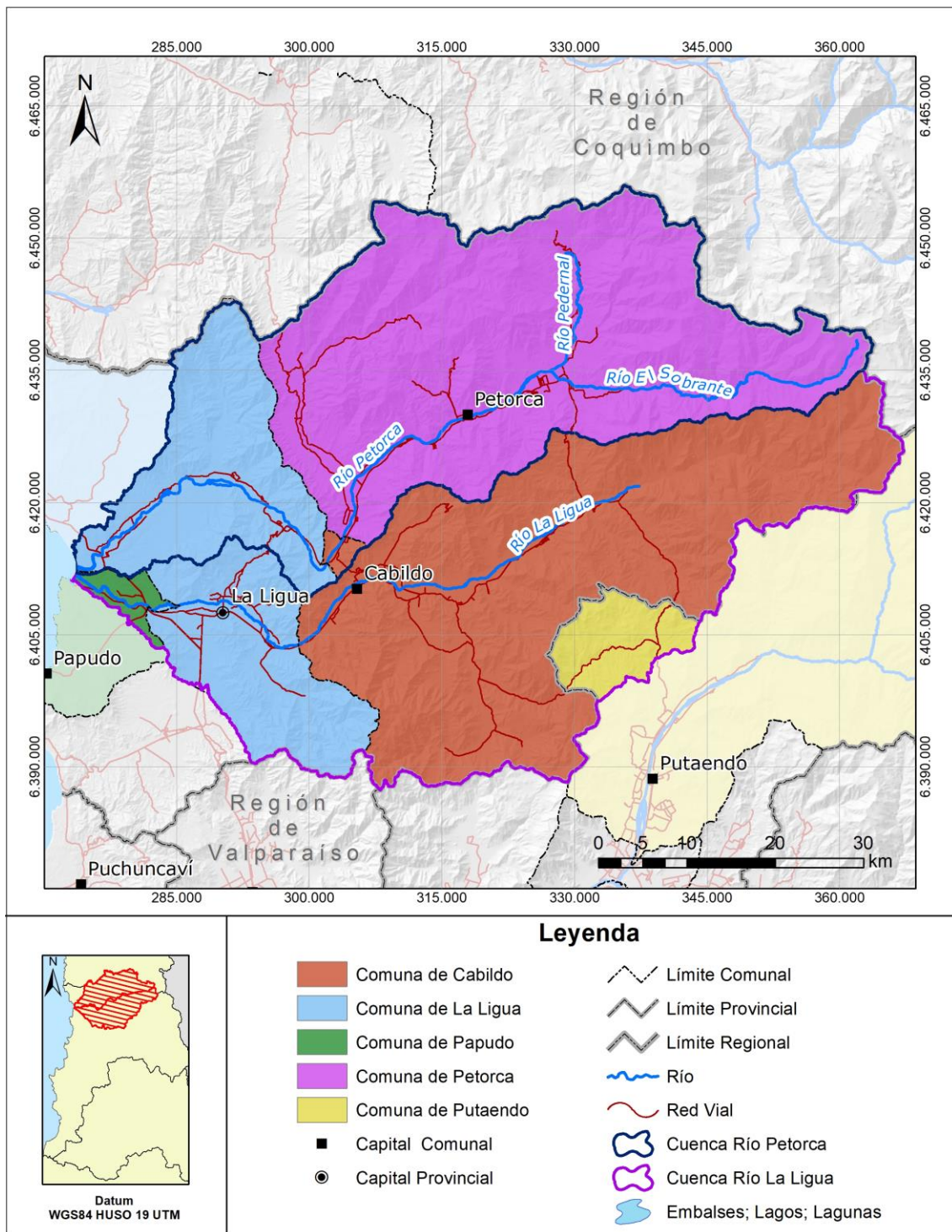
Fuente: Elaboración propia a partir de información geoespacializada proporcionada por la DGA en 2019.

2.1.5 División política-administrativa

Las cuencas hidrográficas de los ríos La Ligua y Petorca abarcan a la Provincia de Petorca y una pequeña parte de la provincia de San Felipe de Aconcagua en la V Región de Valparaíso (DGA 2015). La provincia de Petorca tiene una extensión de 4.588,9 km², con una altitud media de 1.161 m.s.n.m. Limita al norte con la provincia de Choapa (Región de Coquimbo), al sur con las provincias de Valparaíso, Quillota y San Felipe.

Dentro del área de estudio se encuentran las comunas La Ligua, Cabildo Petorca y Papudo, las que dependen de la Gobernación de Petorca ubicada en la ciudad de La Ligua; una pequeña fracción de la zona de estudio se encuentra en la comuna de Putaendo (Provincia de San Felipe) correspondiente a la parte alta del Estero Arrayán (Figura 2-6).

A nivel regional, la dependencia de tipo administrativa se encuentra en el Gobierno Regional de Valparaíso, ubicado en la ciudad de Valparaíso.



2.1.6 Demografía

De acuerdo a la información del censo poblacional y vivienda del año 2017 (INE, 2019), la población que habita en la Provincia de Petorca alcanzó los 78.299 habitantes, cuya distribución territorial se presenta en la Figura 2-7. Se observa que la comuna de La Ligua concentra la mayor cantidad de habitantes en zona urbana al interior de la cuenca (el 73,5% del total comunal), mientras que en la comuna de Putaendo se encuentra la mayor población habitante en zona rural (60% del total comunal); no obstante, el porcentaje de área contenida de la comuna de Putaendo que está dentro de la zona de estudio es inferior al 10% área comunal (mayores detalles se puede ver en Anexo J, Descripción y Diagnóstico. Capítulo 3)

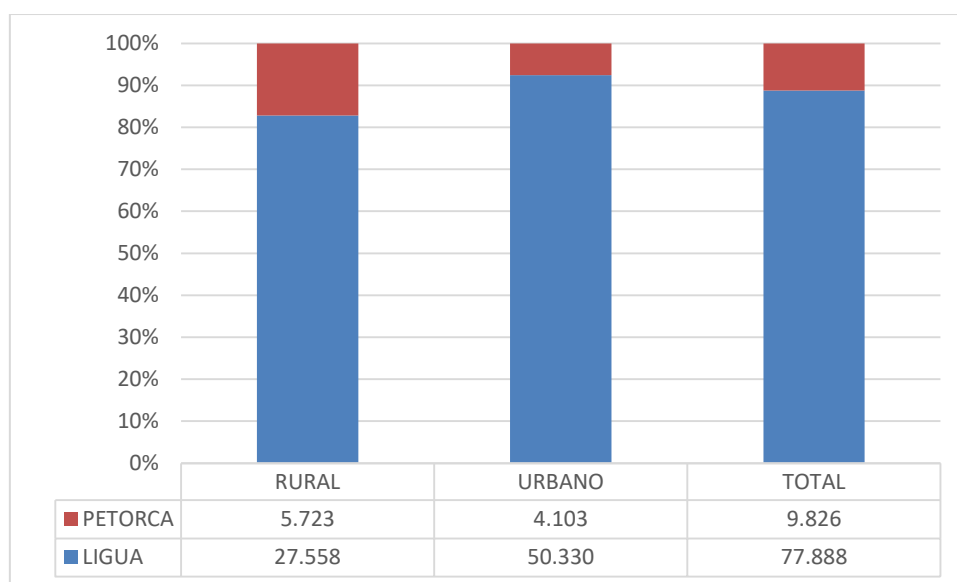


Figura 2-7 Distribución de la población urbana y rural en las cuencas de los ríos Ligua y Petorca

Fuente: elaboración propia a partir de información contenida en INE (2019).

La Provincia de Petorca ha aumentado levemente en población en las últimas décadas, de 70.610 en el censo del 2002 al 78.299 en el 2017. Las proyecciones de crecimiento poblacional 2002- 2035 del INE estiman un aumento porcentual de 57,46% para La Ligua, 46,51% para Papudo, 18,97% para Zapallar, 8,05% para Petorca y 4,96% para Cabildo. En la Figura 2-8 se muestran las proyecciones de crecimiento para las 5 comunas de la Provincia.

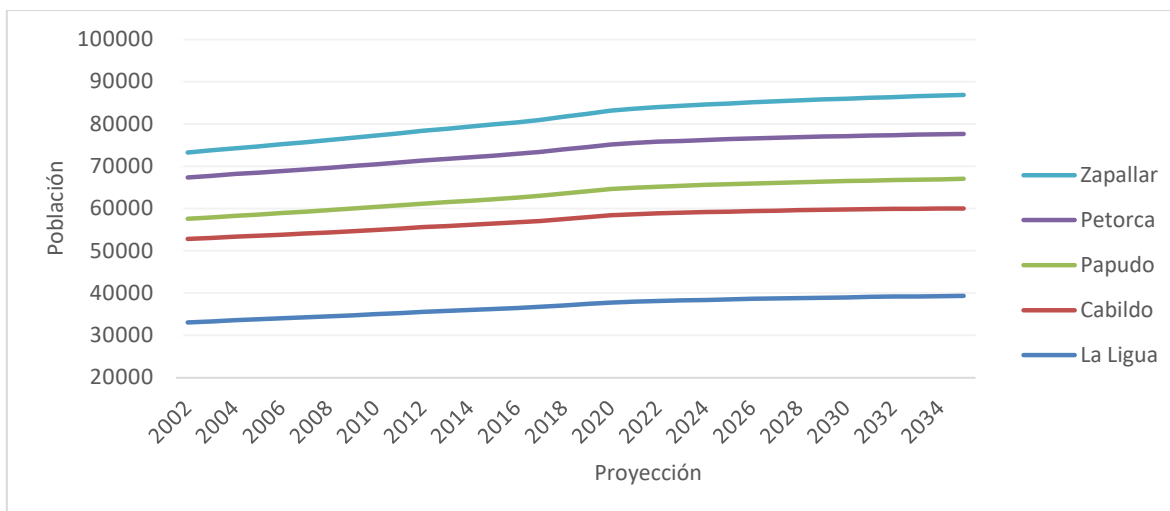


Figura 2-8 Proyección de crecimiento poblacional del 2002 al 2035 para las comunas de la Provincia de Petorca

Fuente: INE. Proyecciones de población. Cuadros estadísticos Población base.

2.1.7 Actividad económica

2.1.7.1 Valor de la producción regional

El PIB de la Región de Valparaíso consignado por el Banco Central de Chile (BC, 2019) al año 2019, corresponde a \$15.804 mil millones de pesos, representando el 8% a nivel nacional (\$196.379 mil millones de pesos). En 2019, términos sectoriales se destaca la actividad industria manufacturera (15,2%), seguida por servicios personales (13,9%) y transporte, información y comunicaciones (12%). Respecto al sector agropecuario-silvícola, este alcanza un 4,1% de participación. En último lugar se encuentra el sector pesquero, el cual corresponde al 0,1% del PIB regional. En el Anexo J.1.3 (hoja PIB NAC y PIB REG) se encuentran las gráficas de distribución del PIB por actividad económica y del registro del PIB regional total y regional sectorial.

2.1.7.2 Empleo regional por sector económico

Respecto al número de personas empleadas por rama de actividad económica, se obtiene que, entre los años 2013-2020, la mayor cantidad de trabajos se encuentra en la actividad de comercio, representando un 18,4% del total de personas ocupadas; le sigue las actividades enseñanza con un 9,4%, construcción con un 8,7%. Los sectores agropecuario-silvícola, industria manufacturera y minería representan un 7,6%, 7,9% y 3,2% de empleabilidad respectivamente (INE, 2021). En el Anexo J.1.1 (hoja EMPLEOS_INFO) se encuentra la tabla con el número de trabajadores ocupados por rama de actividad, entre los años 2013-2020 y el registro por trimestre móvil de ocupación según actividad obtenido de INE (2021).

2.1.7.3 Principales actividades económicas en la cuenca

De acuerdo a CNR (2016) la agricultura es la principal actividad productiva en la zona de estudio representando un 24% de empleabilidad seguido por un 23% en el sector de servicios sociales, comunales y personales. En extensión, alcanza un 12.050 ha en la cuenca del río Petorca y 15.860 ha en la cuenca del río La Ligua.

El sector minero sigue en importancia siendo el cobre y oro la explotación predominante. Del Atlas Faenas Mineras (SERNAGEOMIN, 2012) se contabilizan 650 faenas presentes en la provincia de Petorca.

2.2 Clima

2.2.1 Caracterización climática

Según la clasificación de Köppen (Figura 2-9) modificada, la comuna de Petorca, se inscribe mayoritariamente en el tipo climático BSKs, Semiárido Templado con lluvias invernales. Con un pequeño sector, franja intermedia, incluido en el tipo Csb, Templado cálido con lluvias invernales, culminando en el extremo oriental con los tipos Csc, Templado frío con lluvias invernales y ETH, tundra por efectos de altura (SIT RURAL, 2016).

Las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca poseen un clima de tipo Seco Estepárico, cuyas variables están definidas por su altura con respecto al nivel del mar y la influencia marina proveniente del interior de los valles, caracterizándose por la escasa humedad atmosférica, cielos despejados y alta luminosidad, fuerte oscilación térmica diaria y temperatura media anual de 12° y precipitaciones medias anuales, alrededor de 250 mm/año.

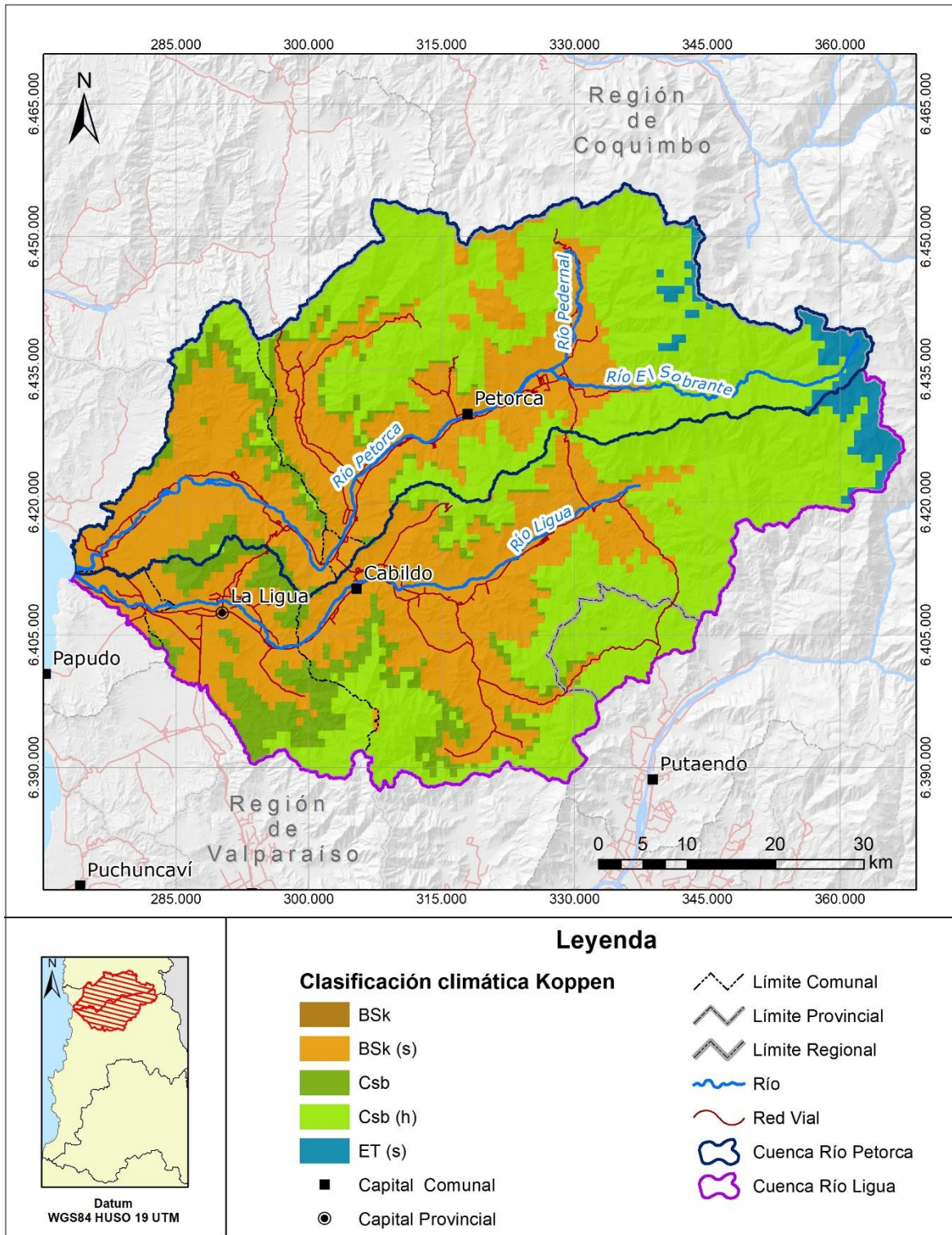


Figura 2-9 Clasificación climática de Köppen-Geiger escala 1:1.500.000.

Fuente: Elaboración propia a partir de información IDE (2020).

2.2.2 Recursos hídricos

Las condiciones climáticas de las cuencas de Río Petorca y Río La Ligua se definen como semiáridas, con fuerte desarrollo productivo basado en la utilización del recurso hídrico. A su vez, los caudales en la parte alta de las 2 cuencas presentan un régimen mixto (nivo-pluvial) que definen el aprovechamiento de agua en ciertos periodos del año.

A continuación, en la Figura 2-10 y Figura 2-11 se presenta el climograma para Ligua y Petorca, respectivamente. Cabe mencionar que los datos utilizados corresponden a series promediadas para toda la cuenca desde el año 1979 al 2016, información extraída del balance hídrico nacional del año 2019.

Finalmente se destaca que la evapotranspiración potencial del sector centro de las cuencas es de 1.300 mm/año y en los sectores altos alcanza los 1.600 mm/año. (Atlas Agroclimático, 2017).

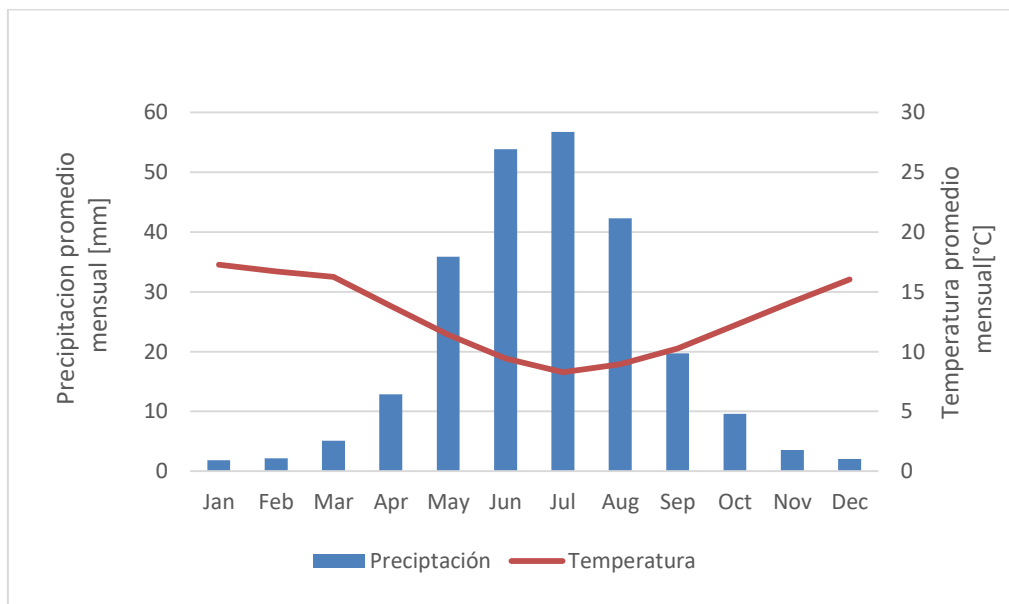


Figura 2-10 Climograma cuenca río La Ligua entre 1979 a 2016.

Fuente: elaboración propia a partir de información DGA (2017a).

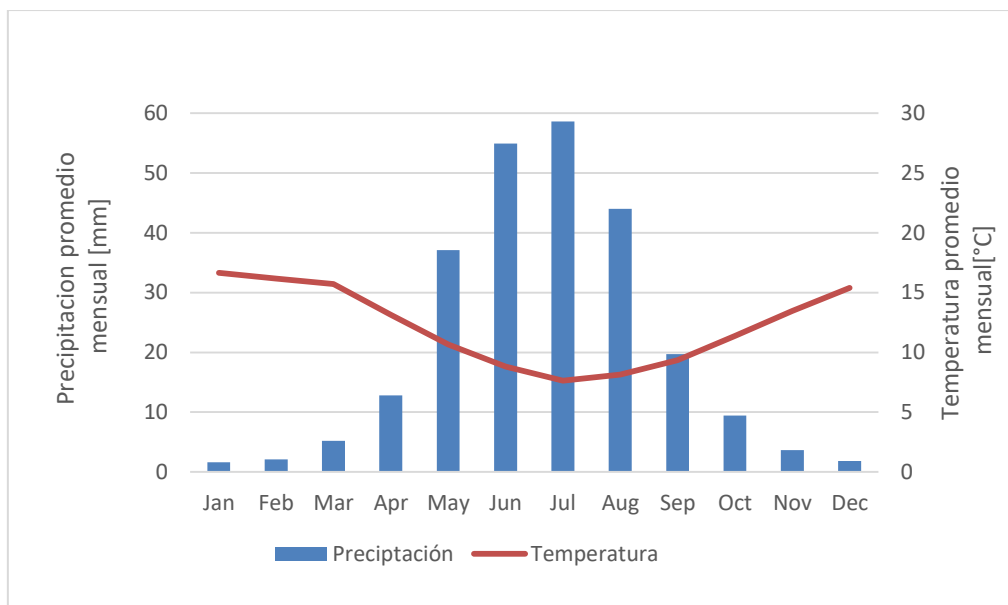


Figura 2-11 Climograma cuenca río Petorca, intervalo entre 1979 a 2016.

Fuente: elaboración propia a partir de información DGA (2017a).

2.2.3 Valores extremos

Cabe señalar que el suceso de eventos extremos como son las olas de calor, sequías, inundaciones e incendios forestales están conectados con el clima y sus impactos generan alteraciones a los ecosistemas, producción de alimentos, suministro de agua, daños a la infraestructura (incluyendo infraestructuras para el riego, salud y bien estar humano (CNR, 2016).

De acuerdo a lo señalado por el MMA (2014), dentro de los eventos extremos se ha encontrado un marcado aumento en la probabilidad de eventos de sequía considerado, especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XXI (como referencia se señala la ocurrencia de más de 10 veces en 30 años). No obstante, se ha identificado el aumento de eventos de precipitaciones de alta intensidad asociada a temperaturas elevadas. Una temperatura atmosférica elevada provoca una elevación de la isoterma cero, aumentando así el riesgo de inundaciones, crecidas violentas de los caudales y aluviones.

Con respecto a los eventos climáticos extremos y como estos han afectado la cantidad de agua presente en la cuenca. Utilizando las series de precipitación generados por el Balance Hídrico Nacional del año 2019, se registra una disminución del 22% en los últimos 10 años del promedio de precipitaciones anuales, (disminuyó a 0.75 mm de un promedio anual histórico de 0.96 mm). A continuación, en las Figura 2-12 y Figura 2-13 se presenta la variación de la precipitación en el tiempo para la estación de Alicahue (parte alta de la cuenca río Ligua) y la estación de Longotoma (parte baja de la cuenca río Petorca), respectivamente.

Por otro lado, el promedio de caudales medios anuales para las 2 cuencas (años de análisis 1979 y 2018) se indicó un caudal de 3,02 [m³/s]; 1,72 [m³/s] (10 últimos años) y 1,26 [m³/s] (5 últimos años).

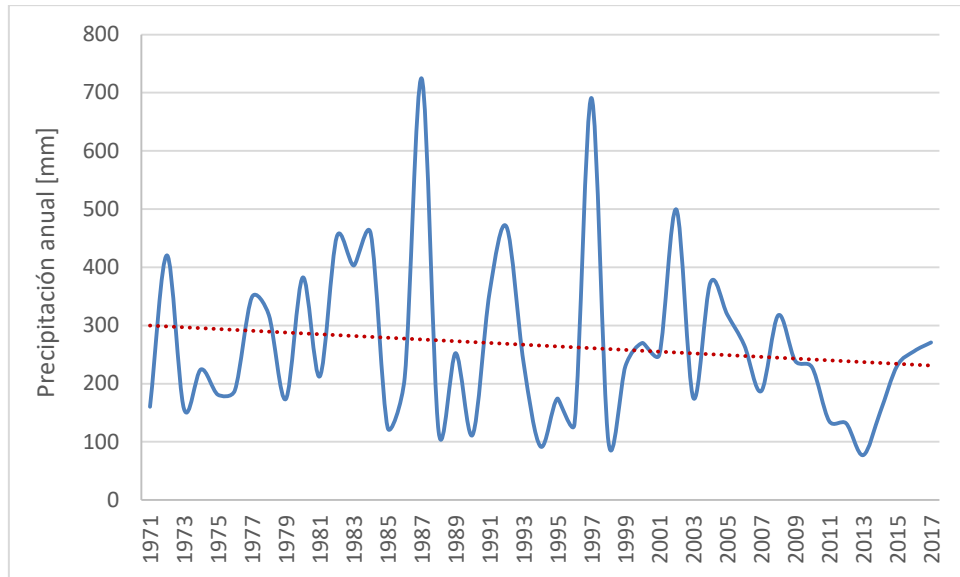


Figura 2-12 Media móvil de precipitaciones, estación DGA Alicahue.

Fuente: Elaboración propia.

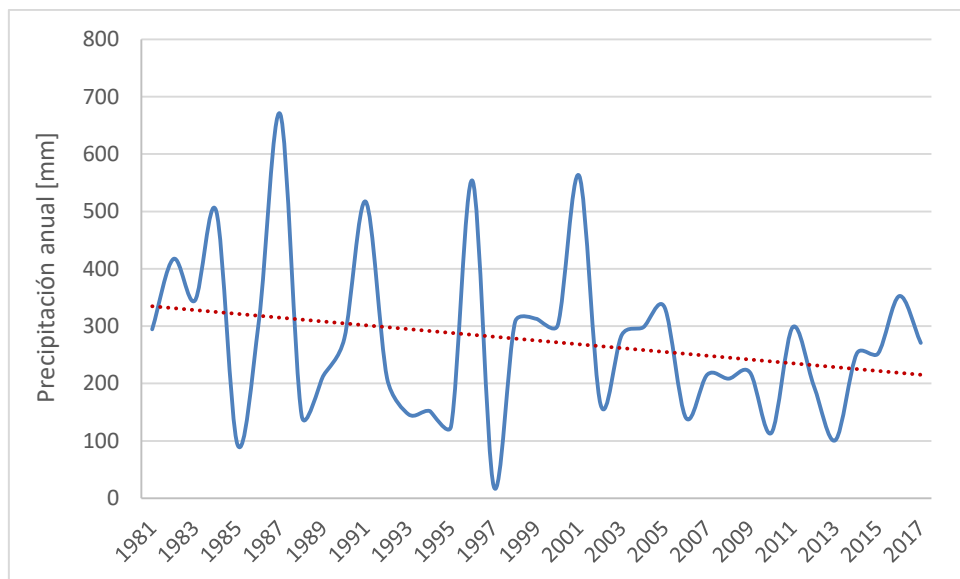


Figura 2-13 Media móvil de precipitaciones, estación DGA Longotoma.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.4 Escenarios de cambio climático

La selección de los modelos de circulación general (MCG) para el estudio se enmarca dentro de la metodología empleada en la actualización del Balance Hídrico Nacional (DGA, 2017a) El detalle de la metodología aplicada se expone en el "Anexo F, Aspectos metodológicos", acápite 1.2.

A continuación, en la Figura 2-14 se muestran el factor de cambio porcentual para la precipitación (usando como base la estación Ligua en Longotoma), mientras que en la Figura 2-15 se presenta el sesgo para la temperatura (usando como base la estación Los Cóndores). En el caso de las precipitaciones, estos factores mensuales multiplican a las precipitaciones usadas en cada unidad de modelación hidrológica y en las temperaturas, los factores de sesgo se suman a las temperaturas para la modelación, de manera que se genera una modelación histórica, pero con variaciones climáticas de acuerdo a los factores y meses.

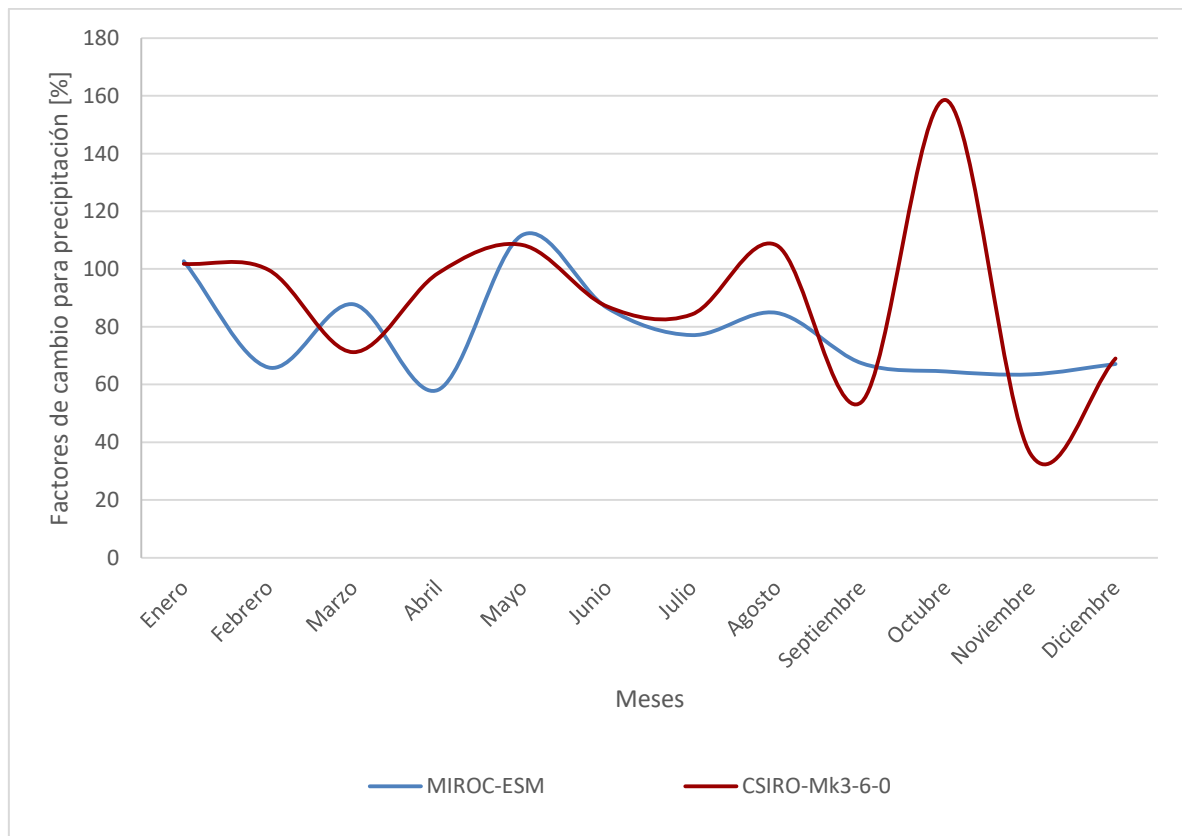


Figura 2-14 Factores para la precipitación mensual.

Fuente: Elaboración propia a partir de (DGA, 2017a).

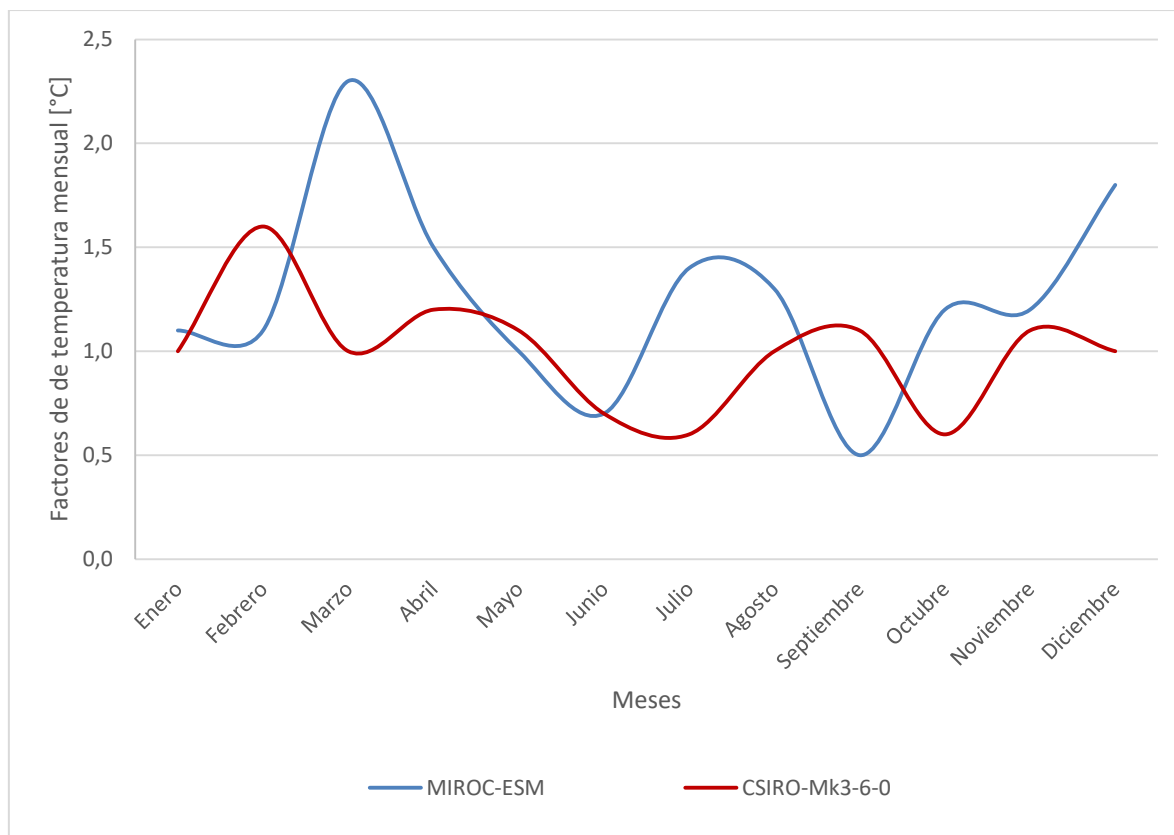


Figura 2-15 Factores de sesgo para la temperatura mensual [°C].

Fuente: elaboración propia a partir de (DGA, 2017a).

En términos generales, para ambas cuencas se aprecia que el cambio climático presenta una disminución anual en la precipitación del orden del 20%, siendo más drástica en los meses de septiembre a diciembre, lo cual coincide con la época de riego. Para la temperatura el aumento promedio es en torno a 1°C.

2.3 Dimensión ambiental

2.3.1 Calidad del agua

De acuerdo a una revisión bibliográfica, se realizó una caracterización histórica de la calidad del agua superficial y subterránea de las cuencas de los ríos Ligua y Petorca.

Los ríos Petorca y Ligua presentan una condición casi idéntica en términos de la calidad de sus aguas. Se caracterizan en toda su extensión por bajos niveles de salinidad, con predominancia de los bicarbonatos por sobre los cloruros, bajas conductividades eléctricas, y bajos niveles de elementos metálicos. Dentro de éstos últimos, el más abundante en términos relativos es el boro, aunque se encuentra por debajo de los límites recomendados para el uso del agua en riego. (DGA, 1994)

Particularmente, en el río Ligua, los sectores: alto, medio y bajo de la cuenca presentan aguas del tipo bicarbonatado cálcico (DGA, 2017b), superando el nivel máximo de

Molibdeno Total y Mercurio Total en la parte media y baja de la cuenca. Los afloramientos de napas subterráneas por sobre las aguas superficiales en la zona baja explica el enriquecimiento de sólidos disueltos, metales en solución y la conductividad (DGA, 2004).

En el río Petorca, los sectores alto y medio presentan aguas de composición bicarbonatada cálcica y con composición bicarbonato en el sector bajo (DGA, 2017b), superando el nivel máximo de Molibdeno Total y Mercurio Total en la parte alta y media de la cuenca. Los afloramientos de napas subterráneas por sobre las aguas superficiales en la zona baja explica el enriquecimiento de sólidos disueltos, metales en solución y la conductividad (DGA, 2004).

La conductividad eléctrica (CE) de las aguas de la cuenca La Ligua en el Río Alicahue y Río Ligua en cercano Quinquimo se determinó tenían un comportamiento similar, con un ascenso de los niveles de CE a partir del año 2008. En comparación, en la cuenca Petorca, la conductividad en el Río Sobrante y Río Petorca en Longotoma (512000-1) presentan un comportamiento similar, con un mantenimiento relativamente estable durante el periodo.

2.3.2 Unidades Ecosistémicas

2.3.2.1 Ecosistemas terrestres

La "Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile", de Federico Luebert y Patricio Pliscoff (2006), en la que combina variables bioclimáticas y de altitud con las formaciones vegetacionales, la composición florística y la fisionomía de la vegetación permite distinguir **6 formaciones** y **11 pisos vegetacionales** en la cuenca del río Ligua, al igual que en la cuenca del río Petorca (Figura 2-16). Dichas formaciones presentan un gradiente este-oeste siguiendo el gradiente altitudinal de las cuencas.

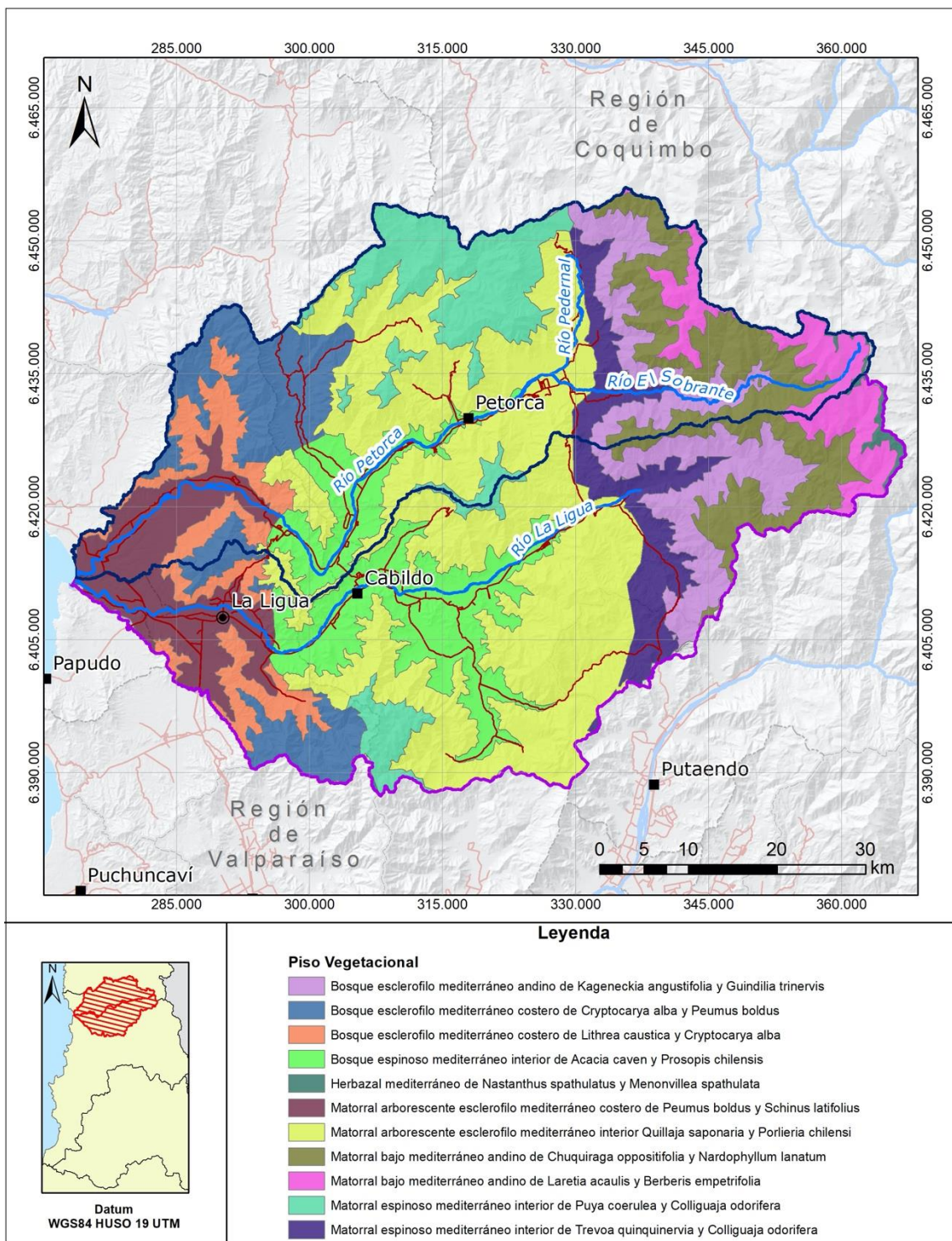


Figura 2-16 Pisos vegetacionales presentes en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.

Fuente: Elaboración propia a partir de Luebert & Plissock (2006).

En la cuenca del río La Ligua y río Petorca las formaciones tipo son: herbazal de altitud y matorral bajo de altitud (zona alta), bosque espinoso (en el valle cercano al río principal) y matorral arborescente (desembocadura del río). Descripciones más profusas sobre la flora y vegetación de estas cuencas se encuentran en estudios realizados por DGA (2004), CNR (2016).

A modo de caracterización faunística se indican algunas especies identificadas en el Inventario Nacional de Especies. Estas especies han sido identificadas para la provincia de Petorca y/o Región de Valparaíso:

- Para los mamíferos se puede destacar el Guanaco (*Lama guanicoe*) y el Puma (*Puma concolor*).
- Para las aves el Cóndor (*Vultur grypus*), Aguilucho chico (*Buteo albigula*).
- Para reptiles y anfibios, la culebra de cola larga (*Philodra yassimonsii*) y el sapo de rulo (*Rhinella arunco*).

2.3.2.2 Ecosistemas acuáticos

El agua cumple una función fundamental en el apoyo a la mantención de los ecosistemas terrestres y los usos de la tierra, además de apoyar al desarrollo del ecosistema acuático en sí mismos y su ecología (Lacy, 2020). Desde esa consideración, más el ciclo del carbono, como principal componente químico de transferencia de materia al interior de los ecosistemas acuáticos, se identifican tres grupos de organismos de la cadena trófica: fitoplancton, macroinvertebrados y peces.

En estas dos cuencas, los ecosistemas acuáticos están limitados a la parte alta, donde hay escurrimiento superficial

La entrada de energía y fijación de carbono en el sistema ocurre principalmente por organismos unicelulares fotosintéticos de los grupos de Cyanobacterias (ej. *Anabaena* sp. *Nostoc* sp.), Diatomeas (ej. *Cymbella* sp, *Navicula* sp) y microalgas verdes (ej. *Mesotaenium* sp. *Scenedesmus* sp) en las cuencas de los ríos Ligua y Petorca. Debido a que el caudal genera renovaciones de comunidades fotosintéticas, y se adicionan entradas de carbono desde hojas que caen al río, el segundo nivel de la cadena trófica se caracteriza por organismos multicelulares que se alimentan fitoplancton, fitobentos, hojas y detritus. Entre ellos se incluyen moluscos, crustáceos e insectos que se clasifican tanto en "filtradores" como "grazer / recolector" dependiendo de sus preferencias alimenticias. Así mismo hay macroinvertebrados que se alimentan de otros macroinvertebrados. En el Anexo J se presentan los Phylum, Orden, Clase y Familia de este nivel trófico descrito para las cuencas de La Ligua y Petorca. Por ejemplo, se ha observado dos especies de moluscos en peligro de extinción *Aegla papudo* y *Cryphiops caementarius*.

El nivel superior de la cadena trófica se caracteriza por la comunidad de peces dulceacuícolas. Las cuencas semiáridas, como Ligua y Petorca, son parte de la ecorregión dulceacuícola Laderas del Pacífico Andino Sur (Abell *et al.*, 2008), y entre las dos cuencas, hay cinco especies nativas de acuerdo a Vila *et al.* (1999), más recientemente DGA

(2004) identifica dos especies más. De las seis especies identificados, cuatro son vulnerables (Pejerrey costero, Pocha, Puye, Carmelita y Bagre chico) y dos están en peligro de extinción (Puye, Pejerrey Chileno)

Desde una perspectiva de ecología de paisaje y según el Inventario Nacional de Humedales (2011) se observan los siguientes humedales (Figura 2-17):

- En la cuenca del río la Ligua se presentan 186 unidades de humedales, que cubren 381 ha, siendo los humedales tipo río principal y secundario los que cubre mayor superficie (174 ha).
- En la cuenca del río Petorca se presentan 201 unidades de humedales, que cubren 309 ha, siendo los humedales tipo río principal y secundario los que cubre mayor superficie (217 ha).

Las principales amenazas son la agricultura de paltos y cítricos orientada al mercado internacional y principalmente localizada en la zona media de las cuencas (MMA, Diagnóstico, Estado y Tendencias de la Biodiversidad de la Región de Valparaíso, 2016)

2.3.2.3 Áreas silvestres protegidas

Las áreas silvestres protegidas pueden estar bajo protección estatal o privada, en distintos regímenes de protección. Desafortunadamente para las cuencas del río La Ligua y Petorca no se encuentran categorías dentro del **Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE)**, esto es que no se encuentran Parques Nacionales, ni Reservas Naturales, etc. Respecto a las iniciativas de conservación privadas, en la cuenca del río Petorca no se encuentra ninguna iniciativa ni comunitaria ni privada.

En ambas cuencas se encuentran dos tipos de **Sitios Prioritarios de conservación de la biodiversidad (SP)**, aquellos que poseen una línea base y que poseen efecto sobre el SEA, y, aquellos que no poseen línea base y consecuentemente, no tienen efecto en el SEA (Figura 2-17). En la cuenca La Ligua se encuentran dos SP con efecto en SEA: 1) Altos de Petorca y 2) Alicahue y Cordillera el Melón; cuatro SP sin efecto en SEA: 1) Cerro tabaco, Estuario 2) Río La Ligua, 3) Río La Ligua y 4) Zona Media Río La Ligua. En la cuenca del río Petorca se presenta un único SP con efecto SEA Altos de Petorca y Alicahue, compartido con la cuenca La Ligua, y cuatro SP sin efecto en SEA: 1) Palmas de Tilama, 2) Petorca, 3) Río Petorca y 4) Zona Media Superior Petorca.

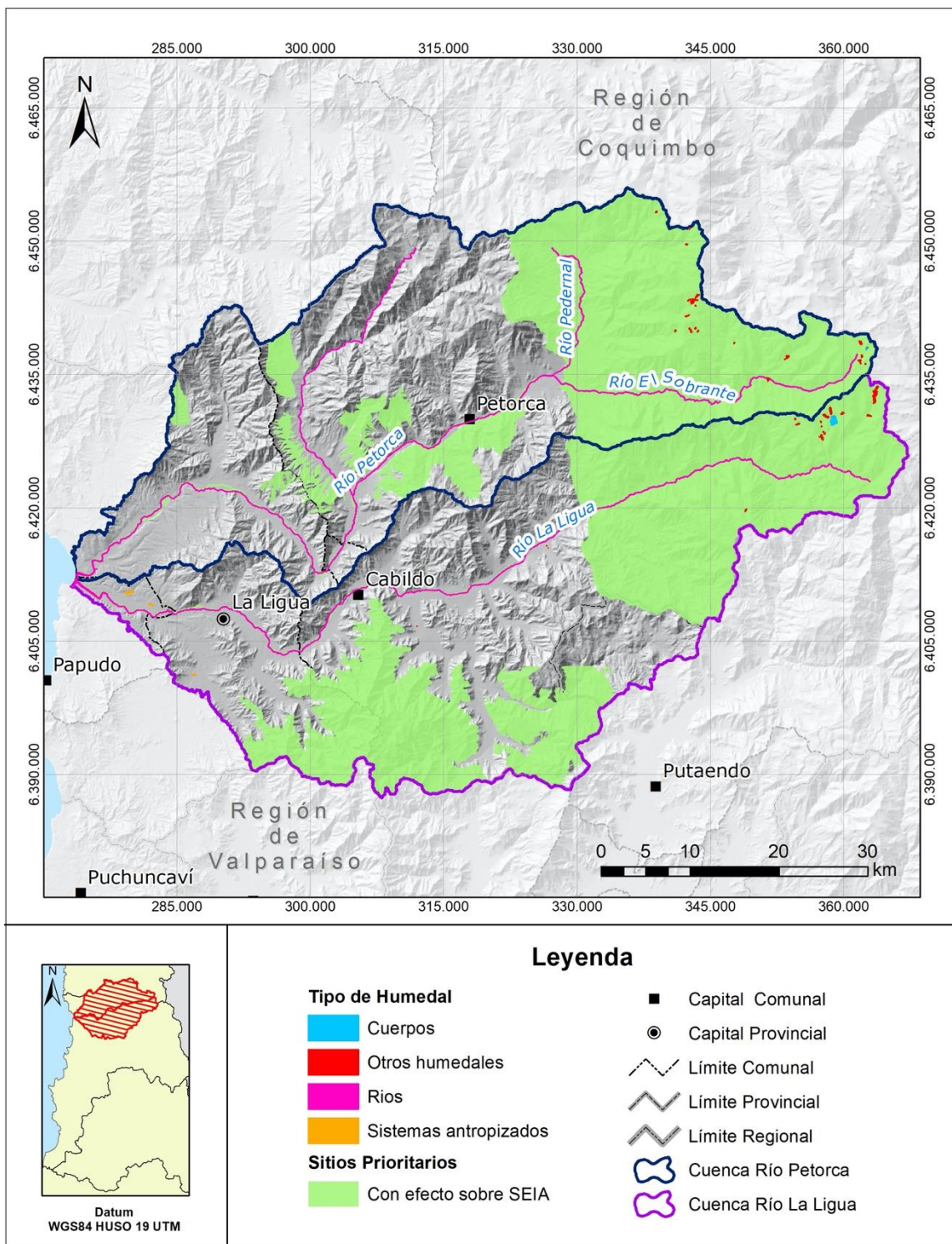


Figura 2-17. Tipos de humedales y tipos de SP en cuencas La Ligua y Petorca.

Fuente: Elaboración propia a partir del IDE (2021c; 2021d).

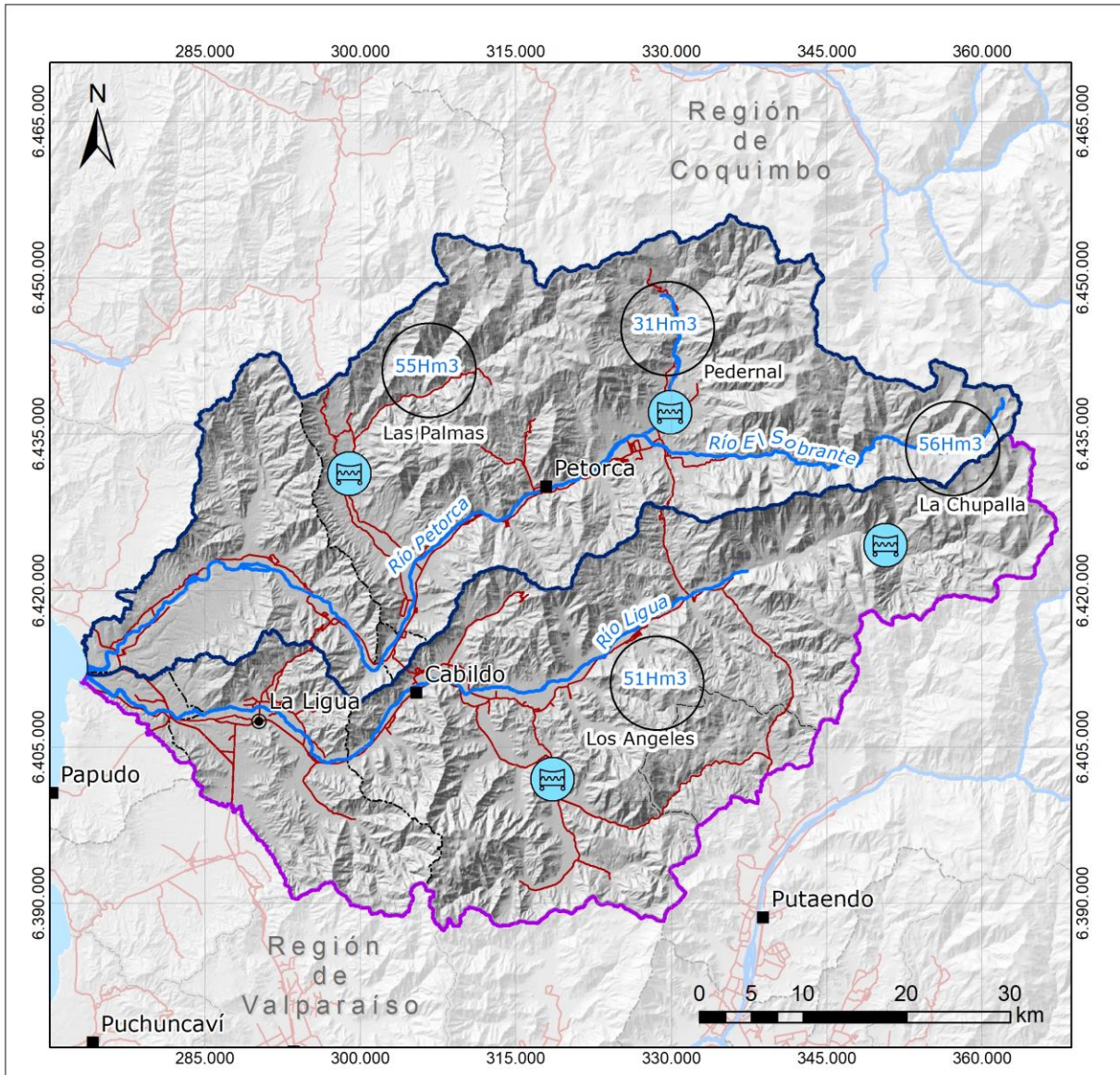
2.3.3 Glaciares

De acuerdo al Inventario Nacional de Glaciares realizado por la DGA en el año 2011 concluyó que no se encuentran glaciares para las cuencas La Ligua y Petorca (DGA, 2011).

2.4 Infraestructura Hídrica

2.4.1 Obras Hidráulicas

Estas cuencas no presentan actualmente embalses y por lo tanto, no presentan capacidad de regulación. Sin embargo, existen 4 iniciativas ya en curso, en la cuenca del río Ligua se emplazarán los embalses Los Ángeles y la Chupalla y en la cuenca del río Petorca se emplazarán los embalses Pedernal y Las Palmas. En conjunto, la cuenca del río Ligua tendrá una capacidad de regulación de 107 Hm³, y la cuenca del río Petorca tendrá una capacidad de regulación de 86 Hm³ (Figura 2-18).



Datum
WGS84 HUSO 19 UTM

Legenda











- | | | | |
|---|-----------------------|---|--------------------|
|  | Embalses Propietarios |  | Río |
|  | Capital Comunal |  | Red Vial |
|  | Capital Provincial |  | Cuenca Río Petorca |
|  | Límite Comunal |  | Cuenca Río Ligua |
|  | Límite Provincial | | |
|  | Límite Regional | | |

Figura 2-18 Ubicación de los embalses proyectados en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.

Fuente: Elaboración propia a partir de Mapoteca Digital DGA (2019d).

2.4.2 Obras de conducción y distribución. Obras de Riego

La cuenca del río Ligua existen 25 canales. A la fecha de 2016 esta cuenca cuenta con 35 Comunidades de Aguas y una asociación de canalistas. La cuenca del río Petorca existen 42 canales. A la fecha de 2016 cuenta con 46 Comunidades de Aguas y una asociación de Canalistas. La distribución de los canales es en torno a la red hidrográfica, puesto que es donde se ubican los terrenos fértiles de riego (Figura 2-19).

En cuanto a la capacidad de conducción aproximada, el 89% de los canales encuestados posee una capacidad igual o menor a 1 m³/s. Cerca del 91% de los canales presenta necesidades de revestimiento y/o mejoramiento de sectores y entubamiento de canales. Sin embargo, del total de los canales el 59% cuenta con al menos un tramo de revestimiento o entubamiento y al menos 2 de ellos declara no tener necesidades en cuanto a revestimiento o entubación (CNR, 2016b).

Respecto a los proyectos de revestimiento u obras de mejoras en los canales el 50% de los encuestados declara tener en ejecución o haber ejecutado proyectos de construcción de obras o revestimiento de canales, procedentes de distintas fuentes de financiamiento. Por otro lado, declaran tener problemas organizacionales al momento de presentar los proyectos, tales como: aporte de dinero de los beneficiarios, usuarios poco participativos y falta de comunicación entre instituciones. El mayor proyecto de los canales encuestados, es el revestimiento del canal matriz Alicahue perteneciente al río La Ligua, por un monto de MM \$1570 (CNR, 2016b).

Las bocatomas asociadas a dichos canales resultan ser 37 para la Ligua y 12 para Petorca. En ambas cuencas, más del 50% fueron evaluadas en estado deficiente por sus propietarios.

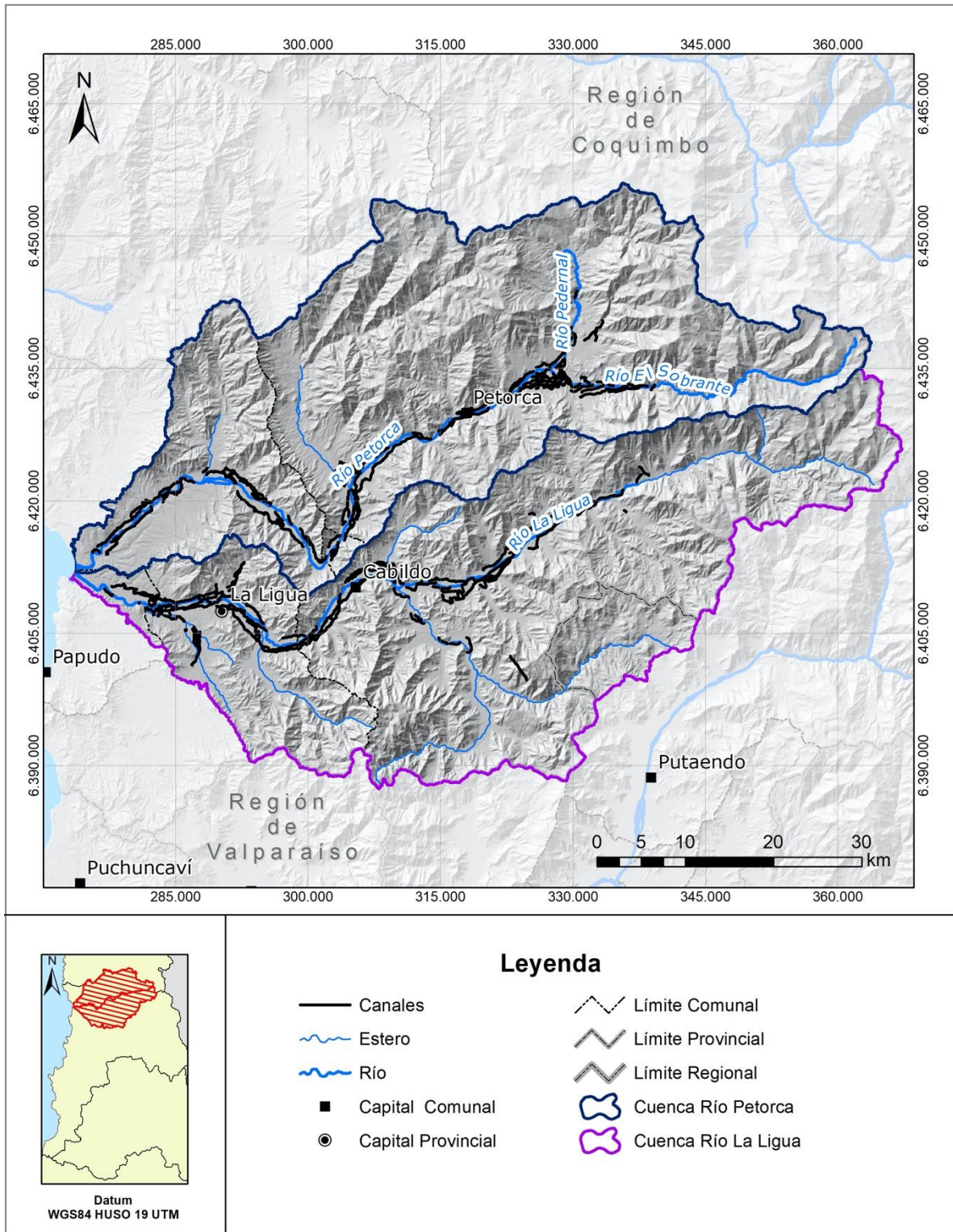


Figura 2-19 Ubicación de canales de riego en las cuencas Ligua y Petorca.

Fuente: Elaboración propia a partir de IDE (2021d).

2.4.3 Redes de monitoreo

En las cuencas en estudio existen distintas redes de medición, las cuales pertenecen o son administradas principalmente por instituciones públicas. La Dirección General de Aguas es la que mayor cantidad de estaciones administra con un total de 43 estaciones vigentes en la cuenca del río Ligua y 51 estaciones vigentes en el río Petorca.

Además de la DGA, existen otras instituciones que realizan monitoreo en alguna de las cuencas de estudio. El Instituto Nacional de Investigación Agraria (INIA) tiene una red nacional de estaciones meteorológica que ha dispuesto en línea¹ para visualización de los datos en tiempo real. En esta misma visualización ha dispuesto estaciones administradas por el Centro de Estudios de Zonas Áridas y Semiáridas (CEAZA) y de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

El Ministerio de Agricultura tiene un portal web² denominado como Agromet. Este portal es una iniciativa materializada el año 2012, gracias a un Convenio suscrito entre el Ministerio de Agricultura y el Consorcio Técnico Red Agroclimática Nacional, constituido por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), la Asociación de Exportadores de Frutas de Chile A.G. (ASOEX), la Fundación para el Desarrollo Frutícola (FDF), Centro Cooperativo para el Desarrollo Vitivinícola S.A. y Asociación Vinos de Chile A.G, y que pone a disposición del sector agrícola la información relacionada con el clima y su efecto sobre los distintos procesos productivos. Recientemente, también se ha unido la red de estaciones del Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA). La ubicación de estas estaciones se muestran en la Figura 2-20.

En la cuenca del río Ligua, del total de estaciones vigentes, 2 son fluviométricas (Figura 2-21), 9 meteorológicas (Figura 2-22), 15 pozos de nivel (Figura 2-23) y 18 de calidad de agua subterránea (Figura 2-24) y una fluviosedimentológica.

En la cuenca del río Petorca, del total de estaciones vigentes, 4 son fluviométricas (Figura 2-21), 14 meteorológicas (Figura 2-22), 18 a pozos de nivel (Figura 2-23), 14 de calidad de agua (Figura 2-24) y una fluviosedimentológica.

Durante este año (2020) la DGA desarrolló una única plataforma de visualización en Línea (HIDROLínea) de la totalidad de las estaciones que administra y que cuenta con un sistema de telemetría³. De las estaciones que se ubican en ambas cuencas 4 pertenecientes a la cuenca del río Petorca están en línea y 4 pertenecen a la cuenca del río Ligua.

En total, la cuenca del río Ligua cuenta con 53 estaciones de monitoreo y la cuenca del río Petorca cuenta con 55 estaciones de monitoreo.

¹ <https://agrometeorologia.cl>

² <https://www.agromet.cl/>

³ (<https://snia.mop.gob.cl/sat/site/informes/mapas/mapas.xhtml>)

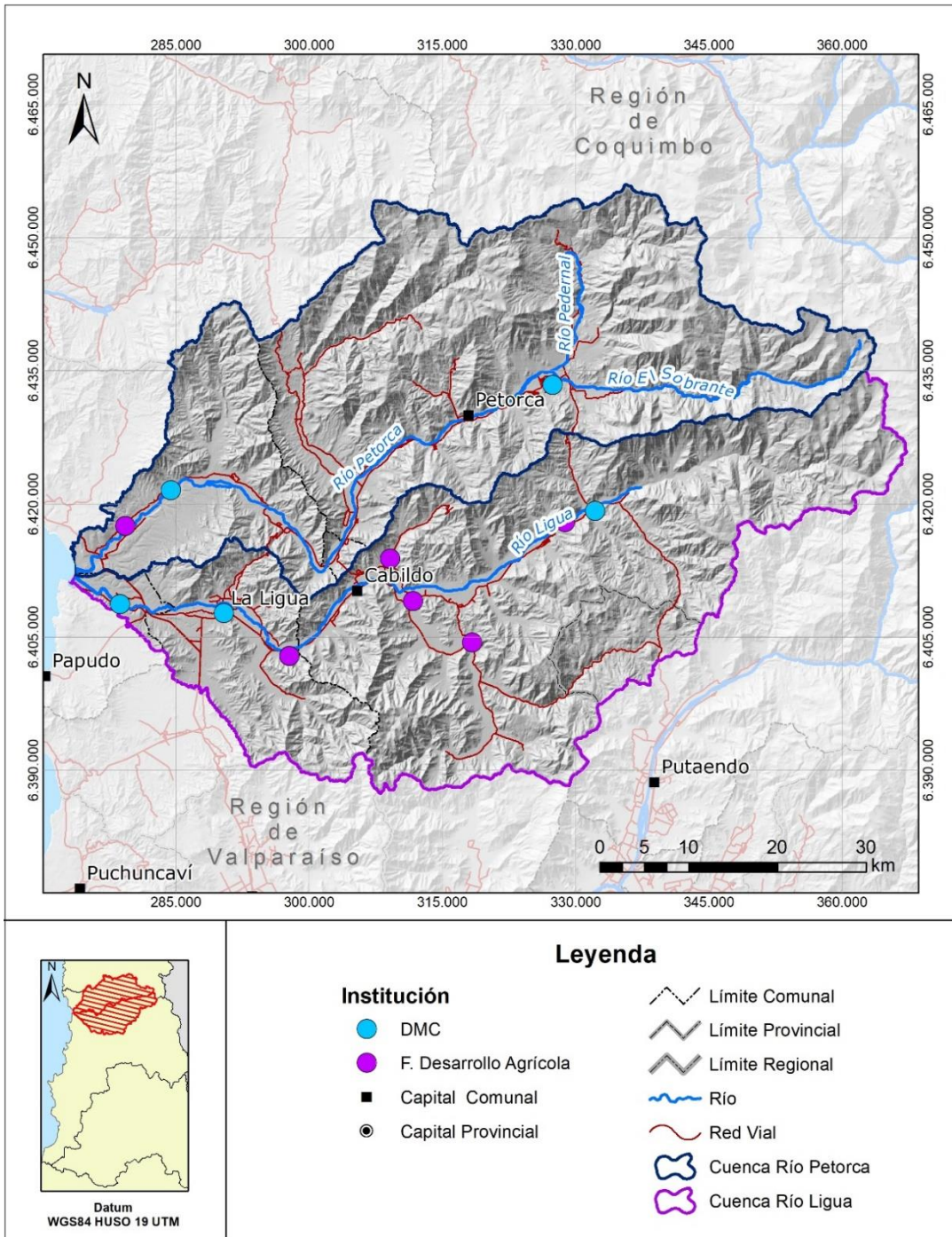


Figura 2-20 Ubicación de las estaciones meteorológicas vigentes administradas por INIA y DMC

Fuente: Elaboración propia a partir de www.agromet.cl

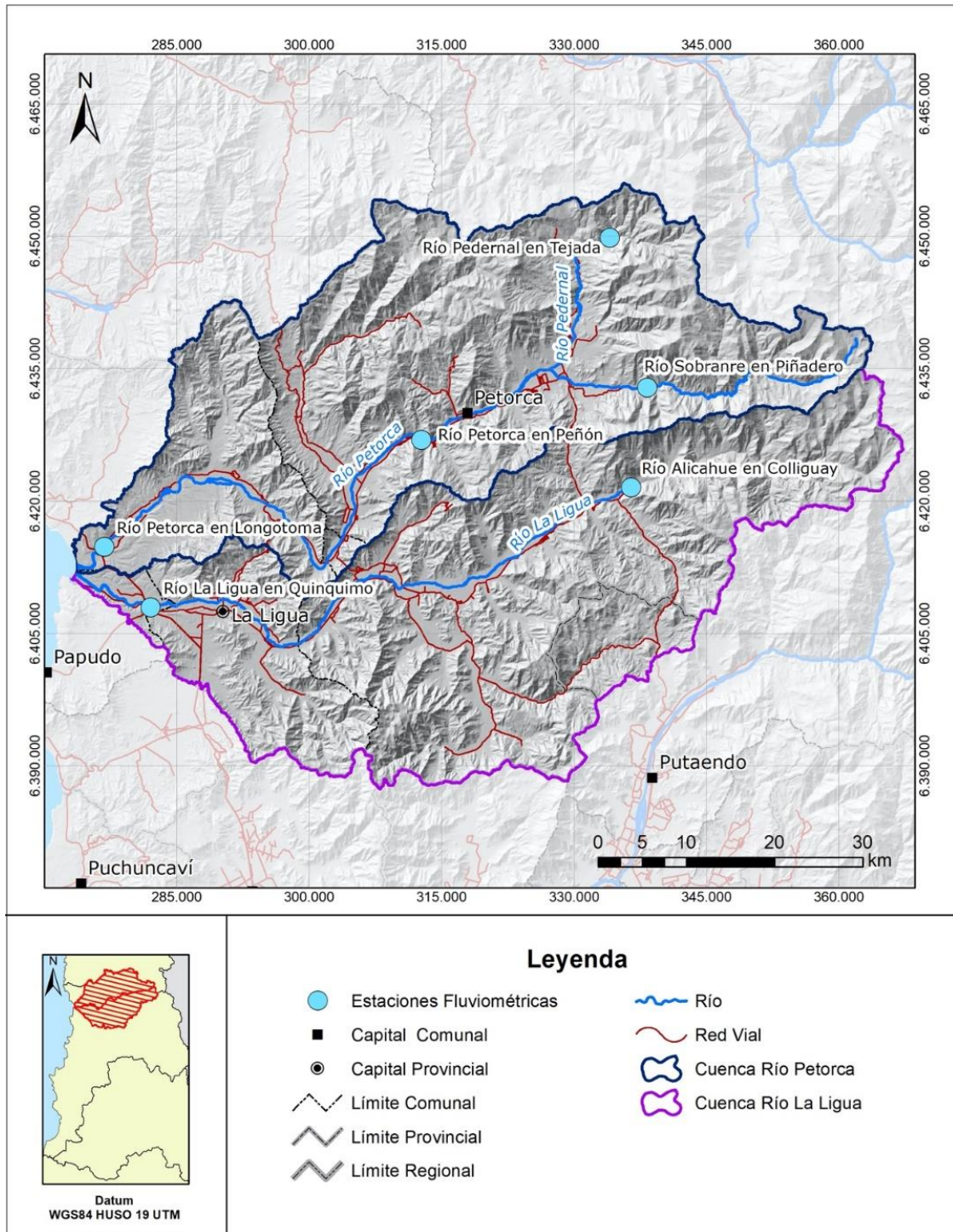


Figura 2-21. Ubicación de las estaciones fluviométricas presentes en las cuencas Río Ligua y Río Petorca .

Fuente: Elaboración propia a partir de Mapoteca Digital DGA (2019d).

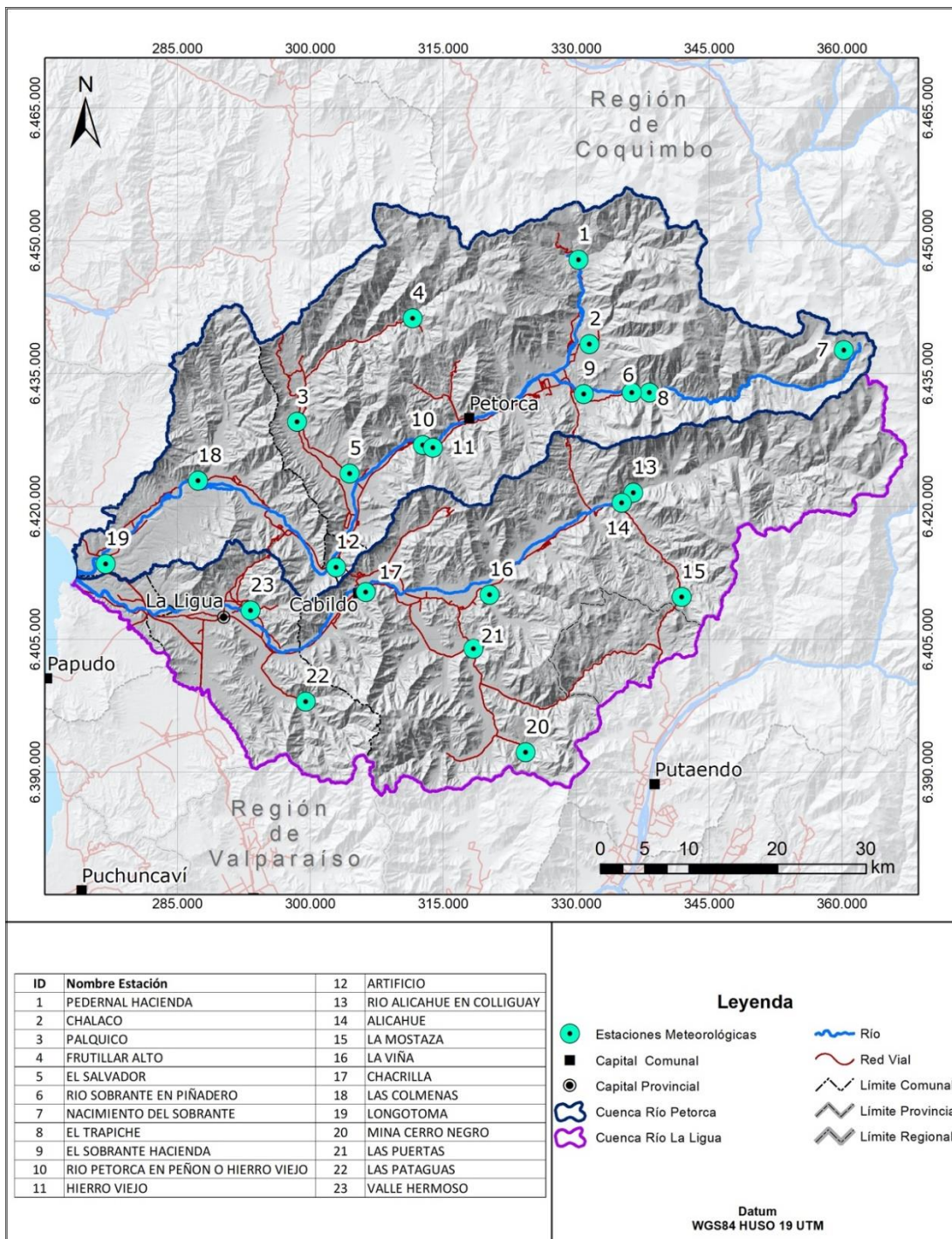


Figura 2-22 Ubicación de las estaciones meteorológicas presentes en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.

Fuente: Elaboración propia a partir de Mapoteca Digital DGA (2019d).

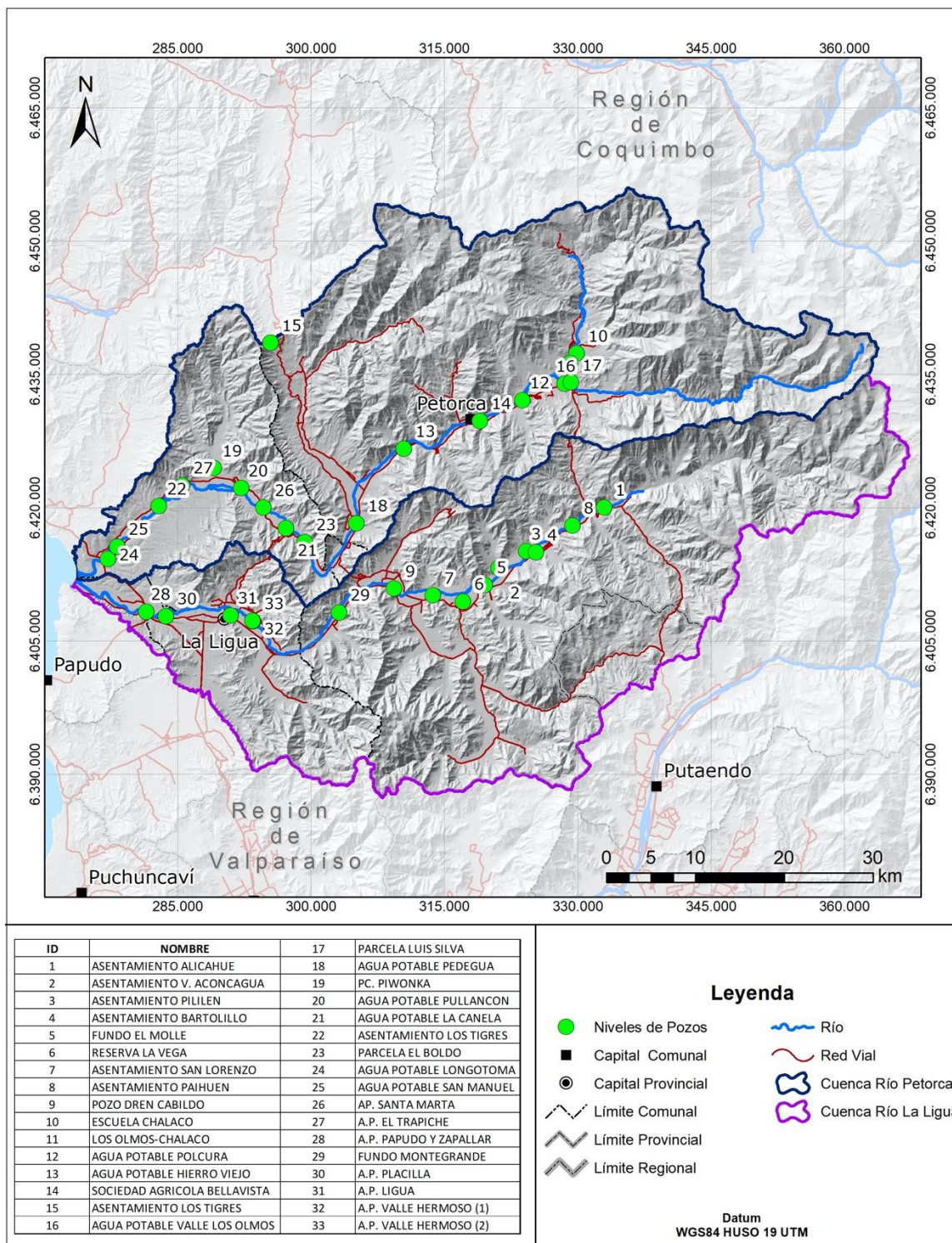
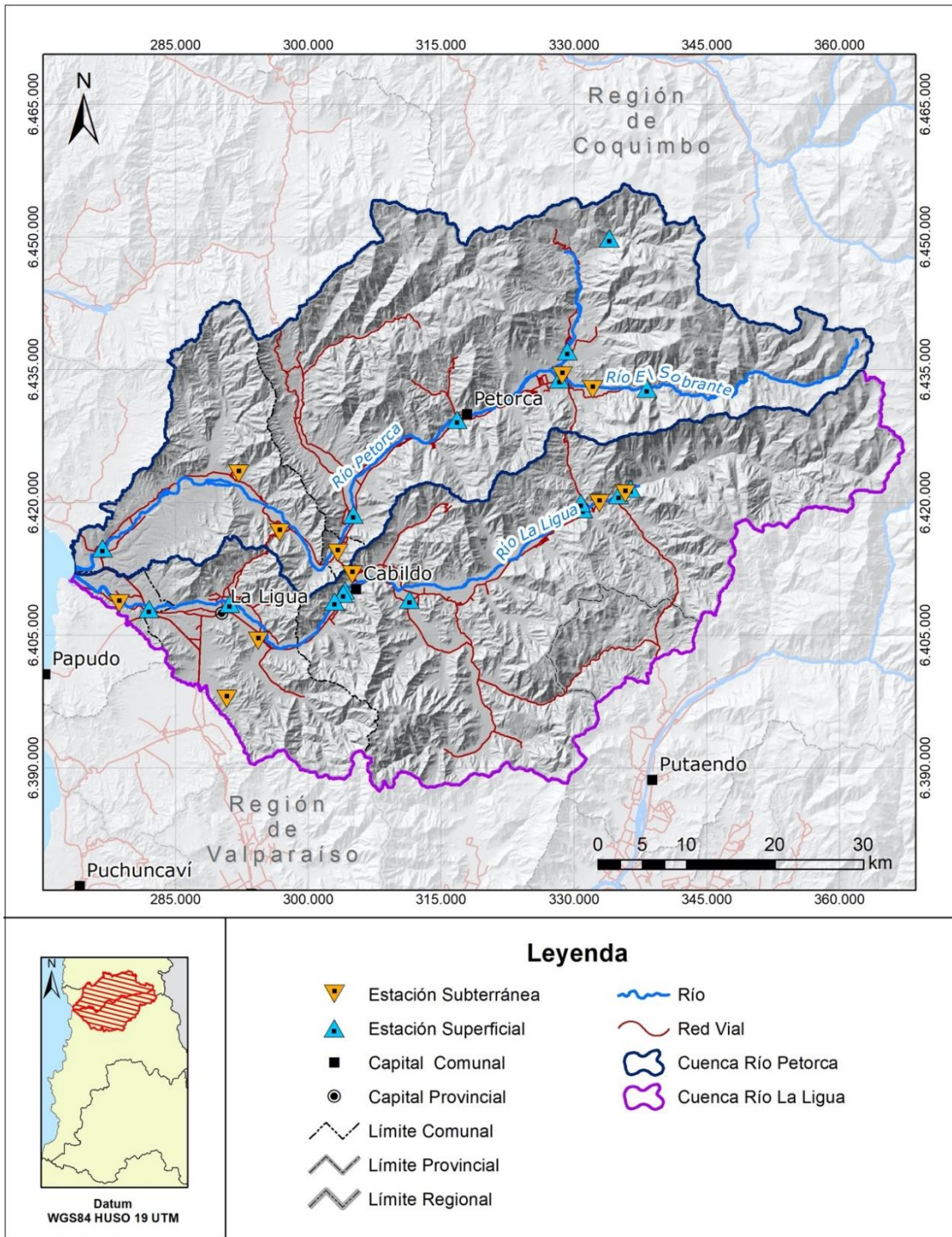


Figura 2-23. Ubicación de las estaciones de niveles de pozos presentes en las cuencas Río Ligua y Río Petorca.

Fuente: Elaboración propia a partir de Mapoteca Digital DGA (2019d).



2.5 Nuevas fuentes de agua

La identificación de nuevas fuentes de agua en la cuenca da cuenta del dinamismo –o la ausencia de este– con que los usuarios locales han enfrentado los procesos de escasez del recurso en el tiempo.

En general, y según lo observado en el territorio, las fuentes de agua principales se remiten principalmente al uso de aguas superficiales corrientes o embalsadas, y pozos de distintos niveles de profundidad y materialidad.

A continuación, se describe cada uno de las fuentes alternativas de agua y su desarrollo en la cuenca.

2.5.1 Acuíferos profundos

En conformidad del estudio desarrollado por AC ingenieros (DGA, 2014c), se considera un acuífero sólo en la capa aluvial (capa más superficial), según geología descrita en el acápite 3 de dicho estudio, de hecho en el acápite 6.4.5 de dicho estudio, se plantea que por debajo de 100 m, existen estratos más cementados y con mucho fino, tal como se cita “Se calculó el volumen inicial del acuífero con los niveles resultantes del modelo de régimen permanente. Se consideraron sólo las unidades geológicas de sedimentos fluviales. Además, se debe tener presente que, en profundidad, los estratos están más cementados y tienen, por lo general, mayor presencia de finos. Por ello, se consideró como volumen útil sólo los primeros 100 m del relleno”. Es por esto que se infiere que no existe un acuífero profundo.

2.5.2 Recarga de acuíferos

La Comisión Nacional de Riego (2013) llevó a cabo el estudio “Mejoramiento de Agua Subterránea para Riego Ligua y Petorca”, en el cual se evaluaron 5 sitios priorizados previamente en otro proyecto, y seleccionó uno (SPB Bartolillo, cerca al canal Alicahue) en base a disponibilidad y calidad del recurso, idoneidad del acuífero, aspectos legales y beneficiarios, usuarios. En el sitio de estudio escogido se construyó un sistema piloto en base a Balsa de Recarga para estimar las tasas de infiltración. En principio, el proyecto piloto tuvo problemas de flujo del Canal Alicahue, teniendo que hacer uso del flujo discontinuo de tranques de riego. El proyecto logró infiltrar 12m³ en un mes, aunque las tasas de infiltración no pudieron establecerse por dificultades con la línea base, y lejanía del pozo de monitoreo.

2.5.3 Desalinización

La desalinización es una alternativa que está siendo evaluada en todas las ciudades costeras como fuente alternativa de agua potable, pero también como mecanismo de compensación por uso de derechos de aprovechamiento de aguas en zonas de alta cordillera, como es el caso de los sistemas de intercambios de agua o Swaps Hídricos que se han desarrollado en Copiapó entre el sector minero y el sanitario. Dentro del proceso de desalinización existe una diversidad de tecnologías (flash de múltiples etapas, la

compresión de vapor, la osmosis inversa, osmosis reversa, la destilación de membrana y la electrodiálisis), asociadas a distintas calidades de agua de entrada/salida deseada, y costos de inversión. Además de los costos de inversión, los costos de operación, especialmente la energía eléctrica requerida, es que ha abierto el mercado a la desalinización con energía fotovoltaica. Proyectos sobre desalinización portátil y fotovoltaica se han llevado a cabo por centros de innovación como la Fundación Chile en Arica e Isla de Pascua⁴, y diversas empresas privadas.

En la cuenca de Petorca el Laboratorio de Procesos de Separación por Membranas de la USACH llevó a cabo validación técnico-económica y experimental de un equipo escala piloto de membranas para desalar agua de mar para su uso en riego agrícola en la Provincia de Petorca⁵. Recientemente un equipo de investigación del Instituto de Investigaciones Agropecuarias de La Cruz (Ministerio de Agricultura) dio inicio al proyecto "Protocolo de seguimiento para la instalación de plantas de desalinización en el sector agrícola"⁶, el cuál continuará las iniciativas de utilizar agua desalinizada en la agricultura. Estudios de tesis de grado han explorado la desalación para abastecer de agua potable a la localidad de Los Molles, siendo incluso más costo-efectiva que un trasvase de cuenca; y la desalación por captación de intrusión salina de pozos costeros, es incluso una mejor alternativa que la osmosis inversa de agua de mar (Zúñiga, 2017). Otras tesis han explorado que la desalación puede ser una alternativa para la agricultura familiar en la Comuna de Petorca, donde la ósmosis inversa en la localidad de Pichicuy podría ser una opción (Salas 2018).

En la cuenca de la Ligua, se ha recurrido a la desalación para paliar la escasez de pequeñas comunidades costeras. En esta comuna existe una planta de desalinizadora y una en proyecto en el sector de Los Quinquelles-La Ballena. La iniciativa impulsada por el Municipio y financiada por la Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, tiene una capacidad de 1 litro/s para una población de más de 200 familias⁷.

2.5.4 Cosecha de aguas lluvia y captación de humedad en el aire

El Proyecto FPA 5-S-057-2017 Nodo Hidrodinámico para la Adaptación al Cambio Climático Cuenca Río Petorca (MMA, 2017) presentó de manera preliminar algunos datos para: 1) la construcción de infraestructura para la recolección de aguas lluvias, que incluía la cosecha (canaletas), el almacenamiento (estanque) y la reutilización de las aguas en el riego de una miniterraza de cultivo para huerto nativo con fines medicinales, y 2) establecimiento de sistemas de atrapanieblas para riego de huertos medicinales.

⁴ <https://fch.cl/noticia/inauguran-primera-planta-desalinizadora-que-funciona-con-energia-solar-en-isla-de-pascua/>

⁵ <http://www.usach.cl/news/investigador-impulsa-la-desalinizacion-bajo-costo-para-riego-agricola-partir-energia-solar>

⁶ <https://www.inia.cl/proyecto/503022/>

⁷ <http://www.subdere.gov.cl/sala-de-prensa/subdere-financia-planta-desalinizadora-de-agua-en-la-ligua>

2.5.5 Uso aguas servidas tratadas

En la Región de Valparaíso Fundación Chile (2016) realizó un diagnóstico técnico, económico y normativo del potencial reúso de aguas residuales en la Región de Valparaíso, con perspectivas de implementar a futuro sistemas de reúso para emisarios submarinos. De acuerdo con el estudio el caudal descargado por emisarios submarinos en la región de Valparaíso es de 2,6 m³/s, lo que alcanzaría para regar 27.300 hectáreas de uva de mesa o 10.250 hectáreas de paltos en la región. El estudio elaboró un modelo conceptual para el reúso y distribución de las aguas, y un Índice de Aplicabilidad, que arrojó que las zonas prioritarias para ser abastecidas de las aguas residuales de reúso son: Casablanca, Quillota y Petorca. En el caso de Petorca la propuesta considera utilizar 1,1 m³/s de aguas residuales descargadas vía el emisario submarino de Loma Larga previo un tratamiento adicional, lo que implica la construcción de una planta de tratamiento y el almacenamiento de 34,6 MMm³ de aguas residuales tratadas, por ejemplo, en el embalse Las Palmas, proyectado construirse a 174 Km de Loma Larga. De acuerdo con este estudio el costo de inversión (CAPEX) sería de 356,2 MM USD y el costo de operación (OPEX) se estimó en 0,68 USD/m³ para de vida útil de 30 años y tasa de interés del 9,5%.

2.6 Gobernanza del agua a nivel de cuenca

Se entiende por Institucionalidad y Gobernanza a la estructura y articulación de instituciones políticas en los distintos niveles de gestión (gobernanza vertical), con las organizaciones privadas y ciudadanas (gobernanza horizontal), que apoyan la adecuada gestión, fiscalización, protección y gestión de los recursos hídricos en la cuenca. La institucionalidad pública con injerencia en la gestión de los recursos hídricos en Chile ha sido evaluada como amplia, compleja, centralista (Akmouch, 2012), y con atribuciones superpuestas en ciertos temas, como el de la protección de la calidad de las aguas (Gobierno de Chile, 2012). El análisis del desempeño de las 102 funciones relacionadas con el agua en Chile ha mostrado la no existencia de una estructura clara que defina políticas y objetivos sectoriales que aglutinen esfuerzos, financiamiento, información, capacidad y coordinación institucional (Banco Mundial, 2013). Especialmente la no claridad en la priorización de objetivos en el territorio y en el uso del agua ha sido nombrado una razón para la imposibilidad de llegar a consensos colectivos sobre qué hacer en un territorio (Centro Atacama, 2010).

Este diagnóstico nacional se manifiesta en la institucionalidad y gobernanza de las cuencas de Ligua y Petorca, donde a pesar de las dificultades, existen algunas experiencias que resaltar. Este análisis se basa en la revisión de diagnósticos recientes (CNR, 2011; CNR, 2016; DGA, 2018; CRDP-Región de Coquimbo, 2016; Banco Mundial, 2013), entrevistas a actores claves en la cuenca, entrevistas a expertos en conflictos territoriales, y envió de dos encuestas (Google Forms) a actores del Estado,

organizaciones de productores, agricultores, usuarios, y sociedad civil organizada (ver Anexo I Participación Ciudadana)⁸.

2.6.1 Mapa de agentes

2.6.1.1 Institucionalidad pública de la gestión del agua

A escala nacional, la Estrategia Nacional de Recursos Hídricos ENRH 2012-2025 (Gobierno de Chile, 2012) y el Banco Mundial (2013) reconocen la multiplicidad de organismos públicos con injerencia en algún aspecto de la gestión del agua. Además de los Ministerios mencionados en la ENRH, actualmente se ha creado el Ministerio de Ciencia y Tecnología, con el objetivo de asesorar y colaborar con el presidente de la República en el diseño, formulación, coordinación, implementación y evaluación de las políticas, planes y programas orientados a contribuir al desarrollo sostenible del país y a la generación de conocimiento como resultado de investigación de base científico-tecnológica.

Está también en proceso de Ley lo que será el Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas el cual estará encargado de la promoción y protección de los ecosistemas acuáticos como ríos, lagos y humedales. Actualmente, este rol es parte de las atribuciones del Ministerio de Medio Ambiente.

Cada uno de los Ministerios mencionados a nivel nacional tiene una Secretaría Regional Ministerial (SEREMI), que son la representación de los ministerios en las regiones. En el caso de la Provincia de Petorca, a nivel regional existe también un Delegado Presidencial o coordinador regional de recursos hídricos y un encargado sólo para la provincia de Petorca que dependen directamente de la Presidencia. Además, existen los Gobiernos Regionales (GORE) o Intendencias que son representantes del Gobierno Central, cuentan con un Consejero Provincial, una Comisión de Recursos Hídricos del Gobierno Regional, y coordinan con las SEREMI. Por ejemplo, la Intendencia de la región de Valparaíso coordina con la SEREMI de Obras Públicas el desarrollo del Plan de Infraestructura y Recursos Hídricos, además de realizar fiscalizaciones por denuncias de usurpación de aguas y financiamiento de estudios y programas en el territorio (CNR 2016). La labor de dicha SEREMI cuenta con el apoyo de una oficina regional de la Dirección Regional de Aguas.

Además de las oficinas y representaciones regionales de instituciones públicas descritas anteriormente, en respuesta a la crisis hídrica se creó en la V región durante el año 2015 el Consejo para el Desarrollo y Sostenibilidad Hídrica de la Región de Valparaíso (Resolución Exenta N°2164). Las funciones de este Consejo fueron el de proponer una política pública regional enfocada en el aseguramiento de la disponibilidad, accesibilidad y gestión equitativa del recurso hídrico necesario para garantizar el desarrollo económico y social de la región en corto, mediano y largo plazo. Este ente elaboró y aprobó en marzo del 2019, la *Política de Desarrollo y Sostenibilidad Hídrica para la Región de Valparaíso*, la

⁸ Debido a la emergencia sanitaria, con la consiguiente imposibilidad de realizar talleres presenciales, se estableció una estrategia de consulta a través de formularios online (enviados a 103 correos electrónicos y mensajes a 29 números de WhatsApp) y llamadas telefónicas (80 personas).

cual define pilares, focos, ejes estratégicos, objetivos, metas e indicadores para superar las brechas hídricas detectadas. Además, esta Política que actualmente se encuentra en revisión de reglamentos.

A nivel provincial, existe también la Oficina Provincial del Agua, en convenio entre el Ministerio de Obras Públicas y la gobernación de Petorca. Esta oficina, con funcionarios de la DOH y DGA, tiene el objetivo de atender los requerimientos de los usuarios en la zona; asesoramiento, por ejemplo, a las APR que no operan con estándares MOP. Dependientes del Ministerio de Agricultura MINAGRI que, aunque no estaba en el listado original de la ENRH, juegan un papel importante en el acceso al agua de pequeños agricultores a través del apoyo a las regularizaciones, catastro de fuentes de agua y apoyo a obras menores, y otras actividades son el Instituto Nacional Desarrollo Agropecuario (INDAP) y su Programa de Desarrollo Local (PRODESAL), enfocado en los campesinos y agricultores que poseen hasta 5 hectáreas de riego básico y con ingreso proveniente principalmente de la agricultura ya sea como propietario, arrendatario, sucesiones, medieros. PRODESAL tiene oficinas en Petorca, Cabildo, La Ligua y Papudo, y desarrolla asesoría técnica y formulación de proyectos productivos, pero también de riego a través del PROM (Programa de obras menores).

Además, a nivel Municipal, la comuna de Petorca cuenta con una Oficina de Asuntos Hídricos que fue inaugurada el 2016, con el objetivo de abordar los problemas de coordinación e integración de las políticas públicas sectoriales en materia territorial y del agua especialmente con las APR, promover la participación comunitaria, proporcionar información y orientación para la gestión y el desarrollo de acciones que permitan asegurar el acceso al agua, tanto en cantidad como en calidad. Esta oficina fue el resultado del proyecto "Sistemas Participativos de Gestión del Agua y Desarrollo Socio-Económico Sustentable de la cuenca alta del río Petorca", ejecutado por la Universidad de Playa Ancha con financiamiento de la Fundación de Asistencia Internacional (FAI). En la comuna de La Ligua la Oficina Agrícola, aunque no es su función, coordina con las APR y con PRODESAL coordinando entre otras cosas el tema de los camiones aljibe.

Con esta información se actualizó un mapa de actores (Figura 2-25) para la Provincia de Petorca⁹.

⁹ Debido a la emergencia sanitaria, con la consiguiente imposibilidad de realizar talleres presenciales, se estableció una estrategia de consulta a través de formularios online (enviados a **103** correos electrónicos y mensajes a **29** números de WhatsApp) y llamadas telefónicas (**80** personas).

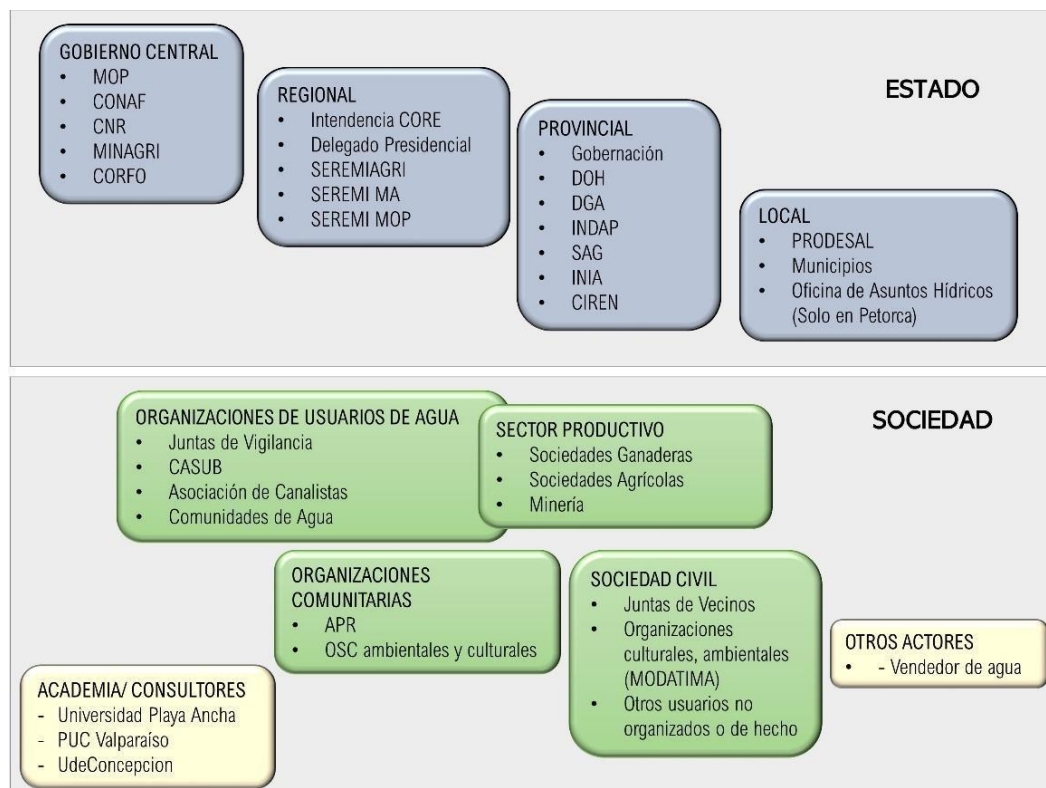


Figura 2-25 Mapa principales actores en las cuencas de Ligua y Petorca

Fuente: Elaboración propia en base CNR (2016a) y entrevistas a actores de la zona.

Estos actores se involucran de distinta manera en el territorio y dependiendo de la contingencia. Los principales actores de esta lista tienen también distintos grados de interés e influencia. El *grado de influencia* se relaciona con la capacidad de incidir en el comportamiento de otros actores de la cuenca, ya sea a través de incentivos como de diversas formas de cooperación y/o conflicto; mientras que el *grado de interés*, expone sus objetivos y preocupación sobre la gestión del agua. Como se ve en la Figura 2-26 donde se recogen solo las principales organizaciones en las cuencas de Ligua y Petorca, debido a la escasez hídrica no existen actores que no tengan un alto interés en el recurso hídrico; sin embargo, el poder de influencia en la gestión hídrica en la cuenca es desigual.

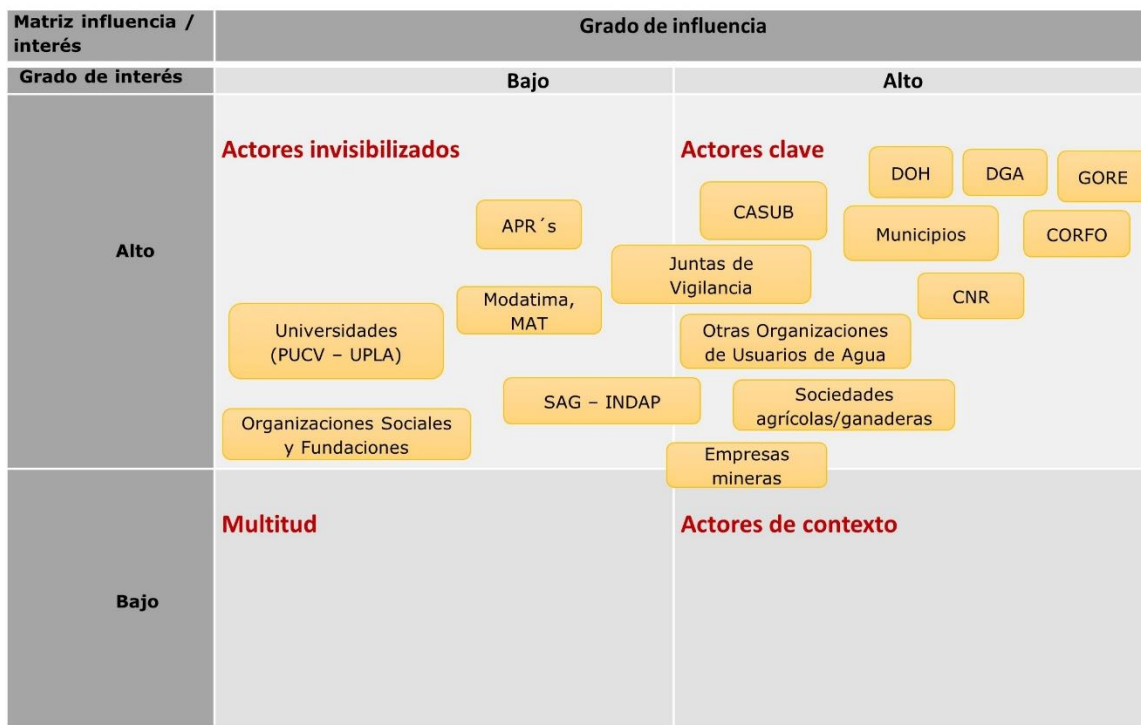


Figura 2-26 Matriz influencia/interés actores en las cuencas de Ligua y Petorca.

Fuente: Elaboración propia en base CNR (2016a) y entrevistas a actores de la zona.

2.6.1.2 Organizaciones de Usuarios de Agua

De acuerdo con el Registro Público de Organizaciones de Usuarios (RPOU) del Catastro Público de Aguas (CPA), en la cuenca del río Ligua existe 1 asociación de canalistas y 35 Comunidades de Aguas, un 70% de ellas legalizada en 1985. En la cuenca del río Petorca existen 2 Juntas de Vigilancia, 1 asociación de canalistas y 76 comunidades de agua, un 60% ingresadas en 1986 (ver Anexo J Descripción y diagnóstico, Apéndice J.4). Esta información fue contrastada con el estudio de Organizaciones de Usuarios de Agua en Chile (DGA, 2018) lo que arroja un número de OUA que están en proceso de legalización y un menor porcentaje que funciona de hecho (Figura 2-27).



Figura 2-27 Estado de las OUA en las cuencas de Ligua y Petorca

Fuente: Elaboración propia a partir de DGA (2018).

Tabla 2-1 Caudales asociados a OUA en las cuencas de Ligua y Petorca.

OUA	Petorca		La Ligua	
	Q (l/s)	% de OUA a las que corresponde	Q (l/s)	% de OUA a las que corresponde el dato [*]
Comunidades de aguas sup.	2691,7	26%	3679,36	20%
Asociaciones de Canalistas	0,0	0%	0	0%
Juntas de Vigilancia	0,0	0%	-	-
CAS	4474,3	100%	6821,399	100%
Total	7166,0	31%	10500,759	21%

[*] No todas las OUA aprobadas cuenta con información de caudales.

Fuente: Elaboración propia a partir de Catastro Público de Aguas (2019).

El análisis de la información referente a las OUA muestra una débil presencia y desigual capacidad de gestión entre las OUA en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.

Juntas de Vigilancia (JV): en la cuenca del río Petorca existen dos JV: la Junta de Vigilancia del río Petorca Sección El Monte y La Vega conformada en 2006 y la recientemente conformada Junta de Vigilancia de la Cuenca del Río Petorca (2018). Sin embargo, la historia muestra que las juntas han tenido dificultades para estar operativas debido en parte al nulo escurrimiento superficial de los cauces superficiales en la zona media y baja y el debilitamiento de las Asociaciones de Canalistas. Otro estudio indica que muchas agrupaciones de canalistas no están legalizadas como tal o no poseen inscripción de derechos de aprovechamiento (CNR 2016), lo que puede haber influido en

las dificultades históricas de las Juntas de Vigilancia. Por este motivo la efectividad y cohesión de estas OUAs debe ser monitoreada y apoyada.

El río Ligua no cuenta con una Junta de Vigilancia, la cual ha contado con varios intentos durante los años, pero ha sufrido similares desafíos como en la cuenca del Río Petorca. En los años 2000, la conformación de una Junta de Vigilancia en La Ligua fue conflictiva al no consensuar si era mejor una Junta para la parte alta y otra para la parte baja del valle dado que parte del río fluye subterráneamente (Budds, 2012). De acuerdo con el diagnóstico para desarrollar plan de riego elaborado por la Universidad de Concepción, el desmoronamiento de las OUA favorece el uso clandestino del agua, al bajo control en el uso y la depresión de los circuitos económicos locales (CNR 2016).

Comunidades de Agua Subterránea CAS: Actualmente existen 12 CAS, cada una en un Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común SHAC. Este proceso comenzó en el año 2013, con el inicio del "Programa apoyo a la constitución de comunidades de aguas subterráneas de los acuíferos del río La Ligua y río Petorca", y luego el 2015 con el Programa "Difusión técnica de usuarios de aguas en la provincia de Petorca", proyecto liderado por la Secretaría Regional Ministerial de Agricultura de Valparaíso. Este último incluyó la preparación de expedientes técnico-legales para 70 organizaciones de usuarios de aguas (OUAs) superficiales de la provincia y la inscripción de 765 títulos de derechos de aprovechamiento de aguas, perfeccionados en el Catastro Público de Aguas de la DGA (Figura 2-28). El año 2018 la mayoría de las CAS se constituyen por elecciones de asamblea, es decir por votación de los usuarios.

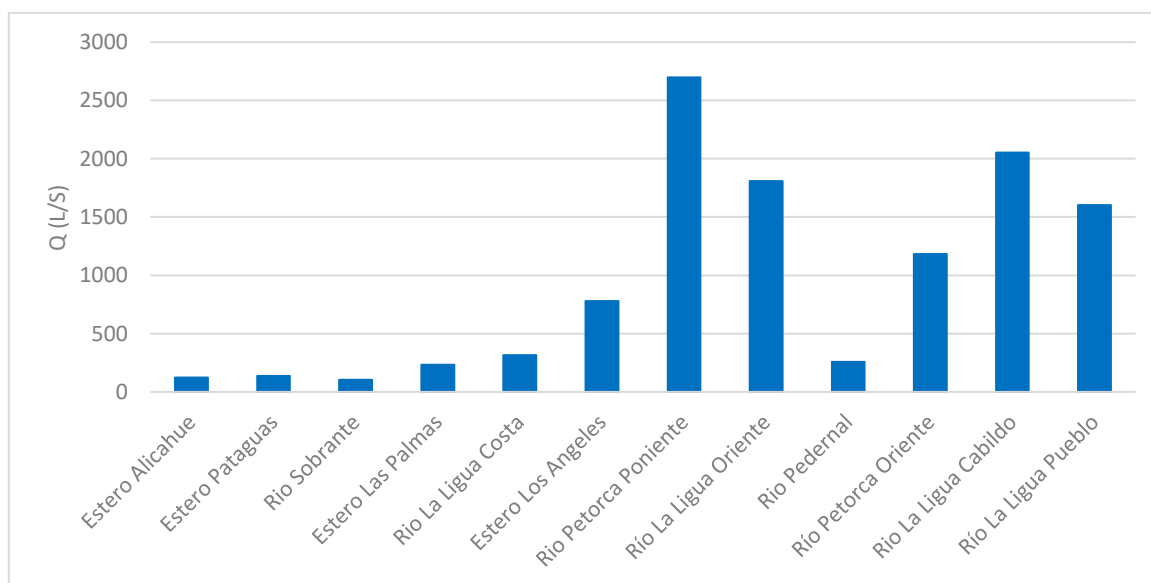


Figura 2-28 Derechos de agua otorgados a Comunidades de Aguas Subterráneas en las cuencas de Ligua y Petorca.

Fuente: Catastro Público de Aguas (15 de agosto de 2020).

A pesar de esto, 1) no todos los usuarios de agua subterráneas son miembros activos de una CAS (por ejemplo, algunas APRs), 2) no todos los usuarios de aguas subterráneas están regularizados. En el segundo punto un estudio reciente encontró que el Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común La Ligua Oriente y del Sector Hidrogeológico de Aprovechamiento Común Petorca Poniente aún tiene 439 DAA susceptibles a regularizar (DGA, 2018). En el primer punto, entrevistas a representantes de las CAS aluden al incremento de los conflictos debido a la sequía, como razón para el distanciamiento de los miembros. El mercado de compraventa del agua incipiente y caracterizado en su mayoría por mecanismos como constitución y herencia (Bujes 2015), la desigual posibilidad de influencia basado en acciones de Derechos de Aprovechamiento de Aguas DAA (CNR 2016) y desconfianzas entre usuarios de agua relacionadas con la información de caudal extraído, erosiona aún más la confianza entre los usuarios que pudiesen ser parte de estas Organizaciones de Usuarios de Agua.

Asociaciones de canalistas AC: las asociaciones de canalistas activas son las de los canales Chicolco (cuenca de Petorca) y del Ingenio (Ligua). De acuerdo a CNR (2016), muchas agrupaciones de canalistas no están legalizadas o tiene necesidad de regularización de los DAA. La desaparición de agua de los cauces superficiales es una de las razones para la escasa presencia de Asociaciones de canalistas en las cuencas de Ligua y Petorca.

2.6.1.3 Organizaciones sociales

La Provincia de Petorca aglutina una diversidad de organizaciones centradas en la disponibilidad y gestión del agua, debido a que la falta de este recurso amenaza su supervivencia. Muchas de estas organizaciones se reúnen en Cabildos por el Agua que surgieron antes del “estallido social” de octubre de 2019 en el país, como una forma de vincular el interés por el agua con la sociedad civil y los territorios, los que en el contexto del “estallido social”, se han desarrollado con mayor intensidad. El Movimiento por el Agua y los Territorios (MAT), ha organizado diversos cabildos en donde se dialoga sobre la relación entre vida, Estado, territorios y agua.

Una de las organizaciones civiles más conocidas del territorio y de Chile es el Movimiento Defensa por el Agua, Tierra y Medio Ambiente (MODATIMA), agrupación social creado en 2011 que aglutina profesionales, agricultores, dueñas de casa, comerciantes, jóvenes y estudiantes buscando soluciones al problema del agua en la provincia y en Chile. Rodrigo Mundaca, su principal dirigente y vocero, obtuvo el año 2019 el Premio Internacional de Derechos Humanos de Nuremberg por segunda vez por su lucha por el acceso libre al agua en Petorca. Esta organización forma parte de una también llamada Mesa de Agua conformada por organizaciones sociales, ONGs y académicos.

Otras organizaciones como Escuela Agroecológica Germinar, y diversas ONG a nivel nacional han participado también en algún momento de las discusiones respecto a los recursos hídricos en Petorca y La Ligua, destacando El Observatorio Latinoamericano de Conflictos Ambientales, quienes apoyan a los movimientos sociales desde una perspectiva técnico-ambiental. La ONG Chile Sustentable, asimismo, ha contribuido con el

movimiento social a través de apoyo técnico-legislativo, en donde destaca la publicación del documento "Los conflictos por el agua en Chile" (2012), que ha permitido ordenar la dispersa agenda de los movimientos sociales.

Además de las organizaciones de la sociedad civil son importantes en la provincia la Asociación Gremial de Petorca (AGAPE) que aglutina a productores agrícolas, Asociación de Agricultores de Petorca (AGROPETORCA) también asociación agrícola, y la Fundación para el Desarrollo de Petorca (FODEPE) asociación sin fines de lucro para el apoyo a pequeños agricultores y APRs. Estas dos asociaciones aglutinan al sector frutícola de ambas cuencas, aunque con mayor presencia en La Ligua y concentrado principalmente en cultivos de palto. Sus miembros son también miembros de la CORCASUB (Corporación de Comunidades de Agua Subterráneas) y algunos de ellos conforman FODEPE. AGROPETORCA es la asociación gremial con más antigüedad, mientras que AGAPE es una agrupación más nueva.

2.6.1.4 Relación entre los distintos actores

Abajo se describe brevemente las funciones y relación de los principales actores institucionales a nivel regional y provincial con injerencia en la gestión hídrica en la cuenca de Petorca y Ligua:

- **Dirección General de Agua (DGA):** Servicio Público descentralizado que forma parte de la Administración Central del Estado y depende del MOP. Este ente se encarga de gestionar, verificar y difundir la información hídrica del país, en especial respecto su cantidad y calidad, las personas naturales y jurídicas que están autorizadas a utilizarlas, las obras hidráulicas existentes y la seguridad de las mismas. Tiene una representación regional a través de la Dirección Regional de Aguas y coordina con los intendentes a través del SEREMI de Obras Públicas, representante del Ministerio en la Región. Entre estas coordinaciones
- **Dirección de Obras Hidráulicas (DOH):** Servicio Público descentralizado dependiente del MOP tiene como misión el proveer de servicios de infraestructura hidráulica que permitan el óptimo aprovechamiento del agua y la protección del territorio y de las personas. Tiene una representación regional a través de la Dirección Regional de Obras Hidráulicas y coordina con los intendentes a través del SEREMI de Obras Públicas, representante del Ministerio en la Región. Por Ley N° 20.998 de Servicios Sanitarios Rurales en vigencia el 20 de noviembre del 2021, se crea la Subdirección de Servicios Sanitarios Rurales con nuevas funciones entre las cuales se destaca la ejecución de la política de asistencia y promoción de las organizaciones sociales, capacitando, apoyando, asistiendo y asesorando a los servicios sanitarios rurales, en el proceso de implementación de la Ley y en el pleno funcionamiento de los Servicios Sanitarios Rurales del país.
- **Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS):** Es el organismo normativo y fiscalizador de las empresas concesionarias que prestan los servicios de agua potable y alcantarillado. Por Ley N° 20.998 de Servicios Sanitarios Rurales en vigencia el 20 de noviembre del 2021, se crea la Subdirección de Servicios Sanitarios Rurales que asistirá a las organizaciones sociales que son los operadores y administradores de los servicios sanitarios en zonas rurales.

- **Comisión Nacional de Riego (CNR):** servicio del MINAGRI con el mandato de asegurar el incremento y mejoramiento de la superficie regada del país a través de Ley N°18.450 de Fomento a la Inversión Privada en Obras de Riego y Drenaje. Debido a esta función es el ente que más asesora y coordina a las OUA's en mejoramiento de riego y promoción del desarrollo agrícola. En los últimos años ha tomado también la tarea de fortalecer la gestión y estructura de las OUA's y no solo así la infraestructura. Su oficina regional coordina con el SEREMI y las instituciones regionales dependientes de la Intendencia.
- **Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP):** tiene por objetivo fomentar y apoyar el desarrollo productivo y sustentable de la pequeña agricultura a través de sus programas y servicios de apoyo tecnológico y capacitación comercial, empresarial y organizacional a la agricultura familiar campesina.
- **Corporación de Fomento de la Producción (CORFO):** servicio público descentralizado, con patrimonio propio y personalidad jurídica que trabaja a lo largo de todo Chile, apoyando el emprendimiento, la innovación y la competitividad para contribuir al desarrollo económico del país. Por su rol en la innovación se han vinculado con las Organizaciones de Usuarios de Agua en el financiamiento de tecnología e infraestructura para la gestión del Agua. Recientemente financiaron un Programa territoriales integrados (PTI) para la Provincia de Petorca.
- **Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN):** es un instituto tecnológico que genera y gestiona información y conocimiento sobre los recursos naturales y productivos del país, mediante el uso de tecnologías de información y aplicaciones geoespaciales,
- **Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA):** es la institución de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) vinculada al Ministerio de Agricultura de Chile, líder en el desarrollo agroalimentario sostenible, creando valor y proponiendo soluciones tecnológicas en beneficio de los agricultores y agricultoras, socios y socias estratégicas, y sociedad.
- **SEREMIAS.** los ministerios se desconcentran territorialmente mediante secretarías regionales ministeriales y están a cargo de un secretario regional ministerial -conocido como SEREMI. Estos tienen por objetivo coordinar, supervigilar y fiscalizar los servicios regionales dependientes del Ministerio, pero al mismo tiempo es colaborador directo del Gobernador Regional.
 - **SEREMI OBRAS PÚBLICAS:** En el último tiempo la SEREMIA de Obras Públicas a ejecutado un proceso de coordinación fuerte con el sector productivo y otras SEREMI como la de agricultura para enfrentar la sequía y escasez de agua.
 - **SEREMI AGRICULTURA:** Este ente también se encuentra coordinando soluciones tecnológicas al problema del agua con el sector productivo, especialmente las agrupaciones de productores, pero también con CORFO.
 - **SEREMI MEDIO AMBIENTE:** Esta es una institución importante para el nivel local, en especial por su apoyo a la Oficina de Asuntos hídricos dependiente del Gobierno Municipal.
- **Gobierno Municipal:** El gobierno municipal cuenta con distintos departamentos de planificación y una unidad de emergencia que son importantes en el tema hídrico. Pero más importante es la Oficina de Asuntos hídricos inaugurada el 2016,

con el objetivo de abordar los problemas de coordinación e integración de las políticas públicas sectoriales en materia territorial y del agua especialmente con las APR, promover la participación comunitaria, proporcionar información y orientación para la gestión y el desarrollo de acciones que permitan asegurar el acceso al agua, tanto en cantidad como en calidad. Esta oficina fue el resultado del proyecto "Sistemas Participativos de Gestión del Agua y Desarrollo Socio-Económico Sustentable de la cuenca alta del río Petorca".

Además del rol que cumplen las instituciones públicas, existen organismos privados que han participado de la gestión del agua y presentan relaciones entre sí. Por ejemplo, la CORCASUB, participa de la oficina hídrica quienes en conjunto han liderado proyectos para la solución a la escasez de agua potable rural en la provincia, como por ejemplo la aducción Hierro Viejo que fue desarrollada en conjunto con la Subdirección Regional, la Seremía de Obras Públicas, la mesa regional de APR, la municipalidad y la DOH.

Además existen la Unión de agua potable Rural en donde se realizan distintas actividades para fortalecer las capacidades de las APR existentes en la provincia, como la realización de las denominadas "Mingas del Agua". Esta iniciativa busca construir de forma artesanal el sistema de redes de agua potable, con todos los estándares que establecen las normas vigentes y los proyectos DOH¹⁰.

En la se puede apreciar esquemáticamente la relación entre las distintas instituciones gubernamentales y organismos privados en las cuencas de Ligua y Petorca.

¹⁰ <https://www.aguaparatodos.cl/>

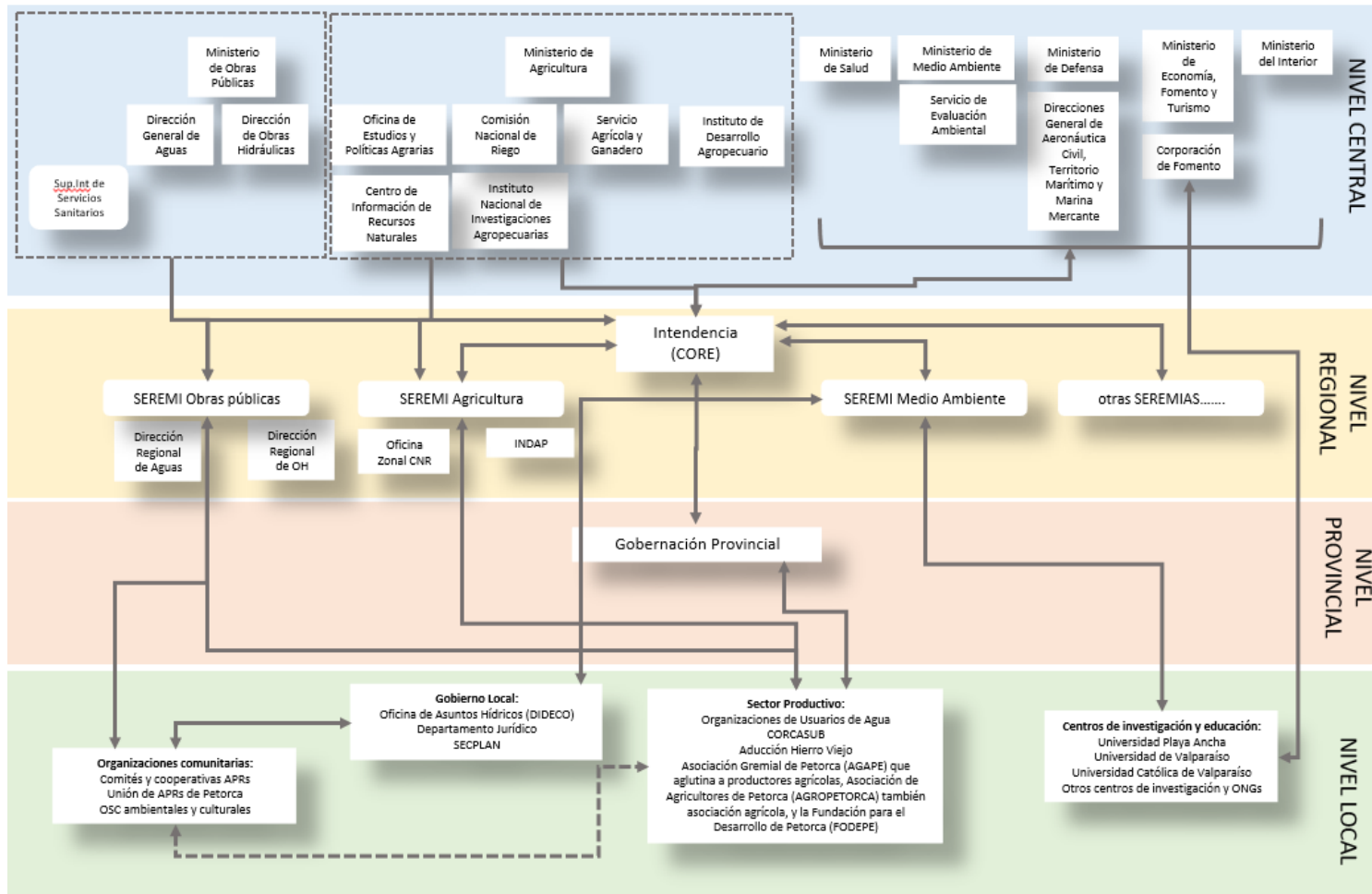


Figura 2-29 Institucionalidad actual del agua en las cuencas de los ríos Ligua y Petorca y la relación entre los distintos actores

Fuente: elaboración propia (anexo J Descripción y Diagnóstico, Capítulo 1.6 y Anexo I Procesos participativos)

3. DEMANDA

Las cuencas de los ríos Ligua y Petorca presentan un marcado uso agrícola y en menor medida consumo humano y rural. Si bien existen otros usos como el minero y el industrial, estos presentan consumos bastante menores respecto a los dos primeros. En adelante se detallarán las demandas identificadas en este estudio.

3.1 Consumo Humano

El consumo de agua potable en ambas cuencas es principalmente rural. En esta cuenca existen 58 SSR MOP y no MOP. De las SSR MOP éstas se encuentran distribuidos principalmente a lo largo de los propios cauces (Figura 3-2). El Agua Potable Urbana se ve representada principalmente por las localidades de la Ligua, Petorca y Cabildo.

Las demandas de consumo humano se determinaron a partir de la dotación anual dada por la DOH (79 m³/año/hab) multiplicada por la población. En forma análoga se determinaron las demandas proyectadas a partir de esta misma dotación y una población futura proyectada (Figura 3-1)

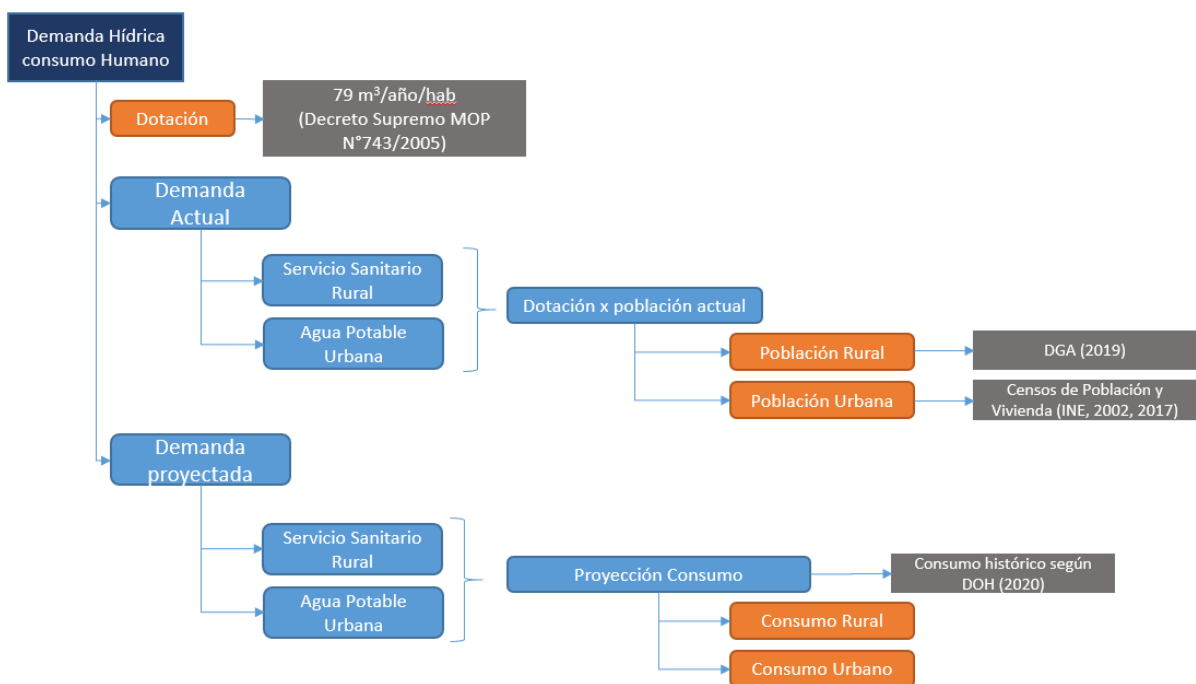


Figura 3-1 Esquema metodológico de determinación de las demandas de agua potable rural y urbana para la condición actual y proyectada.

Fuente: elaboración propia (Ver anexo F, aspectos metodológicos)

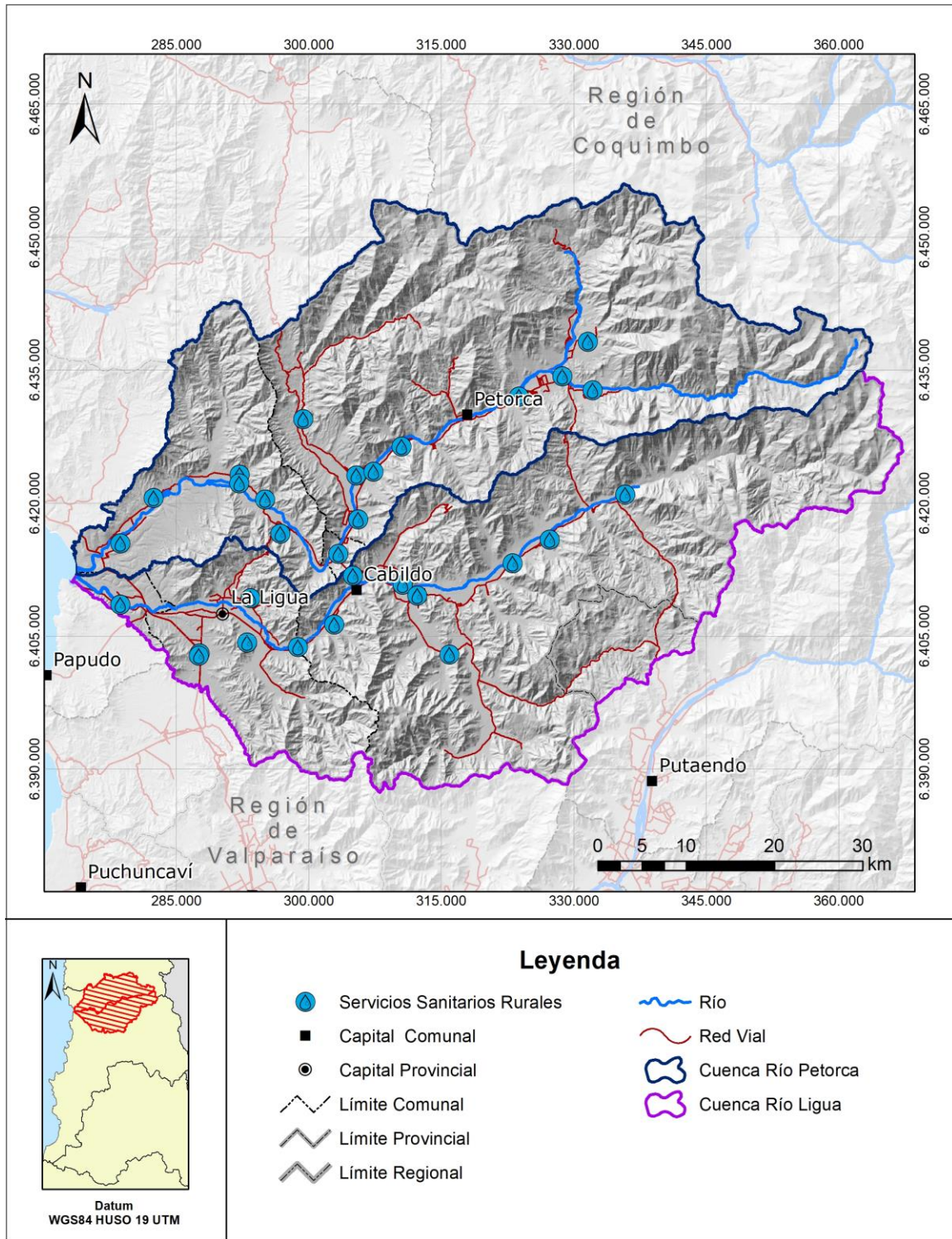


Figura 3-2 Distribución espacial de los Servicios Sanitarios Rurales MOP en las cuencas Río Ligua y Río Petorca

Fuente: elaboración propia en base a datos DGA 2020.

3.1.1 Actual

En la Tabla 3-1 se presenta el consumo en miles de m³ (Mm³) de agua potable por SHAC y si el consumo corresponde a rural o urbano en cada cuenca.

Tabla 3-1 Demanda hídrica actual de Consumo de agua potable por SHAC (Mm³/año), año 2019

Cuenca	SHAC	Rural	Urbana
Río La Ligua	Estero Alicahue	37,13	N/A
	La Ligua Oriente	633,98	N/A
	Estero Los Ángeles	117,32	N/A
	La Ligua Cabildo	212,91	1240*
	Estero Pataguas	70,71	N/A
	La Ligua Pueblo	1276,32	2332,35**
	La Ligua Costa	16,99	N/A
Total (Mm ³ /año)		2365,36	3572,35
Río Petorca	Río del Pedernal	91,01	N/A
	Río del Sobrante	164,72	N/A
	Petorca Oriente	687,46	692,04***
	Estero Las Palmas	55,3	N/A
	Petorca Poniente	545,65	N/A
Total (Mm ³ /año)		1544,14	692,04

(*) Hace referencia a la ciudad de Cabildo

(**) Hace referencia a la ciudad de La Ligua

(***) Hace referencia a la ciudad de Petorca

Fuente: elaboración propia en base a datos DGA 2020.

Cabe mencionar que para estimar el consumo humano de agua se consideró una dotación de 79 [m³/año/hab] (Según Decreto Supremo MOP N°743/2005) en las APR. Además de la población establecida según (DGA, 2019). La población urbana se obtuvo a partir de la

información recopilada desde los Censos de Población y Vivienda (INE, 2002, 2017). El detalle de la metodología aplicada se encuentra en el anexo F Aspectos Metodológicos, acápite 2.1.

3.1.2 Histórico

La Figura 3-3 presenta la evolución histórica del consumo de agua potable, tanto rural (APR) como urbano (APU). Se aprecia que el consumo urbano ha presentado un crecimiento sostenido, pasando de 3.500 Mm³ al año en 1980, a más de 4.500 en el 2015. En el mismo período, el consumo de agua potable rural pasó de poco menos de 3.000 Mm³ a poco más de 3.500 Mm³.

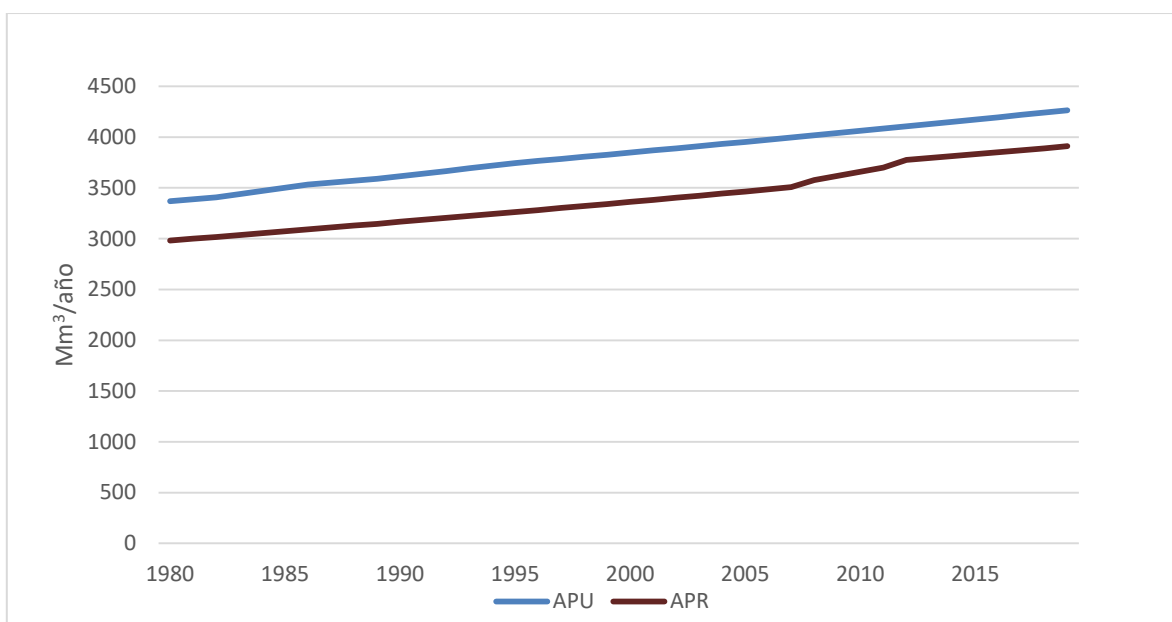


Figura 3-3 Evolución histórica de consumo de agua potable

Fuente: elaboración propia en base a datos DOH, 2020.

3.1.3 Proyectado

Teniendo en cuenta la evolución histórica, a continuación, en la Figura 3-4 se presenta la proyección del consumo de agua potable, tanto rural como urbana.

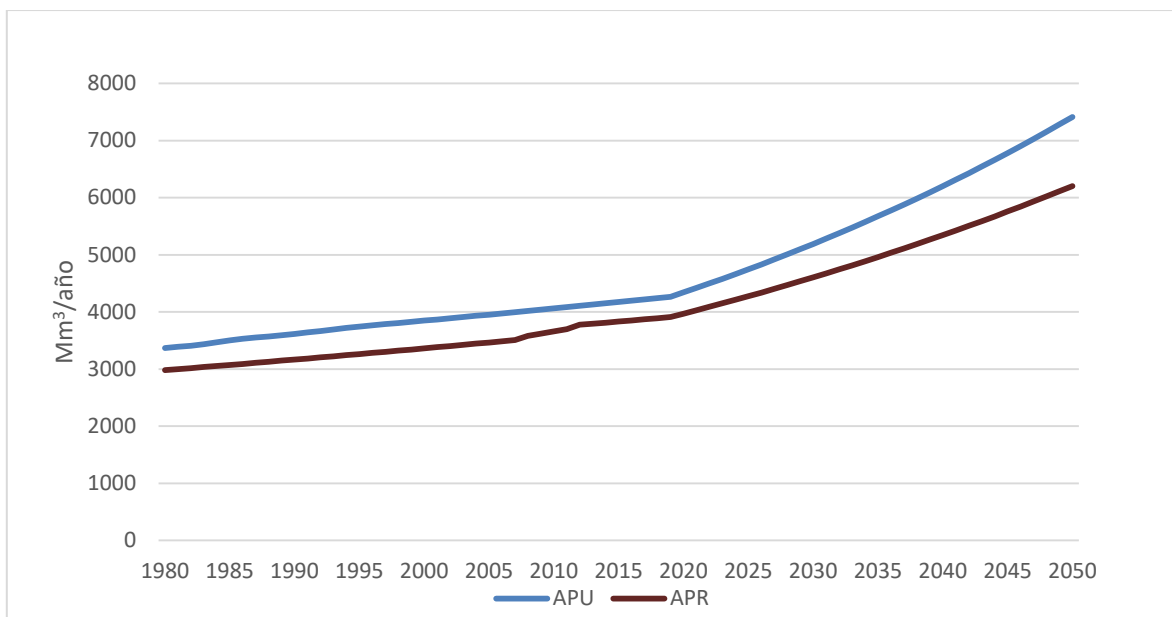


Figura 3-4 Evolución histórica y proyectada de consumo de agua potable.

Fuente: elaboración propia, a partir de (DGA, 2019).

Cabe mencionar que para estimar la proyección del consumo humano de agua se consideró una dotación de 79 [m³/año/hab] (Según Decreto Supremo MOP N°743/2005) por APR. En la Tabla 4-2 la población y las demandas estimadas para los años 2030 y 2050. Para la proyección de la población se consideró un crecimiento variante por APR y APU entre 1 y 2% anual (DGA, 2019).

La demanda de agua para consumo humano proyectada a los años 2030 y 2050 se presenta en la Tabla 3-2. En relación a las gráficas del punto anterior, se espera un crecimiento marginal del consumo rural, desde 4.000 [Mm³] al año, hasta casi 5.000 [Mm³] en el año 2050

Tabla 3-2 Demanda hídrica proyectada de consumo de agua potable rural y urbana por SHAC (Mm³/año), años 2030-2050.

Cuenca	SHAC	Rural		Urbana	
		2030	2050	2030	2050
Río La Ligua	Estero Alicahue	43,74	58,91	N/A	N/A
	La Ligua Oriente	746,79	1005,82	N/A	N/A
	Estero Los Ángeles	138,19	186,12	N/A	N/A
	La Ligua Cabildo	250,79	337,78	1460,66	1967,29
	Estero Pataguas	83,29	112,18	N/A	N/A
	La Ligua Pueblo	1503,44	2024,92	2747,39	3700,33
	La Ligua Costa	20,01	26,95	N/A	N/A
Río Petorca	Río del Pedernal	107,20	144,39	N/A	N/A
	Río del Sobrante	194,03	261,32	N/A	N/A
	Petorca Oriente	809,79	1090,67	815,19	1097,94
	Estero Las Palmas	65,14	87,73	N/A	N/A
	Petorca Poniente	642,75	865,69	N/A	N/A
	Total (Mm ³ /año)	4605,16	6202,48	5023,23	6765,57

N/A: No Aplica puesto que no hay agua potable urbana en dichas comunas.

Fuente: elaboración propia en base a datos DOH, 2020.

3.1.4 Eficiencia del uso

La eficiencia del uso en sistema de abastecimiento de agua potable para consumo humano fue posible considerarla, asumiendo un consumo de un 30%, y por lo tanto un retorno del 70% al acuífero, el cual tiene incorporadas las pérdidas por conducción (DGA 2019a).

3.2 Demandas Ambientales

En esta demanda se identifican dos tipos de demandas ambientales, la demanda por ecosistema terrestre y la demanda por ecosistema acuático.

Las demandas terrestres fueron obtenidas mediante la modelación de la demanda evapotranspirativa de la vegetación, mientras que la demanda de sistemas acuáticos fue estimada como el caudal ecológico mínima según la minuta 14 (DGA, 2009).

3.2.1 Demanda Evapotranspiración

En estas dos cuencas, la principal demanda del recurso hídrico proviene por la evapotranspiración de la vegetación silvestre. En el caso de la cuenca del río Ligua, la evapotranspiración potencial corresponde a valores cercanos del 80% de los niveles de precipitación (Figura 3-5).

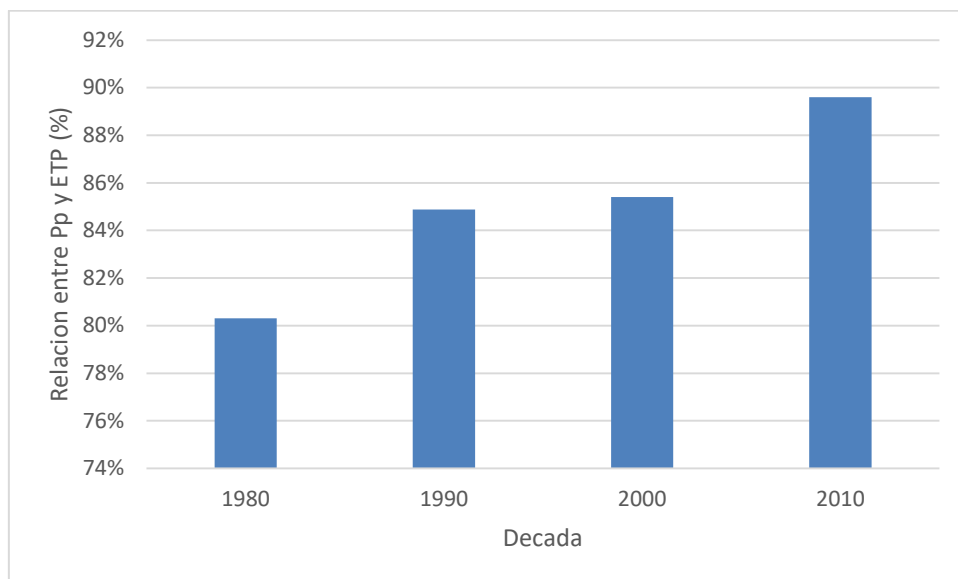


Figura 3-5 Relación porcentual de la evapotranspiración de vegetación silvestre respecto a los niveles de precipitación en la cuenca del río Ligua.

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación Integrada)

De la Figura 3-5 se aprecia que la relación ETP/Pp aumenta hacia las décadas más actuales, lo que no necesariamente se traduce en una mayor cantidad de recurso hídrico utilizada, ya que hay que recordar que los niveles de precipitación han disminuido en esta cuenca.

En la cuenca del río Petorca, la situación es similar, con relaciones de ETP/Pp en torno a los 85% en la última década (Figura 3-6).

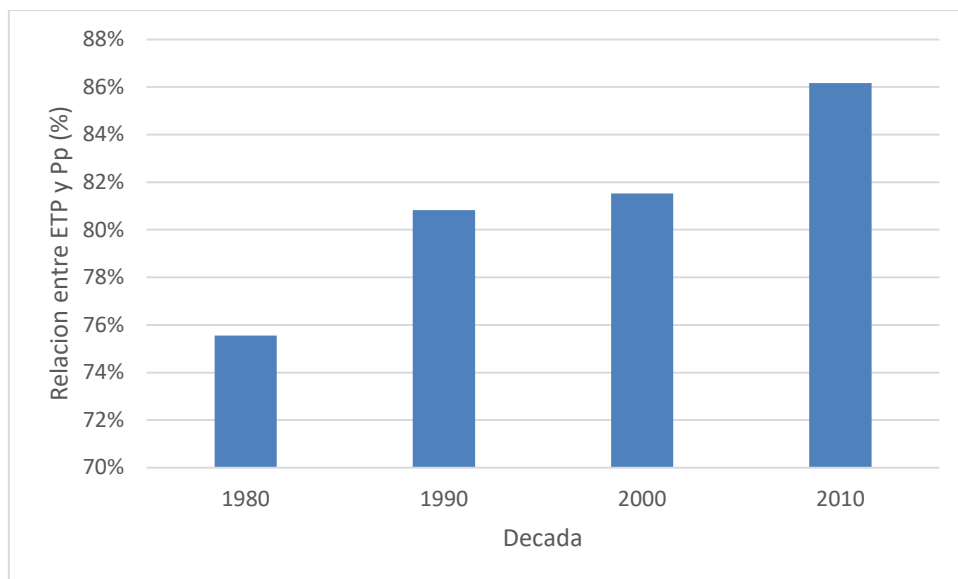


Figura 3-6 Relación porcentual de la evapotranspiración de vegetación silvestre respecto a los niveles de precipitación en la cuenca del río Petorca.

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación Integrada).

De esta figura se aprecia que la relación ETP/Pp aumenta hacia las décadas más actuales, lo que no necesariamente se traduce en una mayor cantidad de recurso hídrico utilizada, ya que hay que recordar que los niveles de precipitación han disminuido en esta cuenca.

3.2.2 Caudal ecológico

Para determinar el caudal ecológico se consideró la determinación de su valor siguiendo los criterios estipulados en el DS N°14 del Ministerio del Medio Ambiente, "Reglamento para la determinación del Caudal Ecológico Mínimo" del año 2013 y actualizado en el año 2015 por el DS N°71.

Considerando la situación de derechos del proyecto actual, en dicho documento se indica que "Para aquellos cauces donde se constituyeron derechos con un caudal ecológico mínimo del menor 50% del caudal con 95% de probabilidad de excedencia, se considerará como caudal ecológico mínimo el 50% del caudal con 95% de probabilidad de excedencia para cada mes, con las restricciones siguientes:

- I. Para aquellos meses, en los cuales el 50% del caudal con 95% de probabilidad de excedencia es menor al 20% del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo será el 50% del caudal con probabilidad de excedencia del 95%.

- II. Para aquellos meses, en los cuales el 50% del caudal con 95% de probabilidad de excedencia es mayor al 20% del caudal medio anual, el caudal ecológico mínimo, en esos meses, será el 20% del caudal medio anual.

Debido al elevado nivel de alteración del régimen hidrológico en ambos ríos, llegando a estar secos gran parte del año, el caudal ecológico mínimo a partir de las series hidrológicas resultantes del Balance Hídrico Nacional DGA (2019), de esta forma el caudal ecológico puede ser entendido que fue determinado considerando el régimen hidrológico natural.

Estas series fueron determinadas a la salida de cada SHAC pertenecientes a la cuenca en análisis y se determinó la Curva de Variación Estacional (CVE). Las series de régimen hidrológico en régimen natural se pueden ver en el Anexo J Descripción y diagnóstico, capítulo 1.4.2.

El caudal ecológico resultante para la salida de los SHAC's de ambas cuencas se presenta a continuación en la Figura 3-7.

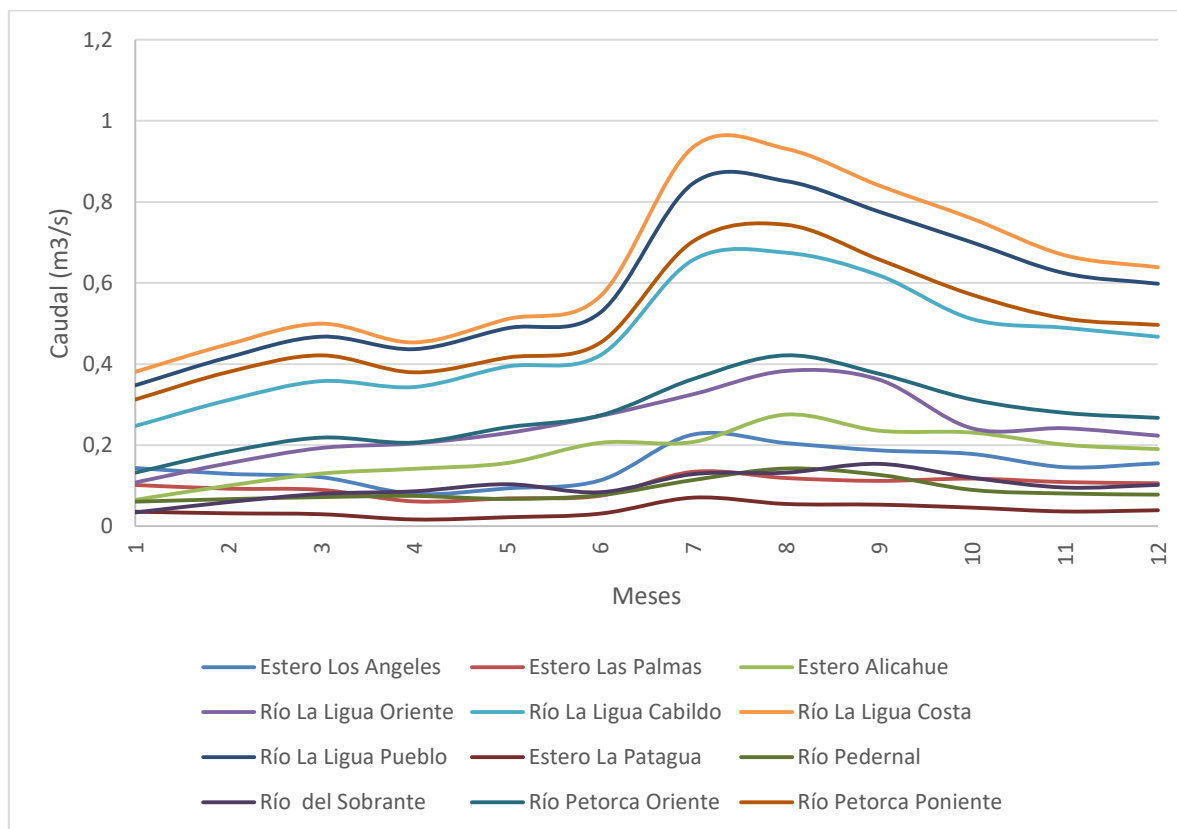


Figura 3-7 Caudal ecológico mensual, SHACs de las cuencas río La Ligua y Petorca.

Fuente: elaboración propia a partir de datos del Balance Hídrico Nacional DGA (2019).

De la figura anterior, se aprecia que el régimen de caudal ecológico mínimo sigue el régimen esperado, con mayores caudales en invierno (entre julio y agosto) y en los SHAC's en el sector de cabecera presentan un derretimiento de la nieve que se acumula en la zona alta de las cuencas.

3.3 Demanda Agrícola

3.3.1 Demanda actual

La demanda neta agrícola calculada en base a la actualización del uso del suelo 2018 (ver Anexo J Descripción y Diagnóstico, Capítulo 2, Apéndice J.2.2), en la cual se ha estimado que hay 15.363 há bajo riego en la cuenca del río Ligua y 9936 há bajo riego en la cuenca del río Petorca. En la Figura 3-8 se presenta los distintos cultivos modelados para las 2 cuencas.

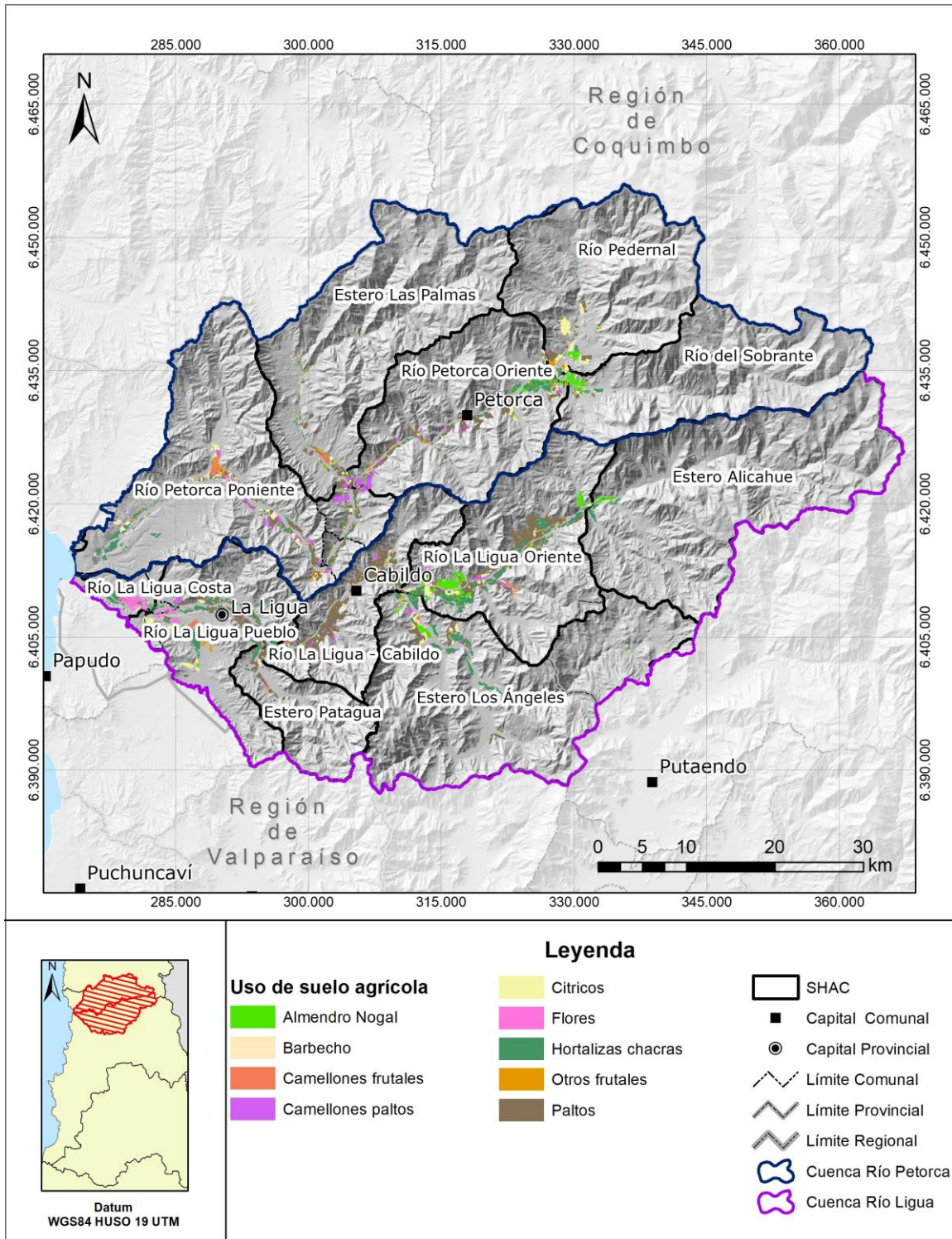


Figura 3-8 Zona de riego modeladas por cultivos.

Fuente: elaboración propia a partir de actualización del uso de suelo, 2018

De los resultados obtenidos del modelo WEAP, la demanda agrícola actual de las demandas para la cuenca del río Ligua es de **156,5 [Hm³]** promedio para toda la cuenca en el año hidrológico 2017/18, mientras que para la cuenca del río Petorca es de **92,2 [Hm³]**. En la Figura 3-9 se presenta la variación de la demanda agrícola real para el año hidrológico 2017/18 en las cuencas La Ligua y Petorca. El detalle de cómo se obtuvo la demanda agrícola actual se puede encontrar en el anexo F "Aspectos Metodológicos", acápite 2.1.1.4.



Figura 3-9 Demanda agrícola real para el año 2018 en las cuencas La Ligua y Petorca.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de la modelación integrada (ver Anexo H Modelación Integrada).

3.3.2 Valores de Coeficientes de cultivos

La demanda agrícola varía por cultivos dependiendo de los coeficientes de cultivo "kc", A continuación, en la Figura 3-10 se presentan los coeficientes de cultivos utilizados en la modelación WEAP-MODFLOW.

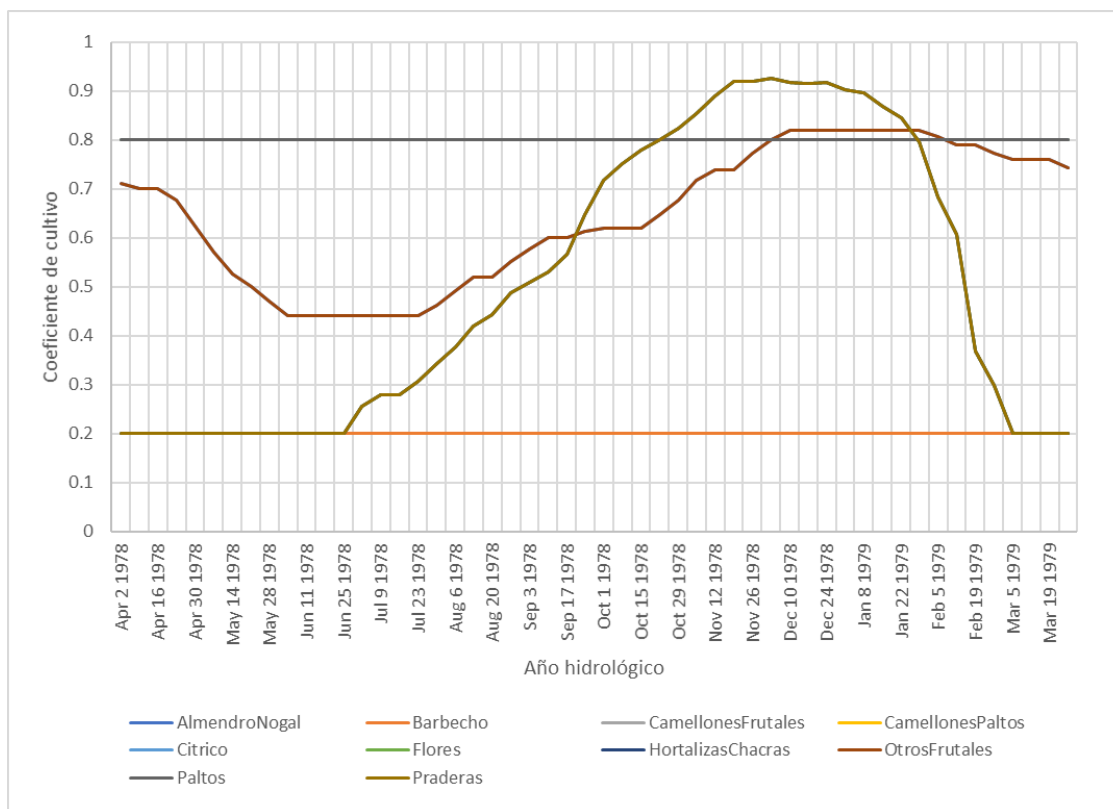


Figura 3-10. Valores de coeficiente de cultivo "Kc" utilizados en la modelación WEAP-MODFLOW.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de la modelación integrada (ver Anexo H Modelación Integrada, capítulo 2).

Teniendo en cuenta los coeficientes de cultivos y el riego efectuado se puede obtener la evapotranspiración de la zona de riego. A continuación, en la Figura 3-11 y Figura 3-12 se presenta la evapotranspiración de la zona de riego para la cuenca de río La Ligua y río Petorca, respectivamente. Se puede observar que a medida que pasa el tiempo y la superficie de riego aumenta la evapotranspiración aumenta considerablemente.

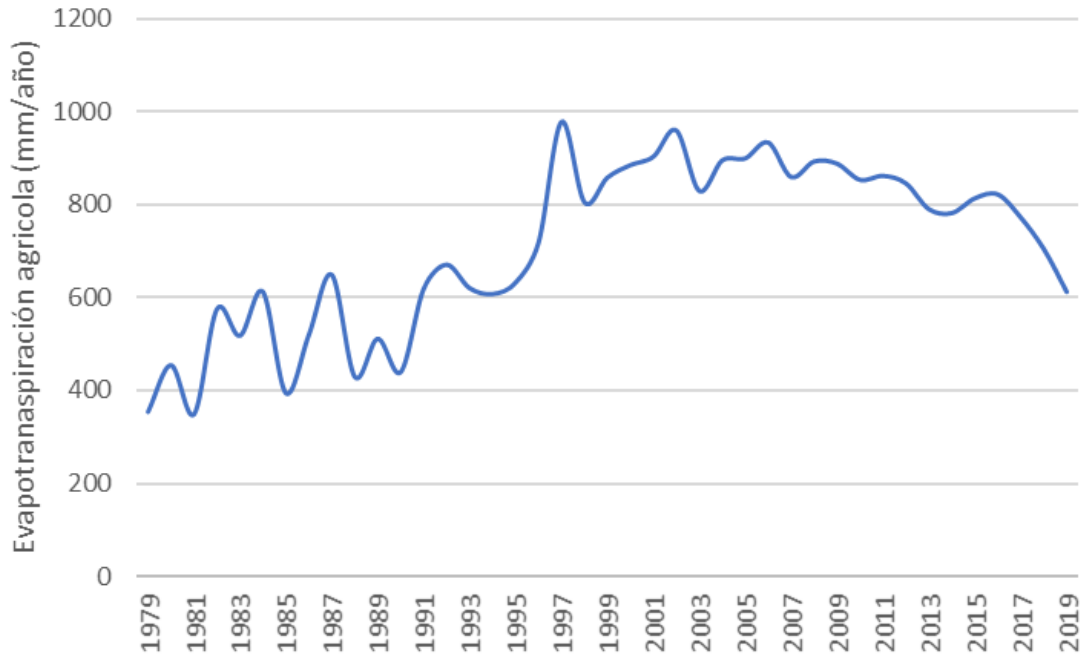


Figura 3-11. Evapotranspiración anual de cultivos, cuenca río La Ligua

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de la modelación integrada (ver Anexo H Modelación Integrada, capítulo 2).

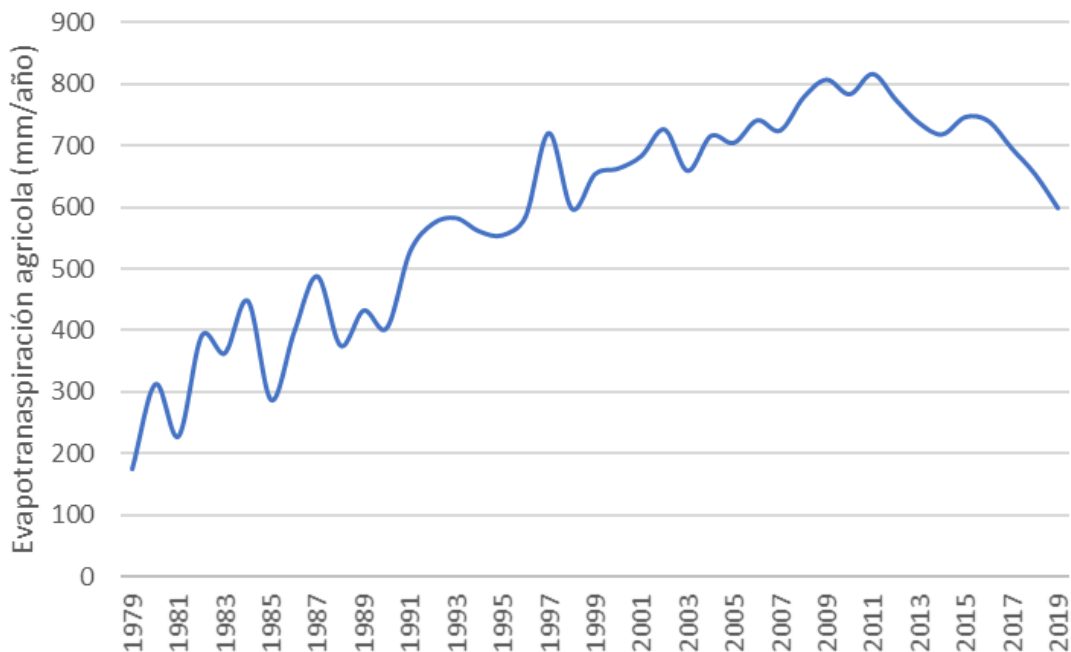


Figura 3-12. Evapotranspiración anual de cultivos, cuenca río Petorca

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de la modelación integrada (ver Anexo H Modelación Integrada, capítulo 2).

3.3.3 Demanda Histórica

La demanda de agua agrícola ha ido aumentando en forma sostenida desde el año 1985 aproximadamente con demandas de 100 Hm³ hasta las demandas actuales del orden de 200 Hm³ entre ambas cuencas. Ambas cuencas han aumentado en forma similar la demanda agrícola (Figura 3-13).

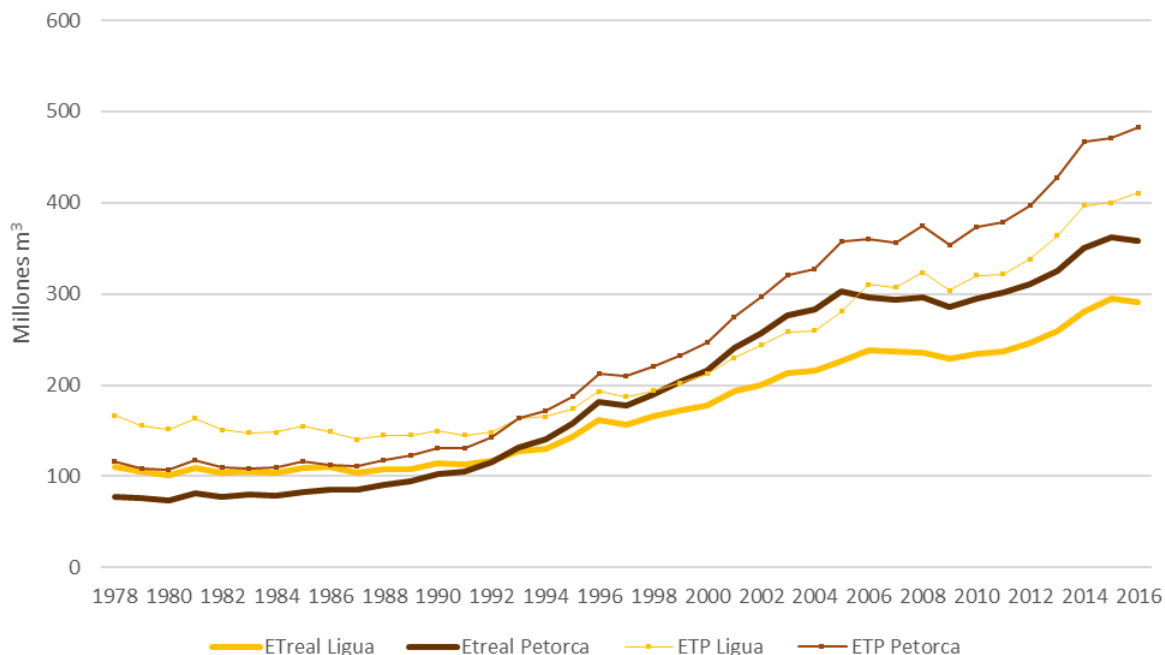


Figura 3-13 Demanda agrícola real y potencial histórica en las cuencas La Ligua y Petorca.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de la modelación integrada (ver Anexo Modelación Hidrológica acoplada, capítulo 2).

3.3.4 Demanda proyectada

A pesar de este crecimiento sostenido de la superficie agrícola en el periodo histórico, se consideró que la demanda futura no sufre un aumento respecto a la demanda actual al 2019, es decir, manteniendo la superficie actual para Ligua (15.363 há) y para Petorca (9.963 há). El motivo de esta decisión fue que de acuerdo a salidas a terreno y en conversaciones con agricultores de la cuenca fue posible apreciar que bajo las condiciones hidrológicas actuales muchos de ellos debieron reducir la superficie de cultivo, ya que la disponibilidad hídrica, no era suficiente para mantener los cultivos actuales. Esto puede generar que la superficie actual determinada esté sobreestimada y deberá ser corregida cuando se realice un catastro más exhaustivo.

3.3.5 Eficiencia del uso

La eficiencia de uso en el caso de la demanda agrícola considera dos aspectos: distribución y eficiencia de riego intrapredial.

Respecto al sistema de distribución, según criterio de experto, para canales de hormigón se consideró un 10% de pérdidas y para canales de tierra, un 60%.

Para el caso de las eficiencias de riego intrapredial, fue posible evaluarlas haciendo uso del modelo WEAP, donde la modelación de demandas de cultivo se realizó en base a los

requerimientos evapotranspirativos en las zonas agrícolas, los cuales no tienen la opción de dejar como parámetro la eficiencia de riego. En este caso, la eficiencia se calcula en cada paso de tiempo como la relación entre la evapotranspiración de los cultivos y los volúmenes de riego sin incluir la precipitación.

Este cálculo depende entre otros, de la conductividad hidráulica del suelo, el cual se asume en valores pequeños para los cultivos regados con riego tecnificado y valores un poco mayores para el caso de riego tradicional. En este caso se está modificando un parámetro de base física (conductividad hidráulica saturada de la zona de raíces) para poder simular tecnologías de riego. Esto es posible dado el carácter conceptual del modelo WEAP. Mayor detalle sobre este procedimiento se puede encontrar en el Anexo H Modelación hidrológica acoplada.

En el caso de no haber precipitaciones en el *time-step*, el coeficiente RRF (factor de resistencia a la escorrentía) se deja con un valor alto (30) de manera de permitir que el agua de riego no se pierda como flujo superficial o se pierda una fracción menor. Además, en esas semanas, el riego se suprime de manera de simular el comportamiento de los agricultores, que en general riegan menos o no riegan nada en períodos de precipitaciones.

En base a estas consideraciones, las eficiencias de riego se calcularon para el periodo histórico y se muestran en la Figura 3-14 y en la Figura 3-15 para los ríos Ligua y Petorca, respectivamente:

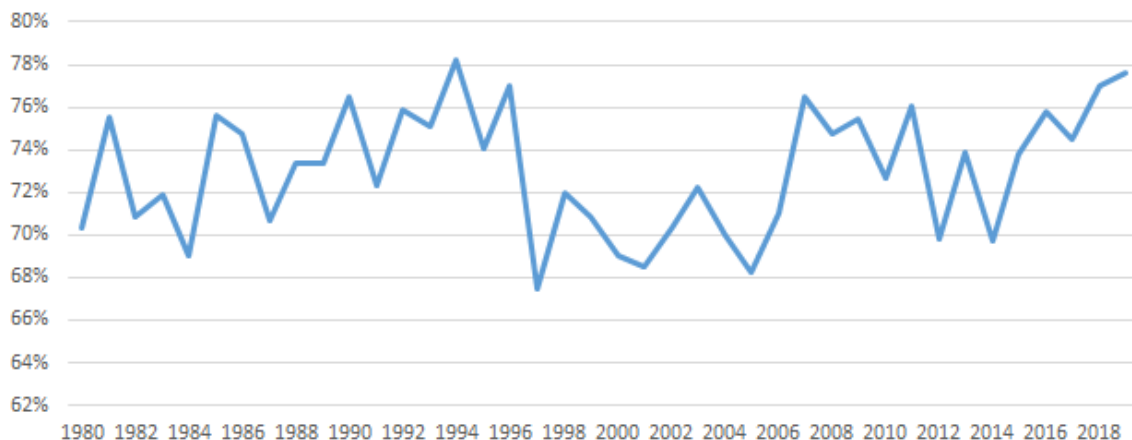


Figura 3-14 Eficiencia de riego intrapredial, río La Ligua.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de modelación hidrológica acoplada, capítulo 2.

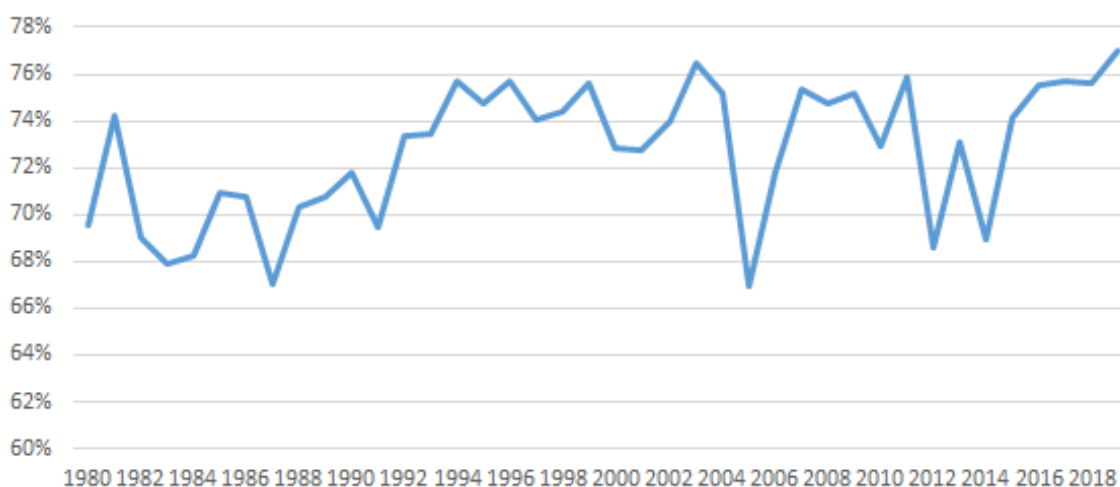


Figura 3-15 Eficiencia de riego intrapredial, río Petorca.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de modelación hidrológica acoplada, capítulo 2.

3.4 Demanda de otros usos

En la cuenca Ligua está presente el uso minero en la subcuenca del estero Los Ángeles. El consumo de estas se idealizó considerando un consumo permanente e igual a los derechos de aprovechamiento otorgados, durante los 365 días del año, y durante todo el día. Además, se supone una tasa de consumo de 100%. La demanda mensual se distribuye proporcionalmente al número de días que tiene cada mes. Las demandas de cada nodo se presentan en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Determinación de las tasas de uso de agua anual para cada nodo de consumo minero en Ligua-Petorca.

Derechos asociados [lt/s]	Tasa de uso anual expuesta en el modelo [m ³ /año]
190	5.991

Fuente: DICTUC S.A., SEI (2019).

4. OFERTA HÍDRICA

4.1 Agua superficial

Luego de más de 10 años de sequía la oferta hídrica a nivel superficial en las dos cuencas es prácticamente nula. Solamente se registran caudales superficiales en el río solamente en las zonas cordilleranas y precordilleranas, específicamente en el Estero Alicahue en la cuenca del río La Ligua y en la subcuenca del río del Sobrante en la cuenca del río Petorca.

En la Figura 4-1 se presenta la curva de variación estacional para distintas probabilidades de excedencia correspondiente a la parte alta del río La Ligua, específicamente en la estación DGA "Estero Alicahue en Colliguay". En la Figura 4-2 se muestran las curvas de variación estacional para la parte alta de la cuenca del río Petorca, específicamente en las estaciones DGA "río Sobrante en Piñadero" y "río Pedernal en Tejada". Aguas abajo de estas estaciones fluviométricas el agua superficial es desviada por las asociaciones de canalistas hacia sus respectivos canales.

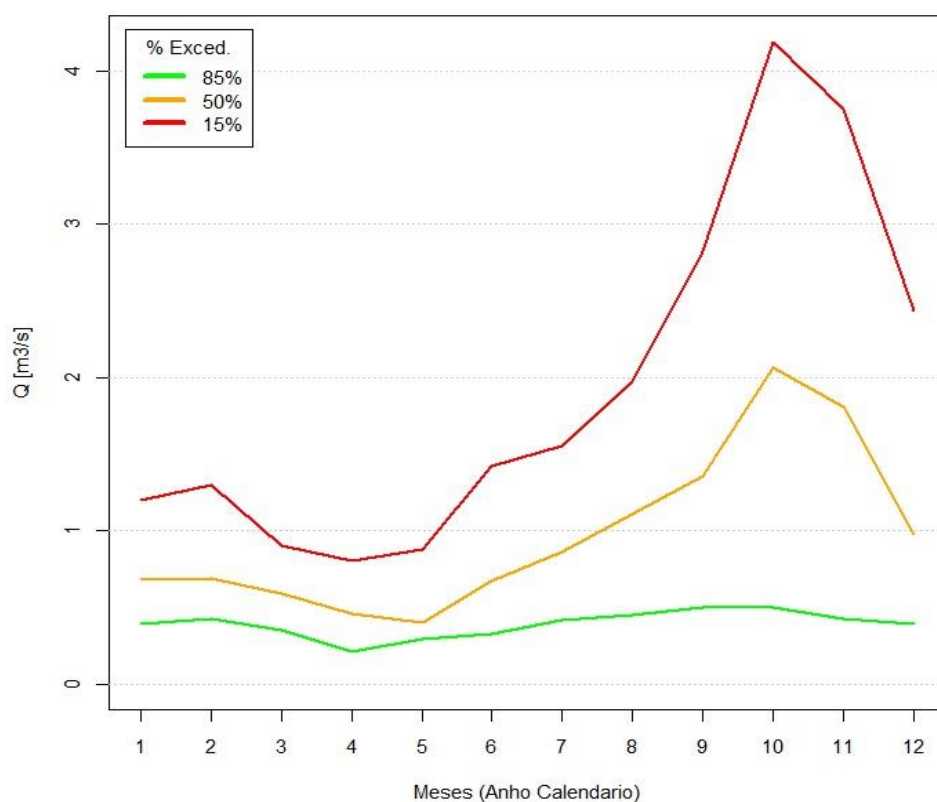


Figura 4-1. Curva de variación estacional, estación fluviométrica "Alicahue en Colliguay", cuenca río La Ligua. Intervalo 1979 -2018.

Fuente: elaboración propia (ver Anexo J Descripción y Diagnóstico, capítulo 5.2.1).

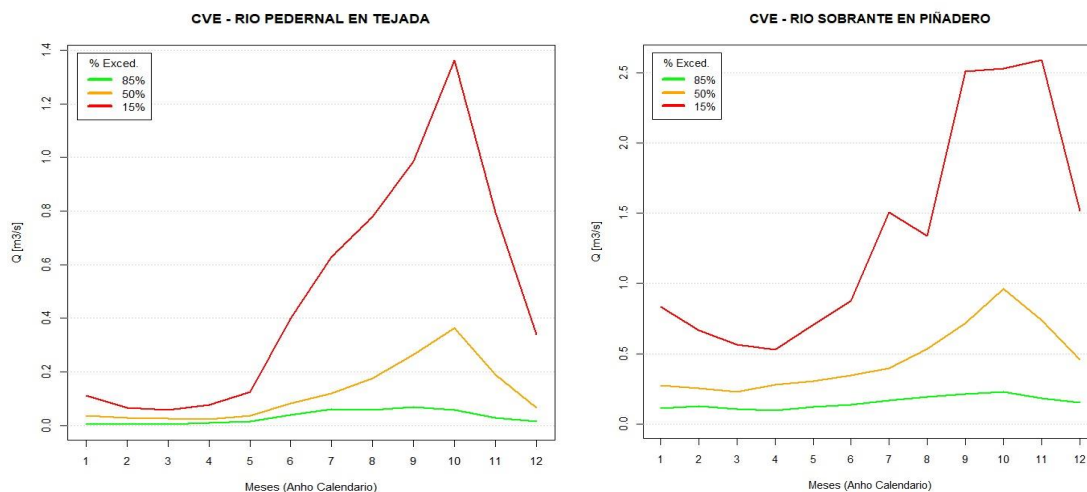


Figura 4-2. Curva de variación estacional, estación fluviométrica “Río Pedernal en Tejada” y “Río sobrante en Piñadero”, cuenca río Petorca. Intervalo 1979 - 2018.

Fuente: Elaboración propia (ver Anexo J Descripción y Diagnóstico, capítulo 5.2.1).

Estos caudales se traducen en una oferta superficial disponible de 24,6 Hm³/año en la cuenca del río Ligua y en Petorca de 30,4 Hm³/año.

En la zona media y baja de ambas cuencas, el caudal superficial es nulo y por lo tanto, también la oferta superficial.

4.1.1 Capacidad física de la cuenca

Debido a la oferta nula existente en la zona media y baja de ambas cuencas, se determinaron los caudales naturales asociados a los SHAC presentes en el sistema Ligua-Petorca, tanto a la entrada del sector como a la salida. Las cuencas Ligua y Petorca son principalmente pluviales con una pequeña componente nival en las subcuencas de cabecera Estero Alicahue y Río del Sobrante (ver Anexo J Descripción y Diagnóstico, capítulo 1.4.2).

La época estival coincide con la época de estiaje con caudales bajos entre los meses de febrero, marzo y comienzos de abril. A pesar de los bajos caudales y la casi exclusiva dependencia de aporte pluvial, el caudal a lo largo del río Ligua y Petorca no es nulo en la parte alta de la cuenca, debiendo presentar un escurrimiento continuo hacia sectores medios y bajos de la cuenca (ver Figura 4-3), sin embargo, y como se señaló previamente, el caudal en estos sectores es nulo actualmente.

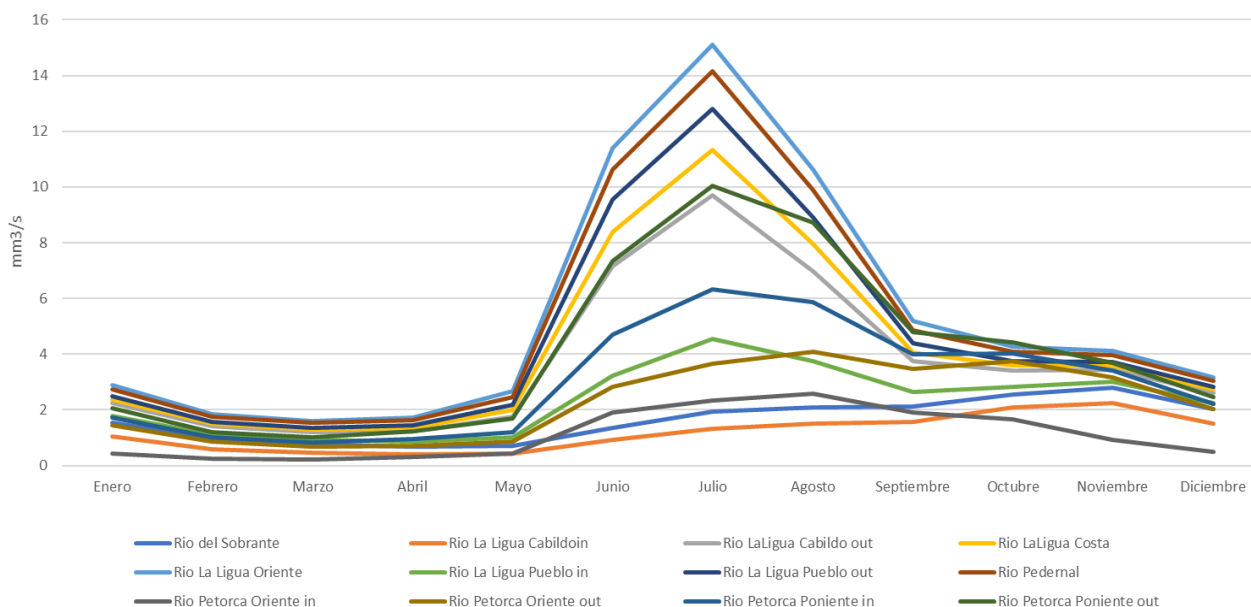


Figura 4-3. Caudal natural en la cuenca del río La Ligua y río Petorca.

Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de modelación integrada (ver Anexo H Modelación Hidrológica acoplada, capítulo 5).

4.1.1.1 Calidad de Aguas

La calidad de agua es un concepto que inicia desde un enfoque antropocéntrico, especialmente reflejado en las normas por tipo de uso. Con el paso del tiempo este concepto comienza a reconocer e integrar su relación con otros elementos de la cuenca y con calidad natural de las aguas. Ahora bien, para conocer la calidad de aguas se establece red de monitoreo.

En la cuenca La Ligua, se inició el monitoreo en el año 1968 en la estación "Río Ligua en Placilla". Se aumentó la red de monitoreo en las décadas siguientes, con ocho estaciones en la década de 1970, dos en la década de 1980s, una en la década de 1990 y una en las 2000s. En 2010, aumentó la red con 8 estaciones de las APR. Se suspendió la estación "Río Ligua en Placilla" en 2002 y la estación "Río Ligua en Puente Panamericana" en 2003. De las 21 estaciones de calidad de aguas, 12 son de aguas superficiales, 8 de aguas subterráneas asociadas a las APR y una adicional de aguas subterráneas bajo la categoría "otra clase".

En la cuenca Petorca, se inició el monitoreo en el año 1968, con las estaciones "Río Pedernal antes Río Sobrante" y "Río Sobrante antes Río Pedernal". Se aumentó la red de monitoreo en las décadas siguientes, con tres en los 70s y dos en los 80s. En 2010, se aumentó la red con nueve estaciones de APR. No hay estaciones suspendidas dentro de la cuenca Petorca. De las 16 estaciones de monitoreo de esta cuenca, siete estaciones son de agua superficial y nueve son de aguas superficiales asociados a las APR.

De la totalidad de estaciones de calidad del agua, vigentes y suspendidas, la toma de muestras no ha sido realizada en forma frecuente, tanto en temporalidad como espacial, lo que ha generado que existan muchos vacíos de información, estaciones con escasa

cantidad de muestras, años vacíos de registros, etc. Por lo tanto, la caracterización estadística pierde sentido, puesto que la comparación se realizaría bajo periodos distintos o bien con escasa cantidad de datos. Por este motivo, se realizaron los diagramas de Piper.

Mediante el análisis de los diagramas de Piper (Figura 4-4) es posible reconocer que las aguas a través la cuenca del río La Ligua varían entre tipo bicarbonatado y tipo bicarbonatado-cálcico. Además, el carácter de las aguas no ha cambiado entre décadas, indicando una estabilidad del tipo de aguas en esta cuenca. Los diagramas Piper indican que las aguas a través la cuenca del río Petorca son de tipos bicarbonatado cálcico, bicarbonatado, mixto y de cloruro de calcio. En comparación a las estaciones de La Ligua, los niveles de cloruro son más bajos. Para mayor información ver el Anexo J Descripción y Diagnóstico (9.2 Calidad del Agua).

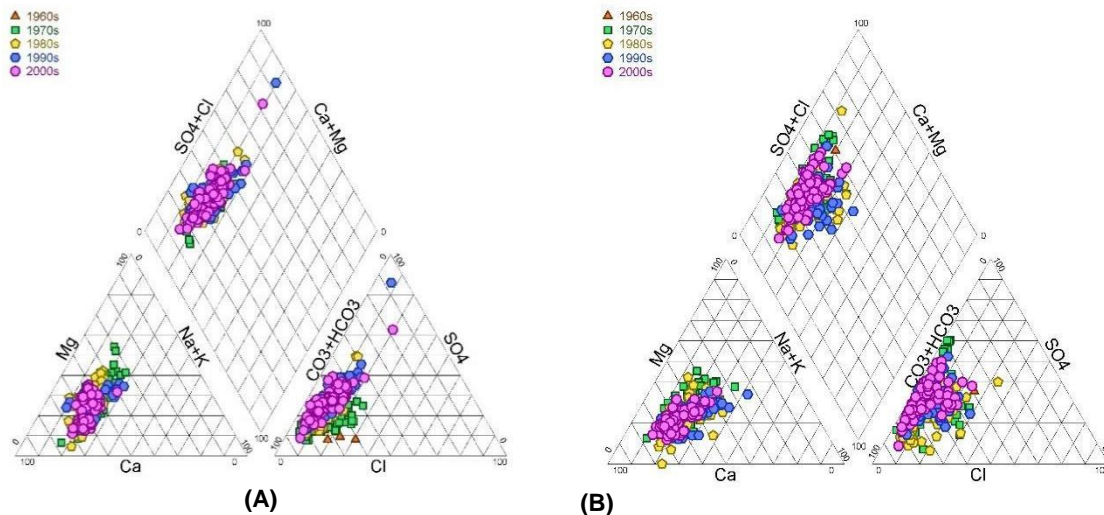


Figura 4-4. Evaluación de la calidad de agua mediante diagrama piper en la (A) cuenca del río La Ligua y (B) cuenca del río Petorca.

Fuente: elaboración propia a partir de los registros de estaciones de monitoreo de la DGA.

Un análisis de la escasa información disponible permitió evaluar el cumplimiento normativo. Para el Aluminio, el análisis a escala decadal realizado indica que todas las estaciones de calidad de agua en La Ligua cumplieron con la normativa NCh1333. Del mismo modo, ocurre en Petorca, donde todas las estaciones de calidad de agua cumplieron con la normativa NCh1333.

Respecto al arsénico, tres estaciones de calidad de agua en La Ligua cumplieron con las normativas NCh409/1 y NCh1333. La estación Río Alicahue en Colliguay (05100001-3) superó el límite de las dos normas una vez, con valor de 6.875 mg/L y superó el límite de NCh409/1 una vez más, con valor de 0.011 mg/L. Tres estaciones de calidad de agua en

Petorca cumplieron con las normativas NCh409/1 y NCh1333. La estación Río Pedernal en Tejada (05211001-7) superó el límite de las dos normas una vez, con valor de 3.235 mg/L. No había muestras de arsénico desde la estación Río Petorca en Petorca (05110001-8) durante la década de 2010.

En el caso del Boro, todas las estaciones cumplieron con la norma NCh1333, tanto para la cuenca del río Ligua como para el río Petorca. Similar situación ocurre para el Cadmio, el cobalto, el cromo, el magnesio, el níquel y el selenio.

En el cloruro, todas las estaciones de calidad de agua en La Ligua cumplieron con las normativas NCh409/1 y NCh1333. Tres estaciones de calidad de agua en Petorca cumplieron con las normativas NCh409/1 y NCh1333. La estación Río Sobrante en Piñadero (05200001-7) cumplió con la norma NCh409/1 y superó el límite de norma NCh1333 una vez, con valor de 318.226 mg/L.

En el cobre, todas las estaciones de calidad de agua en La Ligua cumplieron con las normativas NCh409/1 y NCh1333. Tres estaciones de calidad de agua en Petorca cumplieron con las normativas NCh409/1 y NCh1333. La estación Estero Los Ángeles antes Río Alicahue (05101001-9) cumplió con la norma NCh409/1 y superó el límite de norma NCh1333 una vez, con valor de 0.948 mg/L.

En la conductividad eléctrica, tres estaciones de calidad de agua en La Ligua cumplieron con la norma NCh1333 para la primera categoría (≤ 750 mohs/cm). La estación Río Ligua en Quinquimo (05221002-K) superó la primera categoría y cumplió con la norma NCh1333 en la segunda categoría ($750 \leq c \leq 1500$ mohs/cm) cuatro veces. Tres estaciones de calidad de agua en La Ligua cumplieron con la norma NCh1333 para la primera categoría (≤ 750 mohs/cm). La estación Río Petorca en Longotama o Puente FFCC (05120001-2) superó la primera categoría y cumplió con la norma NCh1333 en la segunda categoría ($750 \leq c \leq 1500$ mohs/cm) cuatro veces.

El hierro es un parámetro que presenta mayor incumplimiento en la cuenca del río Ligua, ya que solo una estación de calidad de agua en La Ligua cumplió con las normativas NCh409/1 y NCh1333. La estación Río Ligua en Quinquimo (05221002-K) cumplió con la norma NCh1333 y superó el límite de norma NCh409/1 dos veces, con valores de 0.791 y 0.54 mg/L. La estación Río Alicahue en Colliguay (05200001-7) superó los límites de las normas NCh409/1 y NCh1333 seis veces, con valores entre 0.328 y 11.915 mg/L. La estación Río Ligua en Cabildo (05220002-4) superó los límites de las normas NCh409/1 y NCh1333 dos veces, con valores de 15 y 10.242 mg/L. Todas las estaciones de la calidad de agua en Petorca cumplieron con la norma NCh1333, pero ninguna de las estaciones cumplió con la norma NCh409/1. La estación Río Sobrante en Piñadero (05100001-3) superó el límite de norma NCh1333 siete veces, con valores entre 0.337 y 4.305 mg/L. La estación Río Pedernal en Tejada (05101001-9) superó el límite de norma NCh1333 cinco veces, con valores entre 0.312 y 1.332 mg/L. La estación Río Petorca en Petorca (05220002-4) superó el límite de norma NCh1333 una vez, con un valor de 0.861 mg/L. La estación Río Petorca en Longotama o Puente FFCC (05120001-2) superó el límite de norma NCh1333 una vez, con un valor de 0.513 mg/L.

De igual forma, el manganeso también presenta un alto incumplimiento, y que solo una estación de calidad de agua en La Ligua cumplió con las normativas NCh409/1 y

NCh1333. La estación Río Alicahue en Colliguay (05200001-7) superó los límites de las normas NCh409/1 y NCh1333 dos veces, con valores de 0.34 y 0.394 mg/L. La estación Río Ligua en Cabildo (05220002-4) superó los límites de las normas NCh409/1 y NCh1333 dos veces, con valores de 0.286 y 0.457 mg/L. La estación Río Ligua en Quinquimo (05221002-K) superó los límites de las normas NCh409/1 y NCh1333 una vez, con valor de 1.17 mg/L y superó el límite de la norma NCh409/1 una vez más, con valor de 0.153 mg/L.

Sola una estación de calidad de agua en Petorca cumplió con las normativas NCh409/1 y NCh1333. La estación Río Sobrante en Piñadero (05100001-3) superó los límites de las normas NCh409/1 y NCh1333 una vez, con valor de 0.214 mg/L. La estación Río Pedernal en Tejada (05101001-9) superó los límites de las normas NCh409/1 y NCh1333 dos veces, con valores de 0.233 y 2.642 mg/L. Además, la misma estación superó el límite de la norma NCh409/1 tres veces más, con valores entre 0.105 y 0.13 mg/L. La estación Río Petorca en Longotama o Puente FFCC (05120001-2) superó los límites de las normas NCh409/1 y NCh1333 una vez, con el valor de 1.227 mg/L. Además, la misma estación superó el límite de la norma NCh409/1 una vez más, con el valor de 0.115 mg/L.

En el caso del mercurio y del molibdeno, el caso es más complejo, puesto que ninguna estación cumplió con la normativa en ambas cuencas. Sin embargo, esto puede ser debido a que el límite de detección del laboratorio.

En general, de los 24 parámetros de calidad de agua con mediciones durante la década 2010, las ocho estaciones de calidad de agua de la DGA han cumplido exitosamente bajo las normas de calidad de agua NCh409/1 y NCh1333. Si se considera que los límites normativos de mercurio y molibdeno son menores del umbral de detección de las muestras, es posible que los resultados de cumplimiento de las normativas sean mejor, con dos estaciones con solo un parámetro con datos que no cumplen con normativas.

Pero, al mismo tiempo, es difícil señalar con mucha firmeza sobre la calidad de agua, si se considera que había únicamente ocho estaciones (4 en La Ligua y 4 en Petorca) y – por muchos de los parámetros evaluados con los datos de la DGA – menos de cinco días muestreados durante de una década entera. Entonces, debería tomar las conclusiones de la calidad química de agua – y desde allá – la disposición de las aguas de las cuencas evaluadas como una fotografía muy limitada en el tiempo.

Un punto de preocupación surge desde los valores medidos de arsénico, porque los valores máximos superan los límites por varios grados de magnitud. Además, una examinación de los valores históricos del arsénico muestra que había 20 días en que la concentración de arsénico superó 1.0 mg/L, 8 días en que la concentración superó 10.0 mg/L, y 6 días en que la concentración superó 100.0 mg/L. Con esta cantidad de mediciones muy altos, es poco probable que son errores de medición o transcripción. Además, casi todos los valores más grandes de 1.0 mg/L pertenecen a subsubcuencas andinas, específicamente Estero Alicahue (5200) en cuenca La Ligua y Río Sobrante (5100) y Río Pedernal (5101) de la cuenca Petorca. Como la concentraciones naturales de arsénico en el agua más altos que son registrados en los Estados Unidos eran alrededor de 12 mg/L (Schreiber et al., 2000) – y eran de aguas subterráneas, no aguas

superficiales como eran medidos en las estaciones aquí – los valores registrados en esta estación implica haya unas actividades antrópicas que ponen arsénico en las aguas.

4.1.1.2 Proyectada

La data histórica de calidad de aguas superficiales es la única que presenta datos relativamente continuos para diagnosticar calidad según usos. No obstante, los datos no son continuos hasta la fecha actual, lo que limita estimar una calidad de agua futura bajo los escenarios de cambio climático estimados en este estudio.

Las estimaciones que se consideran son generales y relacionadas a la disminución de la capacidad depurativa del agua debido a una menor cantidad de precipitación que genera menor escorrentía. Se desconoce cómo la intensificación de eventos extremos de sequías afecta a la calidad del agua actual y por ende futura. Desde el enfoque preventivo de la Ley General de Bases del Medio Ambiente 19.300, se considera que, si bien no es posible determinar el efecto del cambio climático sobre la calidad de agua proyectada, se requiere de considerar aumentar el conocimiento en torno esta incertidumbre para reducir los riesgos potenciales, recién mencionados.

4.1.2 Derechos concedidos en aguas superficiales

En la cuenca del río Ligua se han otorgado un total de 50.903 l/s, con un 21% correspondiente a usos consuntivos. En el río Petorca se han otorgado 62.989 l/s derechos de agua, con un 31% de derechos de uso consuntivo.

En la Tabla 4-1 se aprecia el detalle y en la Figura 4-5 se aprecia la distribución espacial

Tabla 4-1. Derechos de aprovechamiento de agua superficiales de las cuencas Ligua y Petorca.

Cuenca	Tipo de DAA	N° DAA	Caudal [l/s]	Caudal [m ³ /s]	Tipo de uso (referencial)	N° de DAA	Caudal [l/s]	Caudal [m ³ /s]
Río Ligua	Consuntivo	68	10941,0	10,9	Riego	24	7088,0	7,09
					(en blanco)	44	3854,0	3,85
	No Consuntivo	11	37108,0	37,1	Energía Hidroeléctrica	7	21408,0	21,41
					Riego	4	15700,0	15,70
(en blanco)	1	2854,0	2,9	(en blanco)	1	2854,0	2,85	
Río Petorca	Consuntivo	108	19702,0	19,7	Bebida/Uso Doméstico/Saneamiento	1	5,0	0,01
					Otros Usos	1	320,0	0,32
					Riego	53	2564,0	2,56
					(en blanco)	53	16813,0	16,81
	No Consuntivo	13	43287,0	43,3	Energía Hidroeléctrica	11	33287,0	33,29
				Riego	2	10000,0	10,00	

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos obtenidos desde DGA 2019 (ver detalle de DAA en Anexo J.6)

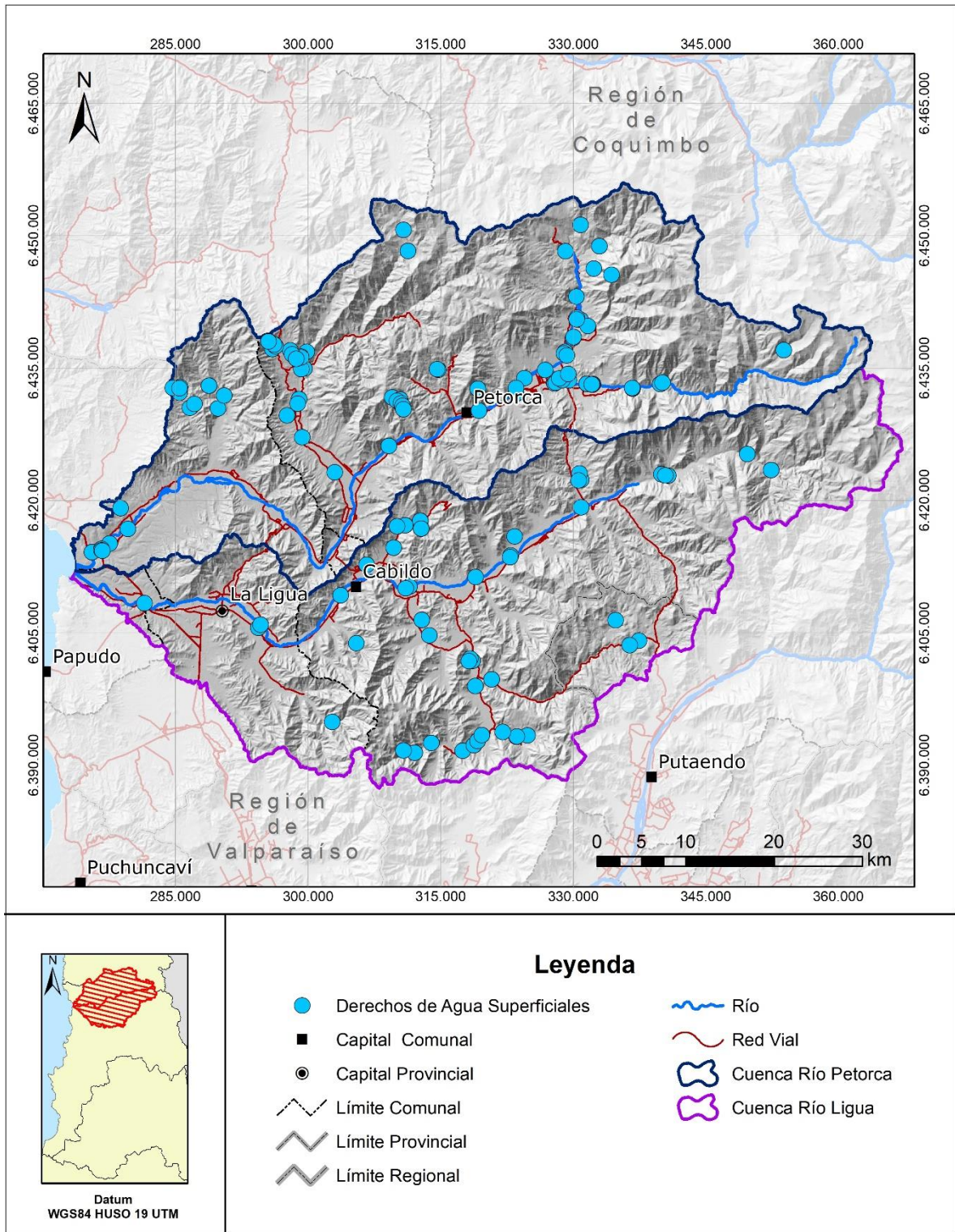


Figura 4-5 Distribución espacial de los derechos de agua superficiales en las cuencas Río ligua y Río Petorca

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos obtenidos desde DGA 2019 (ver detalle en Anexo J.6)

4.2 Agua subterránea

4.2.1 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC)

El acuífero de la zona de estudio está compuesto por un conjunto de sectores acuíferos (12 en total, 5 en la cuenca del río Petorca y 7 en la cuenca del río La Ligua, ver Figura 4-6).

Según lo establecido por la DGA, un SHAC es acuífero o parte de un acuífero, cuyas características hidrológicas espaciales y temporales permiten una delimitación para efectos de su evaluación hidrogeológica o gestión de forma independiente (DGA, 2016). Esta subdivisión se utiliza en el proyecto para presentare resultados y evaluar la situación hídrica subterránea.

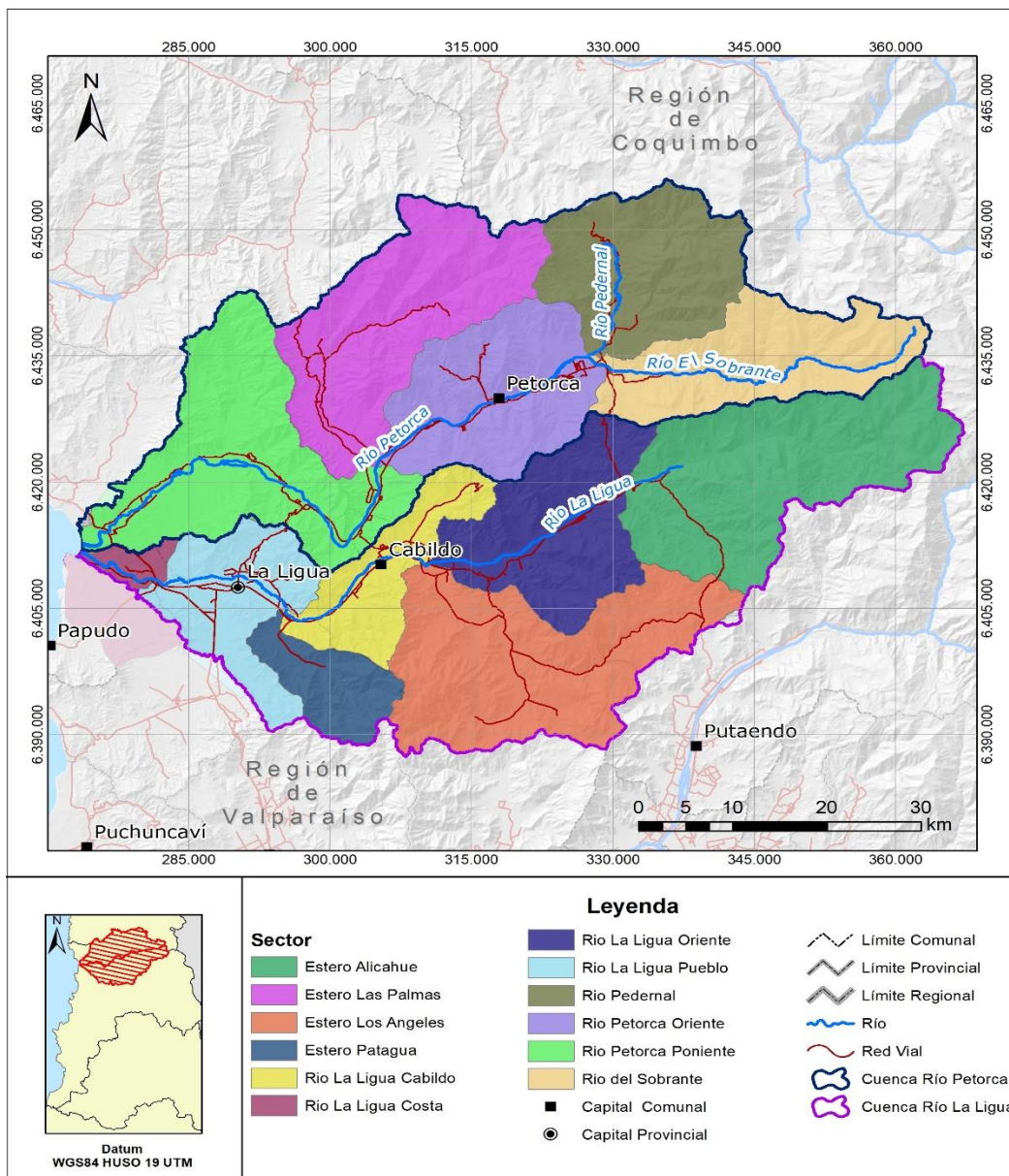


Figura 4-6 Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común (SHAC) cuencas Ligua – Petorca.

Fuente: elaboración propia a partir de cartografía oficial suministrada por DGA (2020).

El acuífero río Ligua fue declarado Área de Restricción para nuevas explotaciones de aguas subterráneas mediante Resolución DGA N° 204 del 14 de mayo del 2004, basado en el Informe Técnico DGA N° 84 de 2004. Por otro lado, el acuífero río Petorca fue declarado Área de Restricción para nuevas explotaciones de aguas subterráneas mediante Resolución DGA N° 216 del 15 de abril de 1997, basado en la Minuta Técnica DGA N° 13 de 1996.

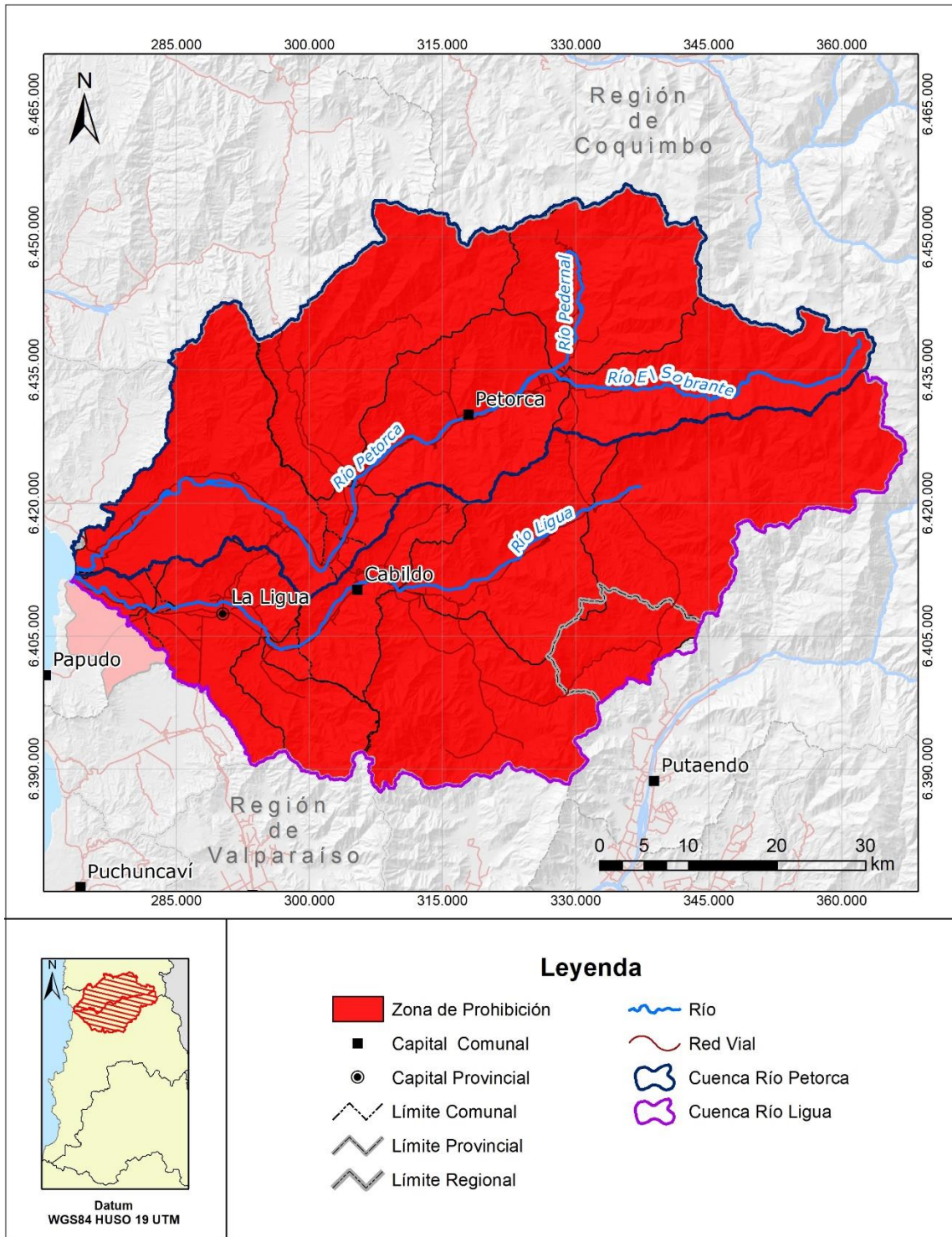
Por último, la Resolución DGA N° 1703 del 13 de junio del 2014, deja sin efecto los derechos de aprovechamiento provisionales de aguas subterráneas en los acuíferos río La Ligua y río Petorca. Esta Resolución se basó en el documento "Definición sobre los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas provisionales en las áreas de restricción La Ligua y Petorca, Región de Valparaíso. Informe Técnico N° 70" de 2014 de la DGA, en el que se establece que los valores de extracción superan ampliamente los caudales sustentables determinados para cada acuífero, en los estudios que justifican las declaraciones de las respectivas áreas de restricción y que se superan las recargas sustentables determinadas en la actualización del modelo.

Además, se establece que los descensos sostenidos en los acuíferos de las cuencas de La Ligua y Petorca corresponden a un déficit permanente y no a un efecto temporal, se demostró que, en la mayoría de los sectores, la extracción, supera la oferta hídrica sustentable de largo plazo.

Por último, la Resolución DGA N° 19 del 25 de julio del 2018, cambia tanto en la cuenca del río Petorca como del río La Ligua, las áreas de restricción a zonas de prohibición¹¹.

Las zonas de prohibición de ambas cuencas pueden verse en la Figura 4-7

¹¹ DGA, (2018). Evaluación del Actual Nivel de Explotación de los Acuíferos de la Ligua y Petorca, SDT N° 415.



4.2.2 Stock, recarga y calidad actual

La recarga se ha conceptualizado considerando su dependencia de la precipitación directa sobre la zona aluvial, los aportes laterales desde cuencas de cabecera y en menor medida de los aportes de las zonas cultivadas, debido a los excedentes de riego. Su desarrollo en el tiempo depende de la distribución temporal de la lluvia y la distribución espacial de los aportes laterales. En la Figura 4-8 se presenta la recarga directa general para todo el sistema Liga - Petorca, donde se observa que un descenso de la última década evaluada (2010 - 2017) respecto a la década anterior (2000 - 2009), influenciada por la sequía identificada en la literatura en Chile en los últimos años. En la figura se observa un comportamiento en la tendencia similar tanto en la cuenca de La Liga como la de Petorca.

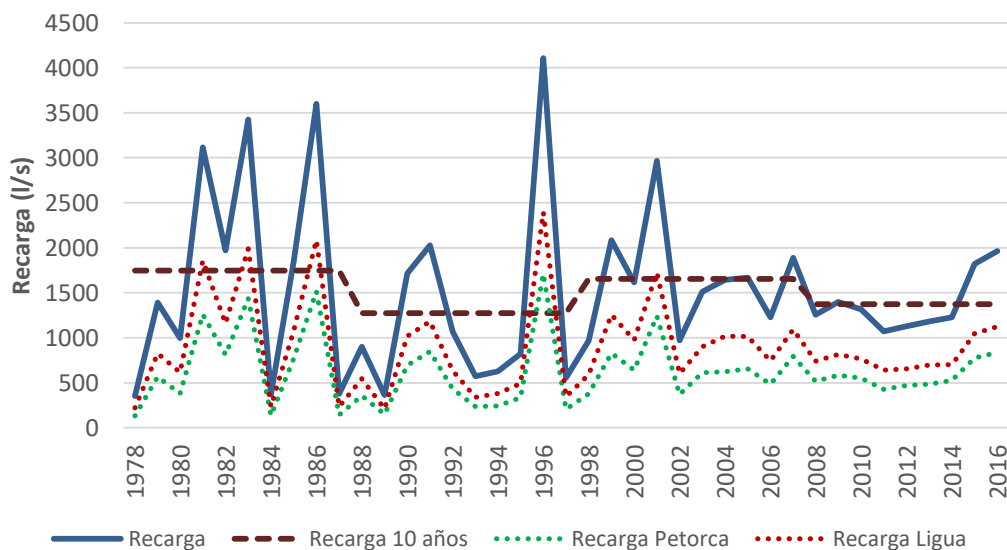


Figura 4-8 Recarga sistema Liga - Petorca

Fuente: Elaboración propia a partir de la modelación integrada (Anexo H Modelación Hidrológica acoplada, capítulo 5).

Según la siguiente Tabla 4-2, los cambios decadales en la recarga por precipitaciones han variado desde 1.275 l/s en la década de 1990, a 1.655 l/s en la década de 2000 y 1.374 l/s en la última década (2010 a 2017).

Tabla 4-2 Recarga directa promedio decadal sistema Liga - Petorca

Década	Recarga promedio (l/s)
	Sistema Liga - Petorca
1980	1.746
1990	1.275
2000	1.655

2010	1.374
------	-------

Fuente: Elaboración propia a partir de la modelación integrada (Anexo H Modelación integrada, capítulo 5).

En el caso de la cuenca de Petorca, en términos anuales, los aportes de laderas (cuencas laterales aportantes a los acuíferos) son los de mayor importancia para la recarga, con peaks asociados a los eventos de precipitaciones observados tanto en la recarga lateral, como en la recarga directa. La recarga lateral corresponde a aproximadamente un 69% en promedio del total de la recarga en el escenario de referencia para el periodo 1980 a 2017, mientras que la recarga directa sobre el acuífero alcanza un 22% en promedio y los aportes desde las zonas cultivadas de 9% en promedio, para el mismo período.

Tabla 4-3 Recarga directa promedio decadal Petorca

Década	Recarga promedio (l/s)			
	Ladera	Agro	Directa	Total
1980	1962	50	703	2715
1990	1307	93	438	1838
2000	1431	187	493	2111
2010	863	268	311	1442

Fuente: Elaboración propia a partir de la modelación integrada (Anexo H Modelación integrada, capítulo 5).

Esto denota la importancia en la disponibilidad futura y sustentabilidad de los volúmenes de aguas almacenadas en los acuíferos. Se debe notar un descenso sostenido de la recarga lateral y directa desde 2008 a 2015, el cual ha repuntado en 2016 y 2017. Se debe tener presente que esta condición o tendencia al descenso puede volver a presentarse en un contexto de cambio climático, incluso para el escenario menos pesimista, notar que este descenso es más significativo en la tendencia de la recarga desde laderas, si consideramos el descenso casi sostenido desde 2002 a 2015 (Figura 4-9).

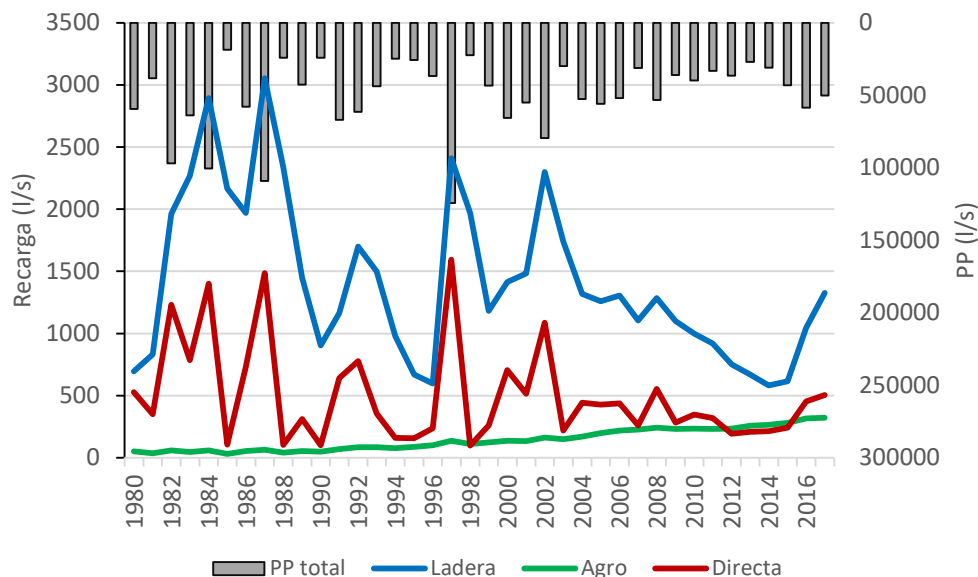


Figura 4-9 Recarga cuenca Petorca

Fuente: Elaboración propia a partir de la modelación integrada (Anexo H Modelación integrada, capítulo 5).

Por otro lado, en el caso de la cuenca La Liga, en términos anuales, también se identifican los aportes de laderas como los de mayor importancia para la recarga, con peaks asociados a los eventos de precipitaciones observados tanto en la recarga lateral, como en la recarga directa (Tabla 4-4). En este caso, la recarga lateral corresponde a aproximadamente un 65% en promedio del total de la recarga en el escenario de referencia para el periodo 1980 a 2017, mientras que la recarga directa sobre el acuífero alcanza un 22% en promedio y los aportes desde las zonas cultivadas de 13% en promedio, para el mismo período. En este caso el análisis de tendencia al descenso de la recarga es similar al caso de Petorca.

Tabla 4-4 Recarga directa promedio decadal Liga

Década	Recarga promedio (l/s)			
	Ladera	Agro	Directa	Total
1980	2080	101	768	2949
1990	1354	161	478	1993
2000	1541	330	549	2421
2010	883	402	325	1610

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación integrada (Anexo H Modelación hidrológica acoplada, capítulo 5).

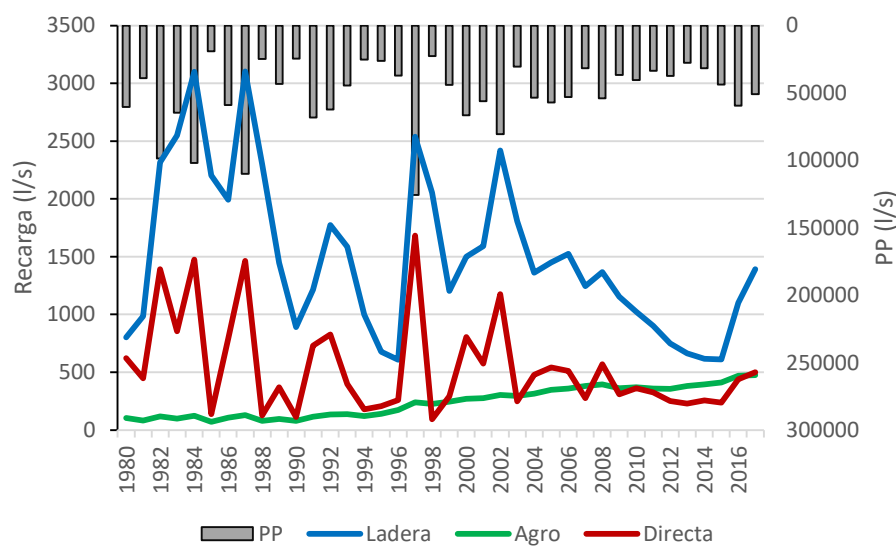


Figura 4-10 Recarga cuenca La Ligua.

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación integrada (Anexo H Modelos hidrológicos acoplados, capítulo 5).

En términos de la recarga directa por SHAC en Petorca (Figura 4-11) los volúmenes más importantes se generan en el acuífero asociado al sector de Petorca Poniente, lo cual se debe a sus dimensiones en planta, lo que genera mayores aportes desde precipitaciones. Por otro lado, el acuífero de la zona de El Sobrante, el más oriental, es el que recibe menor aporte directo desde precipitaciones, asociado también a su tamaño. Notar que esta relación es distinta si se consideran los aportes desde laderas, los cuales son mayores en las cuencas de los extremos orientales, dadas sus extensiones.

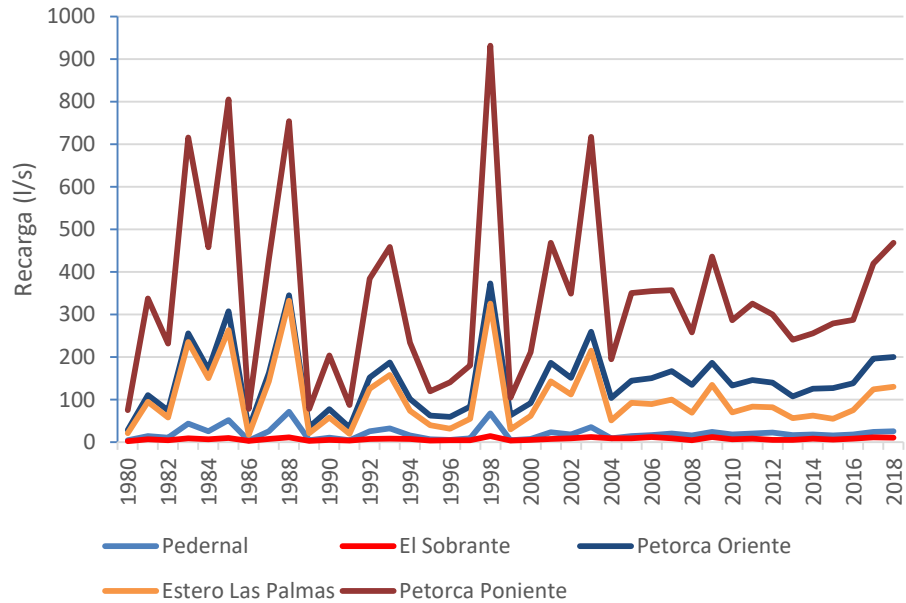


Figura 4-11 Recarga por SHAC en cuenca Río Petorca.

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación integrada (Anexo H Modelación integrada, capítulo 5).

Mientras que por el lado de los SHACs de la cuenca La Ligua (Figura 4-12) la recarga directa muestra valores más importantes en el acuífero asociado al sector de Ligua Oriente, aunque en este caso hay sectores con menos diferencia con respecto a de mayores tasas de recarga, como son La Ligua costa y La Ligua Pueblo, ambos ubicados en el sector poniente de la cuenca. Por otro lado, el acuífero de la zona de Estero Alicahue, el más oriental, es el que recibe menor aporte directo desde precipitaciones, asociado también a su geometría muy encajonada y de menor extensión.

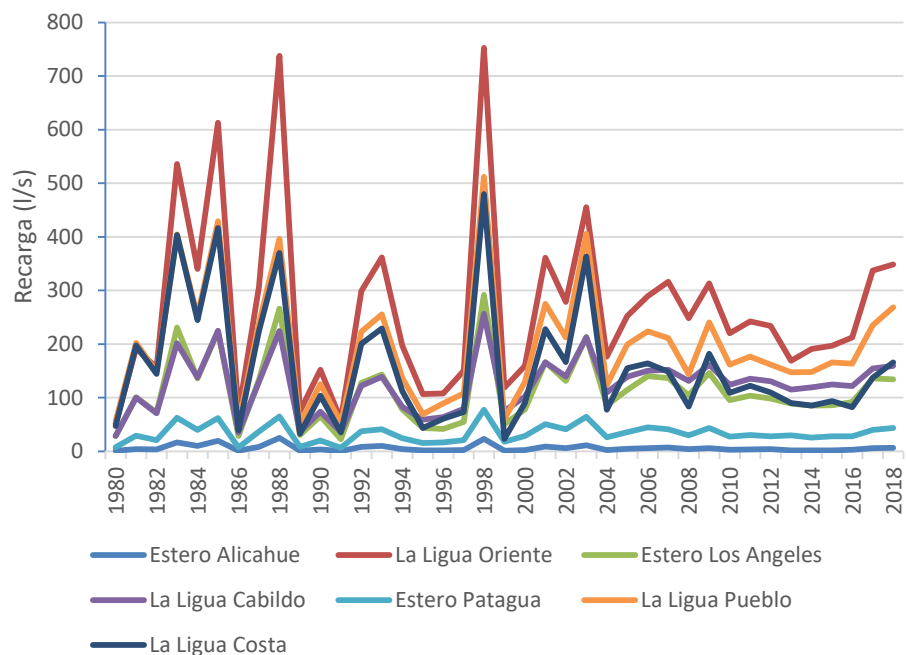


Figura 4-12 Recarga por SHAC en cuenca Río Ligua.

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación integrada (Anexo H Modelación integrada, capítulo 5).

Cabe señalar que se ha generado un aumento sostenido del consumo del agua almacenada en los acuíferos de ambas cuencas, dado un progresivo incremento de los bombeos en la actualidad, lo que redujo los afloramientos y las recuperaciones en los cauces (DGA-GCF, 2019), generando un exceso en la capacidad natural de recarga de los acuíferos. Dicho aumento de la explotación desde la década del 2000 ha deprimido los niveles freáticos (identificado también en los niveles simulados y observados), generando un espacio para admitir recarga. De esa forma, una mayor proporción de la recarga actualmente logra infiltrar hacia las zonas deprimidas de los acuíferos y que no tenía cabida anteriormente en el estado de equilibrio (sin extracciones).

4.2.3 Derechos concedidos en aguas subterráneas

Al año 2020 se registran 1885 derechos de aprovechamiento subterráneos otorgados en su mayoría a partir de 2005, todo del tipo permanente y continuo, representando en total 1130 l/s. El SHAC más intervenido es Río Petorca Poniente con 30% del total de derechos (Tabla 4-5). En la (Figura 4-13) se puede apreciar la distribución espacial de estos derechos

Tabla 4-5 Derechos de aprovechamiento de agua subterráneos de las cuencas Ligua y Petorca.

SHAC	Número derechos	Caudal (l/s)	Permanente y Continuo	Permanente y Alternado
S1 - Rio Pedernal	48	171,6	171,6	0
S2 - Estero Las Palmas	103	279,9	279,9	0
S3 - Rio del Sobrante	31	126,9	126,9	0
S4 - Rio Petorca Poniente	546	1967,1	1940,9	3,2
S5 - Estero Alicahue	9	183,6	183,6	0
S6 - Rio La Ligua Oriente	185	1537,8	1523,4	10,4
S7 - Rio La Ligua Cabildo	328	1740,5	1720,5	20
S8 - Rio La Ligua Pueblo	240	1273,7	1261,7	0
S9 - Estero Ángeles	0	0	0	0
S10 - Rio Petorca Oriente	320	1265,5	1245,1	0,3
S11 - Rio La Ligua Costa	45	76,7	76,7	0
S12 - Estero La Patagua	0	0	0	0

Fuente: elaboración propia a partir de cartografía oficial suministrada por DGA (2020).

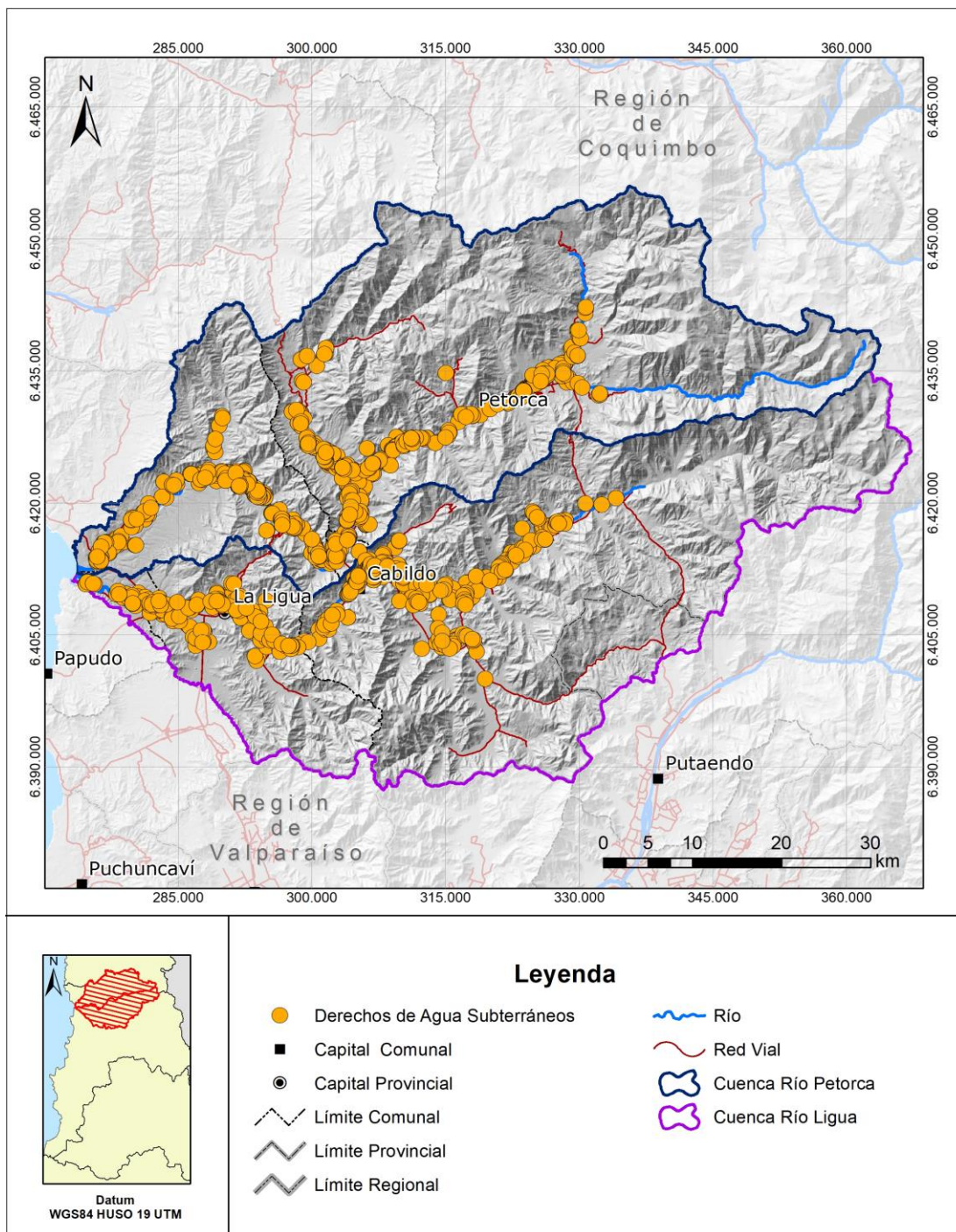


Figura 4-13 Distribución espacial de los derechos de agua subterráneos en las cuencas Río ligua y Río Petorca

Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos suministrada por la Inspección Fiscal DGA a 2020

5. BALANCE DE AGUA

5.1 Modelo de simulación

La estimación del balance hídrico en las cuencas de Ligua y Petorca, se llevó a cabo mediante la modelación integrada superficial y subterránea. Para estos efectos, se empleó el modelo WEAP para simular la hidrología superficial y el modelo Modflow para simular la hidrogeología de la zona.

El modelo WEAP Water Evaluation And Planning (WEAP) es una herramienta computacional que sirve para la planificación de los recursos hídricos (SEI, 2018), apoya en la planificación de recursos hídricos realizando el balance de oferta de agua (generada a través de módulos físicos de tipo hidrológico a escala de subcuenca) con la demanda de agua (caracterizada por un sistema de distribución de variabilidad espacial y temporal con diferencias en las prioridades de demanda y oferta) (Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile & SEI, 2009).

Por su parte, el modelo MODFLOW es un modelo tridimensional de aguas subterráneas de diferencia finita creada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Este modelo permite estimar la variación del nivel freático completamente distribuida, permite incorporar extracciones puntuales, drenes y la interacción río acuífero. Este modelo basado en la simulación de procesos físicos ha sido ampliamente utilizado para la gestión del recurso subterráneo.

Mayor detalle sobre las características de los modelos WEAP y Modflow se encuentra en el Anexo H Modelo hidrológico acoplado.

5.1.1 Descripción del modelo elaborado

Los modelos de agua subterránea en MODFLOW y WEAP son muy diferentes. Mientras que un nodo de agua subterránea WEAP se representa como un gran "cubo" sin parámetros para caracterizar los flujos internos, MODFLOW representa el agua subterránea como una red multicapa de celdas independientes, cada una con sus propios parámetros de flujo y ecuaciones que se utilizan para modelar flujos entre celdas, y a través de los límites del acuífero (SEI, 2016).

Cuando se vinculan correctamente, los datos y los resultados fluyen de un lado a otro entre WEAP y MODFLOW para cada paso de tiempo, permitiendo así determinar el balance hídrico de la cuenca o subcuencas determinadas en WEAP considerando el flujo subterráneo modelado en MODFLOW. Desde WEAP los resultados hacia MODFLOW como datos de entrada para sus cálculos son infiltración de agua subterránea (recarga), extracciones (bombeo), nivel del agua en tramos de un río y escorrentía de aguas superficiales, y desde MODFLOW hacia WEAP como datos de entrada el nivel de aguas subterráneas, variación de nivel, flujos laterales entre acuíferos, interacciones agua superficial – agua subterránea. Para mayor claridad sobre el proceso de integración, ver el Anexo H Modelación Hidrológica Integrada.

La Figura 5-1 presenta un esquema del acople de los modelos en uno operacional WEAP-MODFLOW.

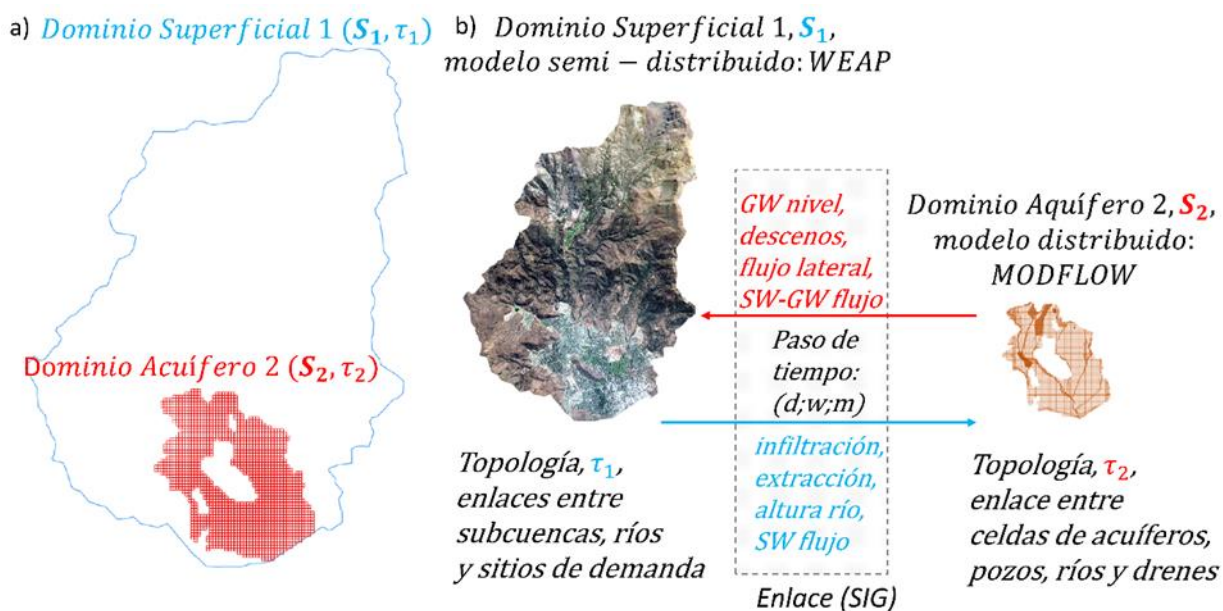


Figura 5-1 Topología entre modelos WEAP-MODFLOW y flujos de intercambio para cada paso de tiempo

Fuente: DICTUC S.A., SEI (2019).

En la Figura 5-2 se muestra la relación que se da entre los distintos nodos debido a la distribución espacial de las unidades de modelación.

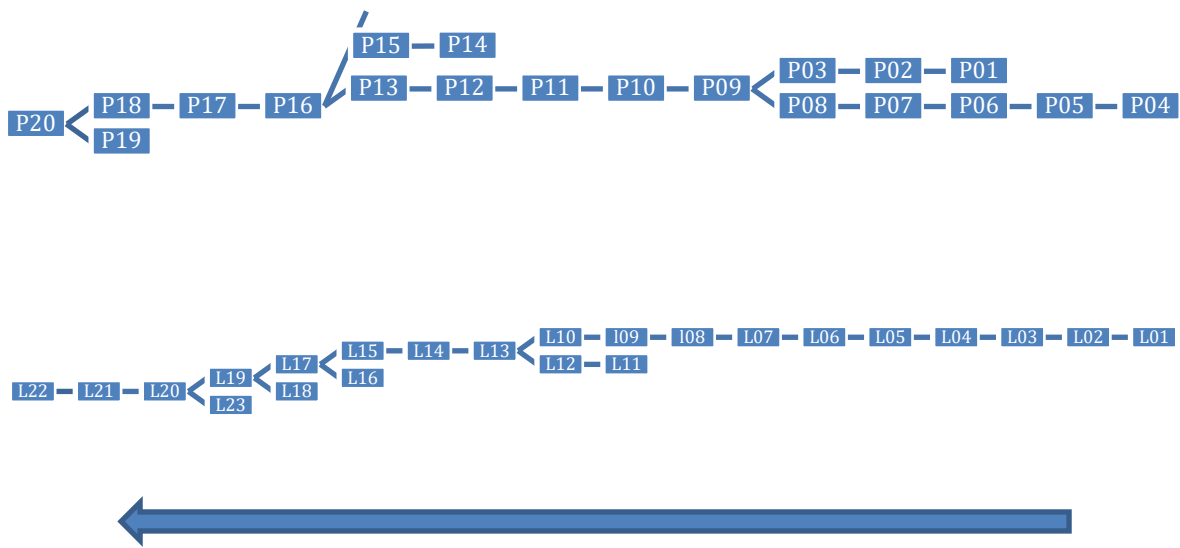


Figura 5-2. Dirección de flujos que se tienen entre las distintas unidades de modelación de cada una de las cuencas de Ligua-Petorca.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5-3 se muestra el nombre de cada acuífero considerado en los modelos. Cabe mencionar que los acuíferos "MF" se conectan directamente con Modflow a partir del archivo Linkeage.shp.

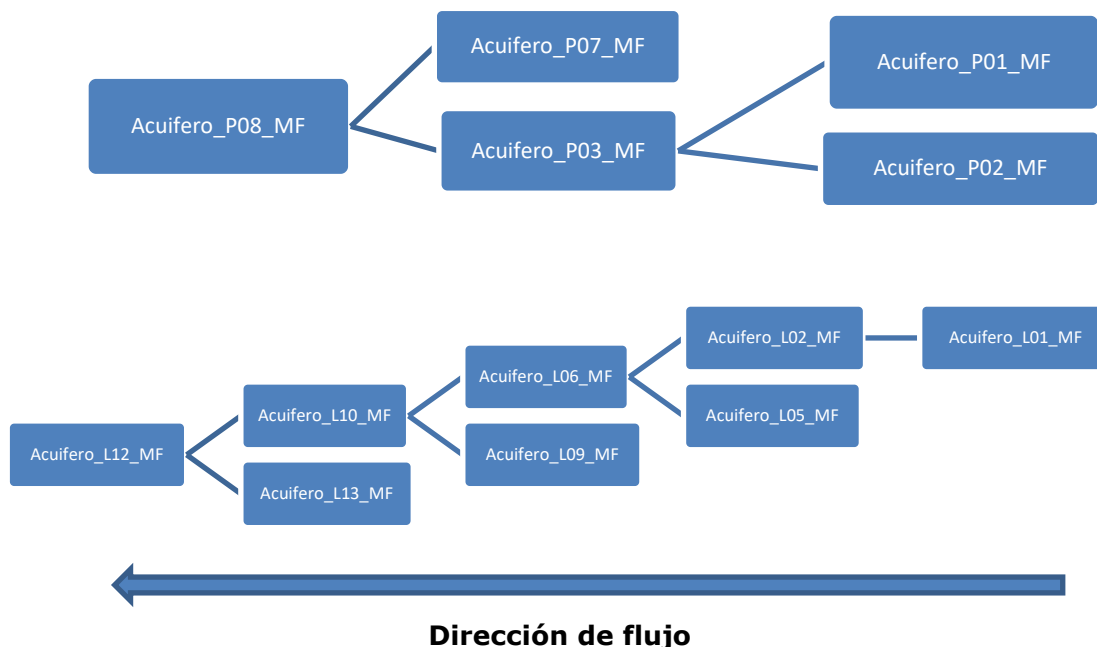


Figura 5-3. Diagrama de flujo de acuíferos de WEAP que hace la interacción con MODFLOW en las cuencas del modelo Ligua-Petorca.

Fuente: elaboración propia.

El detalle de la descripción del modelo se encuentra en el Anexo H de modelación Hidrológica integrada.

El modelo WEAP Acoplado para las cuencas de los ríos Ligua y Petorca puede ser evaluado con respecto a caudales superficiales y los niveles de pozos en el caso de las aguas subterráneas. A continuación, se muestran los indicadores de desempeño que dan una idea de la capacidad representativa del modelo respecto a caudales superficiales y niveles de pozos, ver Figura 5-4 y Figura 5-5, respectivamente.

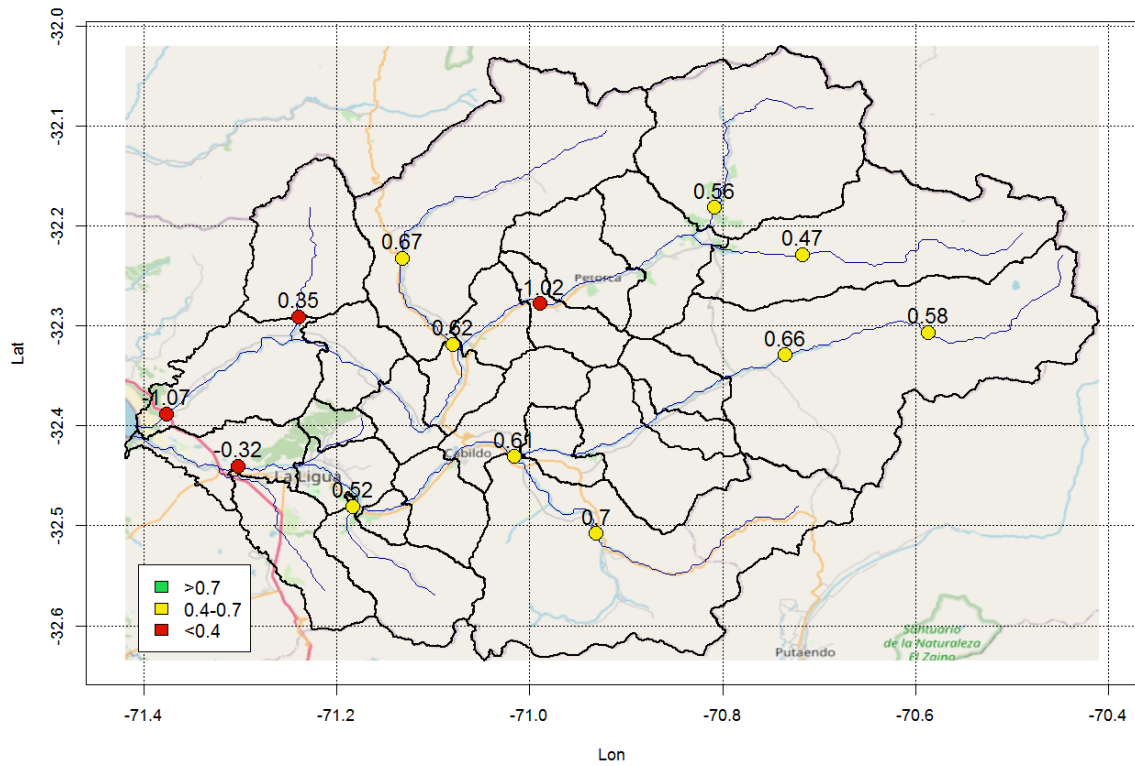


Figura 5-4. Indicador de eficiencia KGE en estaciones Fluviométricas y subcuencas VIC.

Fuente: elaboración propia.

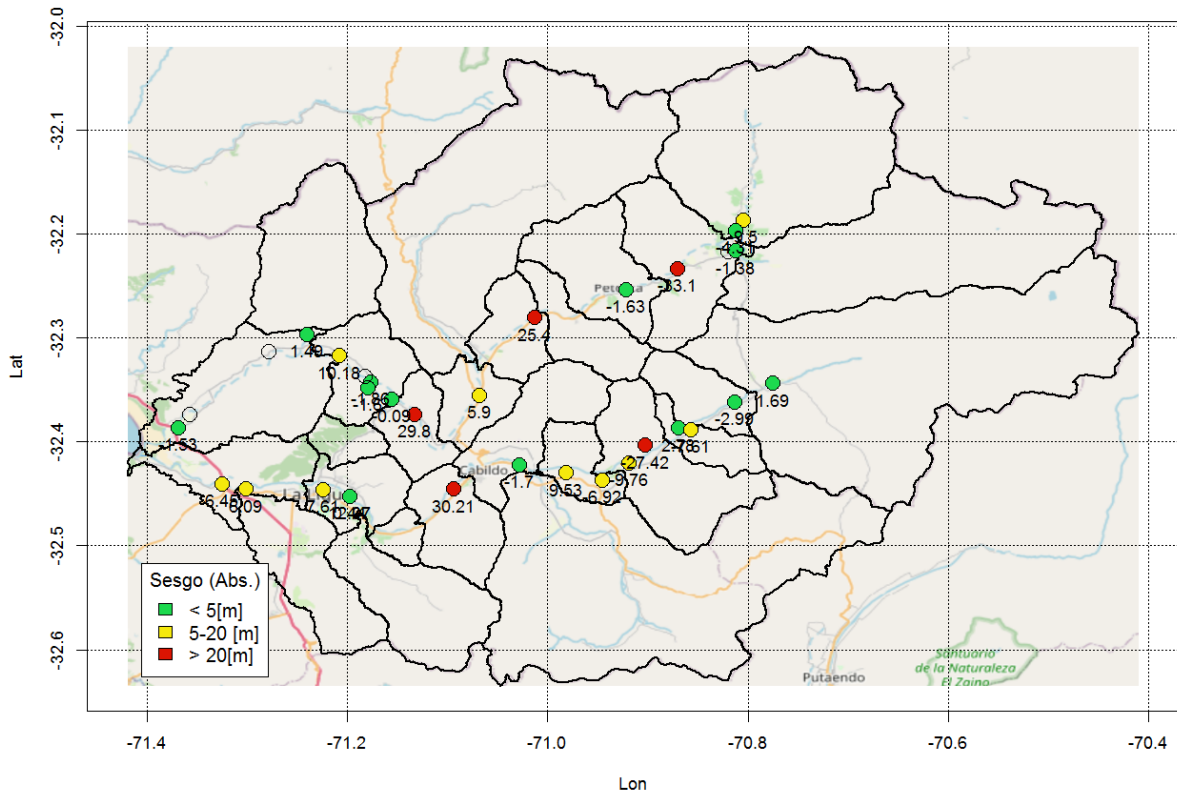


Figura 5-5. Indicador de eficiencia Sesgo en pozos monitoreados por DGA.

Fuente: elaboración propia.

El detalle de los resultados de la modelación acoplada se encuentra en el Anexo H de modelación hidrológica acoplada.

5.1.2 Situación actual

5.1.2.1 Balance hídrico

A partir de los resultados de la modelación conjunta del modelo implementado, se obtuvo el balance histórico a partir de flujos de entrada (precipitación) y flujos de salida como el consumo agrícola, de agua potable y de las salidas al mar, tanto superficial como subterránea.

En la Figura 5-6 se muestra el balance hídrico para la cuenca del río Petorca y en la Figura 5-7 para la cuenca del río Ligua.

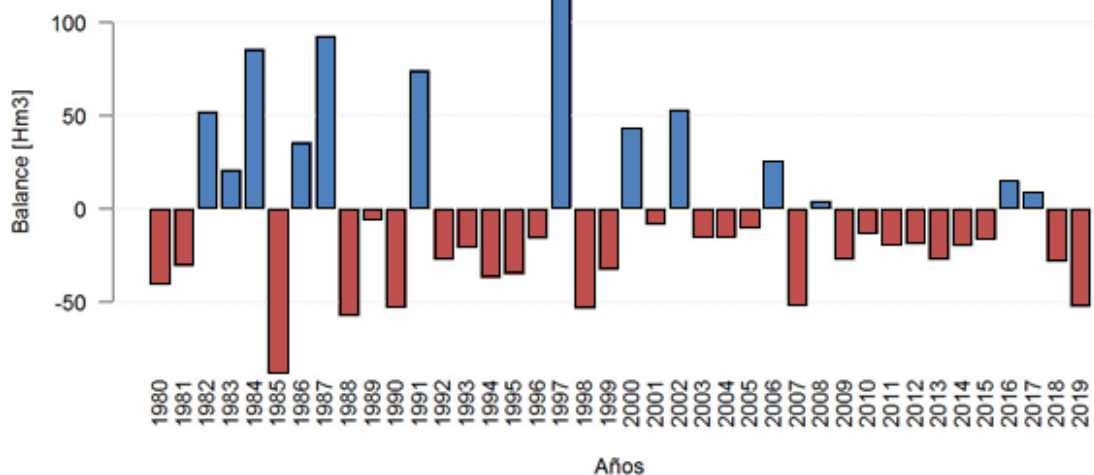


Figura 5-6 Balance Hídrico anual de la cuenca del Río Petorca.

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada)

De la Figura 5-6 se aprecia que la cuenca Río Petorca ha presentado constantes déficit desde el año 1985 en adelante, en donde dicho déficit se ha acentuado. A partir del año 2005 el déficit medio es del orden de 8 Hm³.

En la Figura 5-7 se muestra el balance en la cuenca del río Ligua, en se aprecia que hay una tendencia histórica hacia el déficit y solo algunos años se han presentado superávit. Además, en la última década, esta cuenca sólo ha presentado déficit del orden de 4Hm³.

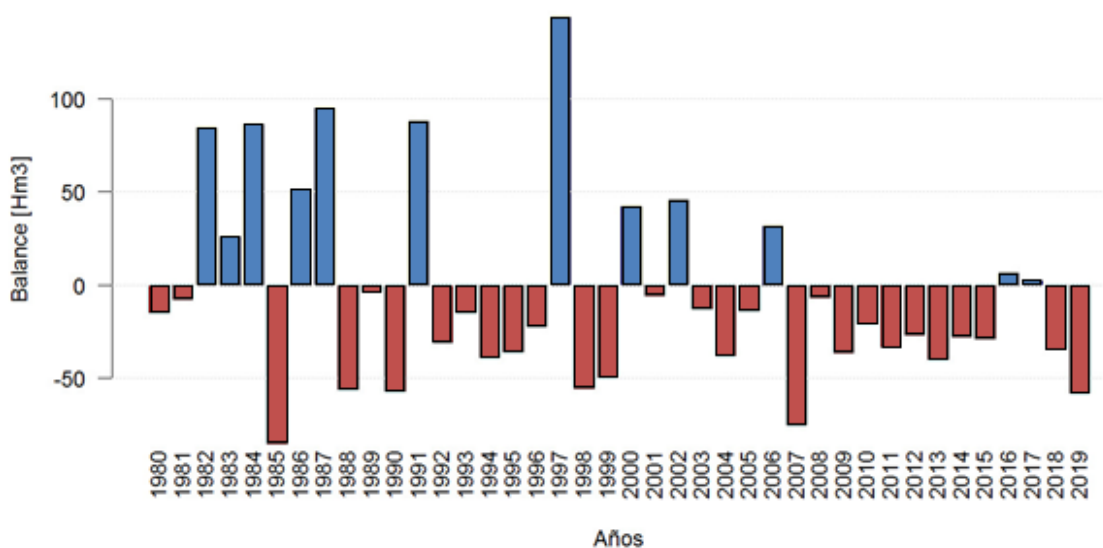


Figura 5-7 Balance Hídrico anual de la cuenca del Río Ligua

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, Capítulo 5)

5.1.2.2 Balance hidrogeológico

En la Tabla 5-1, se presenta el balance del acuífero para el período histórico de la cuenca del río La Ligua, se observa que los mayores ingresos provienen de la recarga desde el almacenamiento y por parte de las precipitaciones. Por su parte las salidas, muestran que los pozos de extracción y el afloramiento hacia el río son los valores más elevados. Se debe indicar que la diferencia de almacenamiento es prácticamente nula en todas las subcuencas.

Tabla 5-1. Balance hídrico subterráneo Cuenca río La Ligua, período histórico

	Estero Alicahue	Río La Ligua Oriente	Río La Ligua Cabildo	Río La Ligua Pueblo	Estero Ángeles	Río La Ligua Costa	Estero La Patagua	Total
Entradas (L/s)								
Flujo Subterráneo	11,3	1,4	15,6	3,0	13,3	10,3	6,9	61,8
Recarga pp	23,2	16,6	28,3	3,6	10,6	19,3	13,0	114,7
Recarga desde río	14,1	0,2	0,7	0,1	5,0	1,9	0,3	22,3
Recarga desde almacenamientos	97,4	12,6	52,7	14,9	36,9	50,5	21,3	286,2
Desde Pozos	51,5	7,7	24,6	19,7	17,5	23,9	0,0	144,9
Total	197,5	38,5	122,0	41,2	83,4	105,7	41,5	629,9
Salidas (L/s)								
Flujo Subterráneo	1,7	5,5	14,3	11,2	5,8	6,9	8,1	53,5
Descarga hacia carga constante	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,1
Drenes	10,1	0,0	7,1	5,6	1,4	17,2	1,6	43,0
Río	73,5	15,0	18,2	6,2	16,1	16,5	9,6	155,0
Almacenamiento	47,8	17,0	20,2	11,4	12,2	27,7	19,9	156,2
Pozos de bombeo	63,8	1,1	62,2	6,7	47,9	37,6	1,8	221,2
Total	197,5	38,5	122,0	41,2	83,4	105,7	41,5	629,9
Balance (L/s)								
Variación de almacenamiento	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: elaboración propia en base a datos del modelo acoplado WEAP-Modflow

En la Tabla 5-2, se presenta el balance del río Petorca, se observa que el mayor ingreso proviene de los pozos de inyección y para el Río sobrante por parte de la recarga desde el almacenamiento, por su parte las salidas, se observa que es la pérdida de almacenamiento su mayor valor. Al igual que en La Ligua, el balance es casi nulo.

Tabla 5-2. Balance hídrico subterráneo Cuenca río Petorca, período histórico

	Río Pedernal	Estero Las Palmas	Río del Sobrante	Río Petorca Poniente	Río Petorca Oriente	Total
Entradas (L/s)						
Flujo Subterráneo	1,3	2,4	7,0	3,5	5,5	19,7
Recarga pp	1,4	3,2	7,4	5,4	2,3	19,7
Recarga desde río	0,0	0,0	2,5	0,0	0,0	2,6
Recarga desde almacenamientos	3,7	2,2	36,5	13,0	3,9	59,3
Desde Pozos	9,8	0,8	14,9	49,2	15,7	90,4
Total	16,3	8,7	68,2	71,1	27,5	191,7
Salidas (L/s)						
Flujo Subterráneo	2,8	2,8	11,5	4,9	6,0	28,0
Descarga hacia carga constante	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Drenes	1,1	0,2	1,4	1,5	6,7	10,8
Río	5,0	3,9	18,8	23,7	1,1	52,4
Almacenamiento	6,6	1,5	8,4	32,4	9,9	58,8
Pozos de bombeo	0,9	0,4	28,0	8,6	3,8	41,7
Total	16,3	8,7	68,2	71,1	27,5	191,7
Balance (L/s)						
Variación de almacenamiento	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente: elaboración propia en base a datos del modelo acoplado WEAP-Modflow

5.1.3 Situación proyectada

5.1.3.1 Balance hídrico

Se proyectó el balance hídrico para la cuenca del río Petorca (Figura 5-8) y para el río Ligua (Figura 5-9) considerando las proyecciones de cambio climático con los escenarios MIROC y CSIRO. Cabe mencionar que se utilizó el mismo patrón de la serie histórica para proyectar las series climáticas hasta 2060.

El Balance hídrico proyectado al año 2060 del río Ligua muestra que solo un 30% de los años el balance es positivo, lo cual se traduce en una condición más crítica que la condición actual.

Por otra parte, es posible indicar que los años en los cuales el acuífero será recargado en mayores niveles a los cuales están siendo extraído, se traducen a 12 años (hasta 2060).

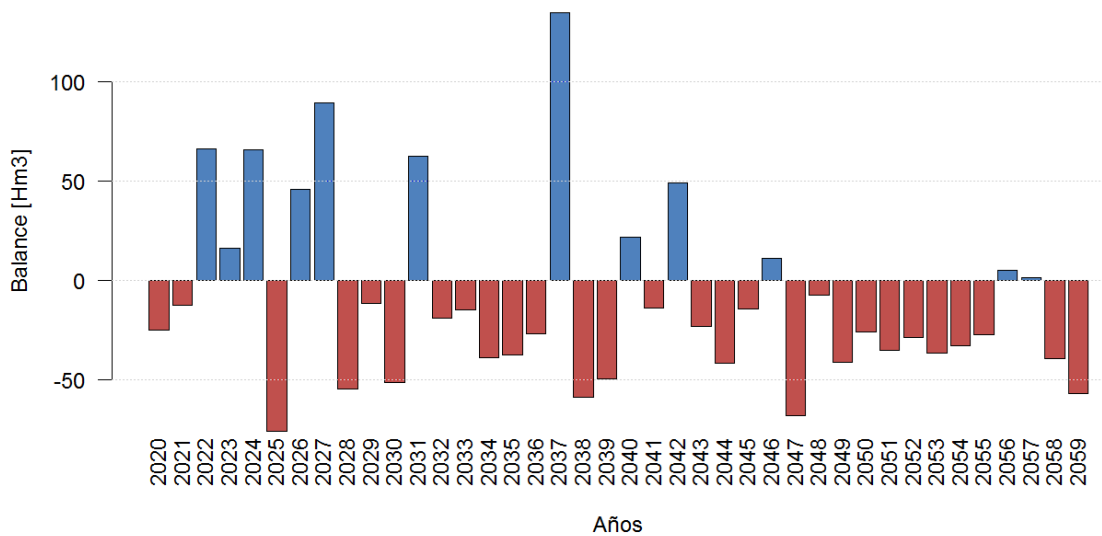


Figura 5-8 Balance hídrico proyectado hasta el año 2060 para el río Ligua basado en escenario CSIRO

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, Capítulo 5)

De igual forma, el balance proyectado para el río Petorca muestra una condición similar que el río Ligua, en donde solo un 33% de los años hay un balance positivo. De esta forma, es posible indicar que los años en los cuales el acuífero será recargado en mayores niveles a los cuales están siendo extraído, se traducen a 13 años (hasta 2060).

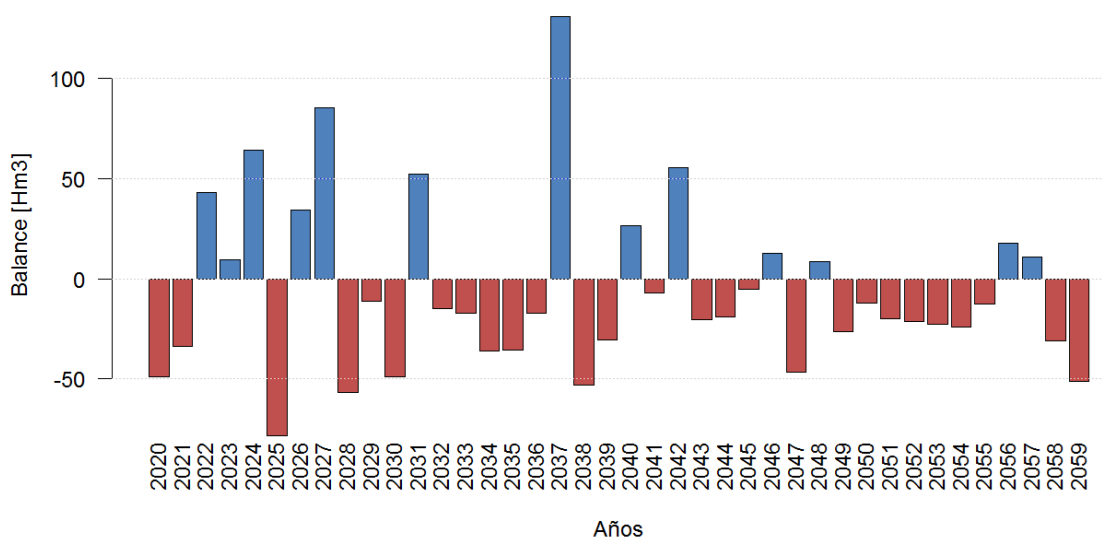


Figura 5-9 Balance hídrico proyectado hasta el año 2060 para el río Petorca basado en escenario CSIRO

Fuente: Elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, Capítulo 5)

5.1.3.2 Balance hidrogeológico

En la Tabla 5-3, se presenta el balance hídrico subterráneo para el período 2020-2050 para la cuenca del río La Ligua, en ésta se observa que los mayores aportes provienen de los pozos de inyección y la recarga de almacenamiento. El total de las entradas para toda la cuenca es de 451, L/s. Con relación a las salidas, los pozos de bombeo y el almacenamiento son las que presentan los mayores valores numéricos. (más del 50%). En total, las salidas son, al igual que en las entradas 451,6 L/s, por esto se deduce que la variación total de almacenamiento en el acuífero es nula.

Tabla 5-3. Balance hídrico subterráneo, cuenca Río La Ligua (2020-2050)

	Estero Alicahue	Río La Ligua Oriente	Río La Ligua Cabildo	Río La Ligua Pueblo	Estero Ángeles	Río La Ligua Costa	Estero La Patagua	Total
Entradas (L/s)								
Flujo Subterráneo	2,2	1,3	12,9	1,1	9,0	10,2	4,0	40,8
Recarga pp	22,9	13,4	25,3	3,5	10,5	18,6	9,8	104,0
Recarga desde río	15,9	0,2	1,0	0,1	5,0	3,2	0,8	26,2
Recarga desde almacenamientos	38,9	8,6	41,7	13,1	20,4	31,9	12,8	167,5
Desde Pozos	44,6	8,0	17,2	14,4	11,4	17,5	0,0	113,0
Total	124,6	31,6	98,1	32,1	56,3	81,4	27,5	451,6
Salidas (L/s)								
Flujo Subterráneo	1,2	5,0	9,0	8,5	3,4	4,3	9,3	40,7
Descarga hacia carga constante	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,8
Drenes	2,5	0,0	0,6	3,1	0,0	8,4	0,7	15,3
Río	20,0	11,4	1,5	2,0	0,0	0,9	2,6	38,3
Almacenamiento	36,8	14,2	13,6	7,5	7,7	17,3	9,8	106,8
Pozos de bombeo	63,7	1,0	73,3	11,0	45,2	50,6	4,9	249,7
Total	124,6	31,6	98,1	32,1	56,3	81,4	27,5	451,6
Balance (L/s)								
Variación de almacenamiento	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente. Elaboración propia con base en resultados modelo acoplado WEAP Modflow

En la Tabla 5-4, se presenta el balance hídrico subterráneo del río Petorca en el futuro base, se observa que los mayores aportes al acuífero vienen por parte de las recargas de

las precipitaciones y de los pozos de inyección. El total es de 135,3 L/s para toda la cuenca, siendo el mayor aporte el Petorca Poniente. Con relación a las salidas, al igual que en La Ligua, el almacenamiento y los pozos de bombeo, son los que extraen más agua del acuífero. El total de las salidas en toda la cuenca es 135,3 L/s. Por lo que la variación de almacenamiento es nula.

Tabla 5-4. Balance hídrico subterráneo, cuenca Río Petorca (2020-2050)

	Río Pedernal	Estero Las Palmas	Río del Sobrante	Río Petorca Poniente	Río Petorca Oriente	Total
Entradas (L/s)						
Flujo Subterráneo	0,7	2,1	4,8	0,8	3,3	11,7
Recarga pp	1,6	3,9	8,4	5,5	2,1	21,5
Recarga desde río	0,1	0,0	2,9	0,1	0,0	3,1
Recarga desde almacenamientos	1,9	0,9	11,8	7,6	3,6	25,9
Desde Pozos	8,2	0,5	10,0	40,7	13,7	73,2
Total	12,6	7,4	38,0	54,5	22,7	135,3
Salidas (L/s)						
Flujo Subterráneo	2,1	2,4	2,3	1,9	3,2	11,8
Descarga hacia carga constante	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Drenes	0,3	0,2	0,2	0,0	6,2	6,8
Río	2,6	3,2	4,8	20,2	1,2	32,0
Almacenamiento	5,6	1,2	6,3	21,8	7,3	42,1
Pozos de bombeo	2,1	0,4	24,5	10,8	4,8	42,5
Total	12,6	7,4	38,0	54,5	22,7	135,3
Balance (L/s)						
Variación de almacenamiento	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Fuente. Elaboración propia con base en resultados modelo acoplado WEAP Modflow

5.2 Brechas

5.2.1 Brechas en situación actual

La brecha asociada al déficit generado para poder satisfacer las demandas evidenciadas en cada cuenca, fueron abordadas mediante el concepto de demanda insatisfecha y por el déficit anual en el recurso subterráneo.

La demanda insatisfecha, fue determinada a partir de los resultados del modelo acoplado (WEAP y Modflow). En primer lugar, se identifica la demanda insatisfecha en riego,

definida como la diferencia entre la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real. Además, se define la demanda insatisfecha de agua potable como la demanda potencial (estimada a partir de la dotación) y el consumo real de agua.

Para el sector agrícola, la demanda insatisfecha o brecha anual promedio es de 85,7 Hm³ en la década del año 2010 en la cuenca del río Ligua, mientras que en la cuenca del río Petorca, la demanda insatisfecha es igual a 48,3 Hm³ para el mismo periodo de tiempo (Figura 5-10).

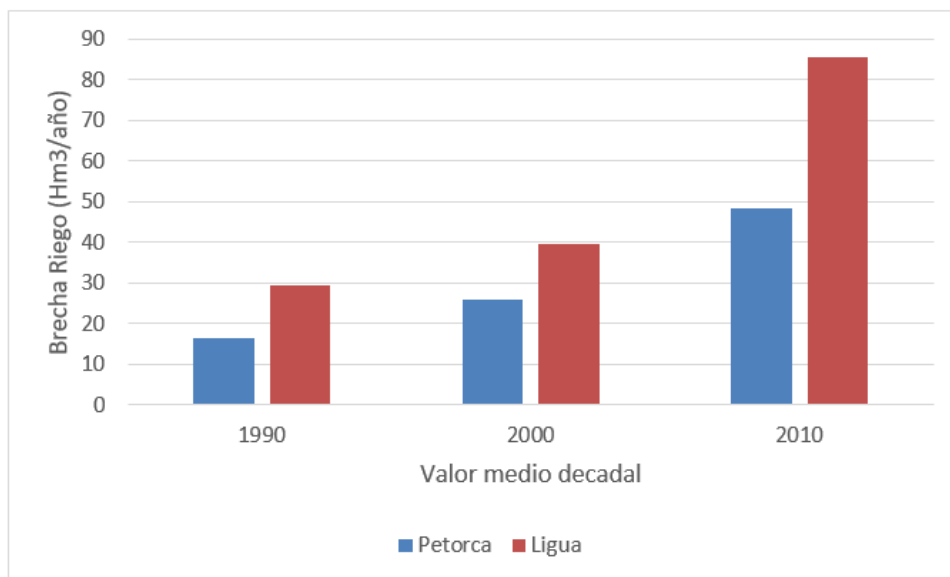


Figura 5-10 Demanda insatisfecha para riego en las cuencas del río Ligua y Petorca

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, acápite 5.2.1).

La demanda insatisfecha del agua potable (Figura 5-11) para la cuenca del río Ligua es de 0,48 Hm³ y para el río Petorca es de 0,52 Hm³, evidenciando que los problemas de abastecimiento existente en ambas cuencas, siendo muy similares entre ellas.

Esto concuerda con lo señalado en distintos estudios y en las instancias de procesos participativos, en donde se evidencia que muchas APR presentan pozos secos debido a la disminución del nivel freático de los SHAC, así como a sistemas de Agua Potable Rural con infraestructura de baja calidad (Análisis realizado a partir de participación ciudadana. Ver Anexo I. Procesos participativos).

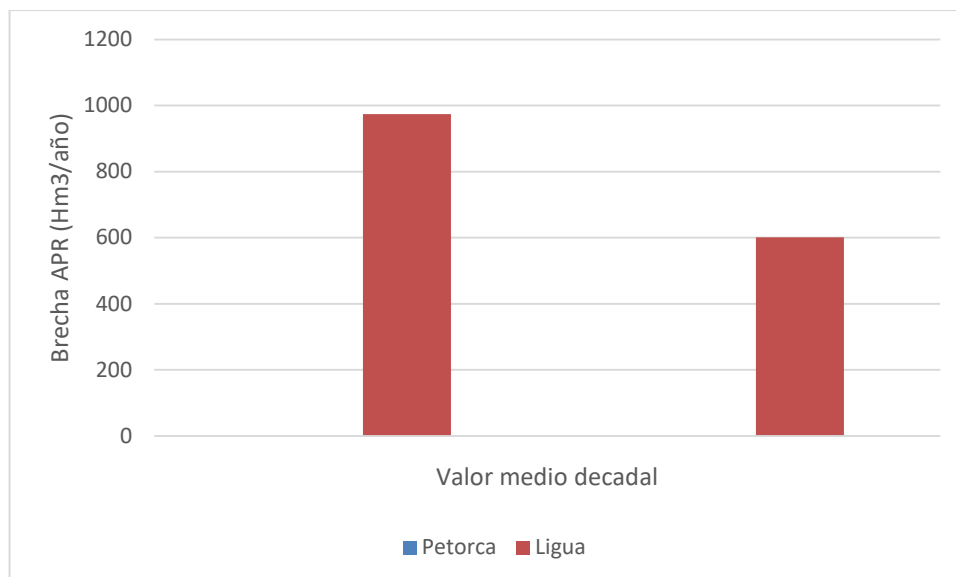


Figura 5-11 Brecha para agua potable rural en las cuencas del río Ligua y Petorca

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, acápite 5.2.1).

Finalmente, el déficit del acuífero en ambas cuencas, como promedio para la última década es igual a en la cuenca del río Ligua 0,83 Hm³ y a 2,2 Hm³ para la cuenca del río Petorca.

Si en cada cuenca se considera la totalidad de la brecha y además el déficit medio decadal del acuífero, es posible determinar el déficit hídrico total de cada cuenca, el cual fue considerado como la brecha hídrica en cada cuenca.

En este sentido, la brecha hídrica correspondiente al promedio entre los años 2010-2019 en la cuenca del río Ligua es igual a -88,9 Hm³ y para el río Petorca es igual a -51,5 Hm³ (Figura 5-12).

La existencia de estas brechas hídricas, tanto agrícola como de consumo humano, pone en evidencia la crítica situación de ambas cuencas, en donde el consumo humano para agua potable rural debe ser abastecido con camiones aljibe y en donde la APR es capaz de abastecer a sus socios, la dotación a entregar ha disminuido por debajo de los 150 l/hab/día, llegando a valores cercanos a 100 l/hab/día.

Por otra parte, la brecha hídrica agrícola, muestra la realidad actual de los agricultores en donde han tenido que disminuir la superficie regada en un 30 a 40% de la superficie total, pasando estas hectáreas a barbecho.

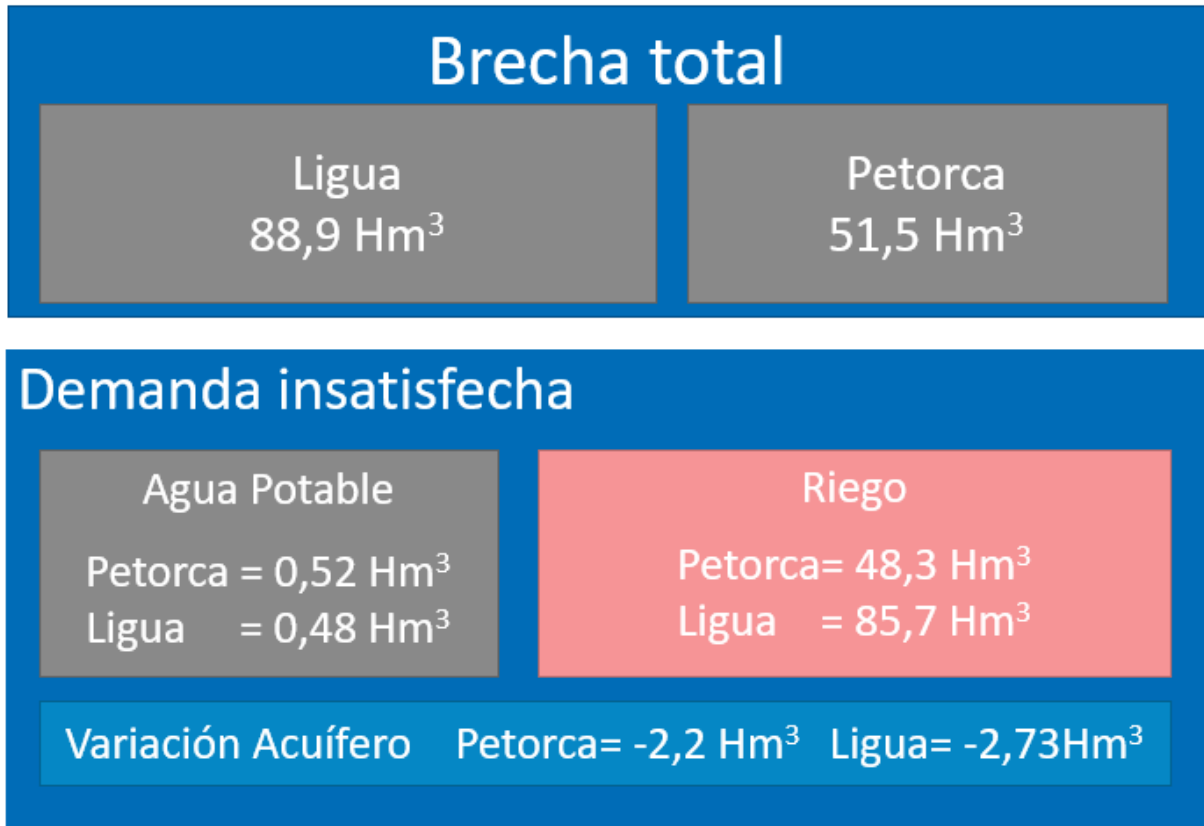


Figura 5-12 Brecha hídrica en las cuencas del río Ligua y Petorca en el periodo 2010-2019

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, acápite 5.2.1).

El balance medio decadal muestra que ambas cuencas son deficitarias y presentan déficit en cada uno de los aspectos analizados (Agricultura, Agua potable rural y disminución del acuífero). Esto lleva a concluir que ambas cuencas están siendo altamente explotadas en niveles mayores a los permitidos para asegurar una sustentabilidad del recurso.

Debido al elevado déficit hídrico de ambas cuencas, el PEGH buscará reducir dicho déficit incorporando medidas o iniciativas que permiten una mejor distribución espacial y temporal del recurso hídrico, una mejor eficiencia en su distribución y gestión, así como la incorporación de nuevas fuentes de agua, permitiendo un uso sostenible de recurso hídrico y sus fuentes naturales.

5.2.2 Brechas proyectadas

Las brechas proyectadas muestran una tendencia similar a la tendencia actual. Considerando un escenario de cambio climático MIROC, el déficit hídrico proyectado entre los años 2040 y 2050 es de 114,1 Hm³ en Ligua y 66,8 Hm³ para Petorca (Figura 5-13)

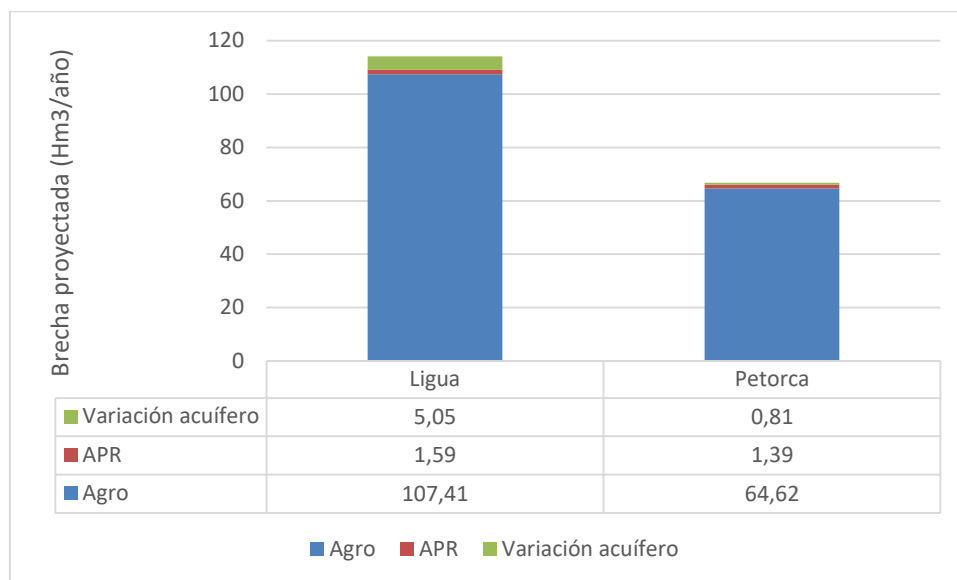


Figura 5-13 Déficit hídrico medio proyectado para la década 2040-2050 en los ríos Ligua y Petorca considerando escenario MIROC

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, Acápite 5.2).

Se aprecia que para la condición proyectada la condición hídrica de la cuenca será más desfavorable que la condición actual (periodo 2010-2019), aumentando en un 15% el déficit hídrico en el río Ligua y un 18% en el río Petorca para la década del año entre los años 2040 y 2050.

5.2.3 Brechas de ecosistemas

Existen otras brechas que no responden a una modelación o a una cuantificación de un déficit hídrico propiamente tal, como son brechas de coordinación en la gestión, brechas de información ante la carencia de ésta, etc.

La información disponible respecto de unidades ecosistémicas muestra un desbalance en el conocimiento de ecosistemas terrestres y acuáticos. Para los ecosistemas acuáticos la información ha sido recopilada de Estudios de Impacto Ambiental que se localizan en la cuenca, pero que no necesariamente reflejan esfuerzos de muestreos a escala de cuenca. A esto se suma, que el eje estratégico a 10 años de este componente es la de conservar, proteger y posiblemente restaurar la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos que de ella dependen, promoviendo un desarrollo sostenible.

Producto de todo lo anterior, es que se desconocen las relaciones de flujo de servicios ecosistémicos a escala reducida del territorio, por ejemplo, se desconoce el aporte en provisión hídrica producto del aumento de superficies dedicadas a la conservación. Asociado a la conservación, existen esfuerzos en ambas cuencas de conservar las fuentes de producción hídrica a través de los sitios prioritarios, no obstante, se refuerza que se desconocen los organismos fotosintéticos, macroinvertebrados, peces que son parte de esos sitios de alto valor en diversidad biológica que se busca conservar en el futuro y de la relación entre su dinámica y la mantención de fuentes de agua o zonas de recarga o de provisión de servicios ecosistémicos hídricos.

La información base biológica, ecológica, hidrológica, cultural, social, entre otras, en cada cuenca es muy escasa, lo que dificulta diagnosticar los servicios ecosistémicos presentes en ambas cuencas mediante un enfoque de gestión integrada del recurso hídrico. Producto de ello las brechas identificadas son para diferentes niveles del conocimiento y disciplinas, transitando a la interdisciplina que permite estimar los beneficios de la provisión de los bienes y servicios ecosistémicos hídricos.

Bajo este contexto, se hace necesario abordar las brechas:

- Aumentar el nivel de entendimiento de los humedales presentes en ambas cuencas.
- Aumentar la información y conocimiento sobre la biodiversidad y funcionamiento de los ecosistemas terrestres y acuáticos a través de diferentes escalas espaciales y territoriales.

Estudiar la pérdida de superficie de vegetación nativa y su consecuente pérdida de los servicios ecosistémicos de provisión y regulación del recurso hídrico.

5.2.4 Brechas de coordinación

La Política de Desarrollo y Sostenibilidad Hídrica para la Región de Valparaíso, propone una Gobernanza a nivel Regional en coordinación con las Organizaciones de Usuarios de Aguas existentes a nivel de las cuencas. Sin embargo, a nivel de cuenca, en este momento las instancias de coordinación son acotadas a las emergencias y con limitada participación de tipo de usuarios. De manera global, se identificaron una serie de debilidades y dificultades que generan brechas de coordinación entre actores públicos y privados, problemas en la gestión hídrica y altos niveles de conflictividad en la cuenca.

Coordinación pública – privado puntual y poco inclusivo.

En la Provincia existen dos Mesas de Agua, la Provincial y la de APRs, las cuales no suelen interactuar. Las CASUB miembros de la Mesa Regional tienen directa llegada a las Autoridades Provinciales y Regionales, mientras que la Mesa de las APR tiene mayor coordinación con el nivel Municipal. El *Plan Agua para Petorca 2018-2022*, generó una diversidad de interesantes iniciativas de coordinación puntual entre los niveles Regional, Local, usuarios y privados que sin embargo se encuentran desarticulados actualmente y sin una visión en común sobre la priorización de los recursos hídricos. Actualmente las iniciativas público-privadas son puntuales y no incorporan a todos los actores en la cuenca. Una encuesta (ver Anexo I, procesos Participativos) a actores de la cuenca de la

Ligua (20 personas, 50% de las cuales eran representantes de APR y servicios de agua, 35% organizaciones del Estado local y regional, 20% asociación de usuarios o productores, y 10% de agrupaciones sociales o independientes), mostró que con las organizaciones que más coordinan ya sea temporal o constante, se tienen las Cooperativas de Agua Rural, Organizaciones sociales, la Gobernación y la Dirección de Obras Hidráulicas. Con la Dirección General de Aguas se menciona más una relación temporal u ocasional, aunque con el SEREMI MOP, solo una organización dijo coordinar. En cuanto a las organizaciones o instancias relacionadas con el agua con las que “Nunca” han coordinado, resaltan el Juzgado de Policía local, el Departamento Jurídico Municipal, la Oficina de Asuntos Hídricos (que solo atiende las APR) y las empresas mineras. A la pregunta de con que organizaciones les gustaría vincularse más, la mayoría responde que, con la DGA, DOH y CNR. La Figura 5-14 muestra un conjunto de actores de la cuenca agrupados por niveles o escalas territoriales-administrativas, y con colores representando el nivel de coordinación mencionado por los actores.

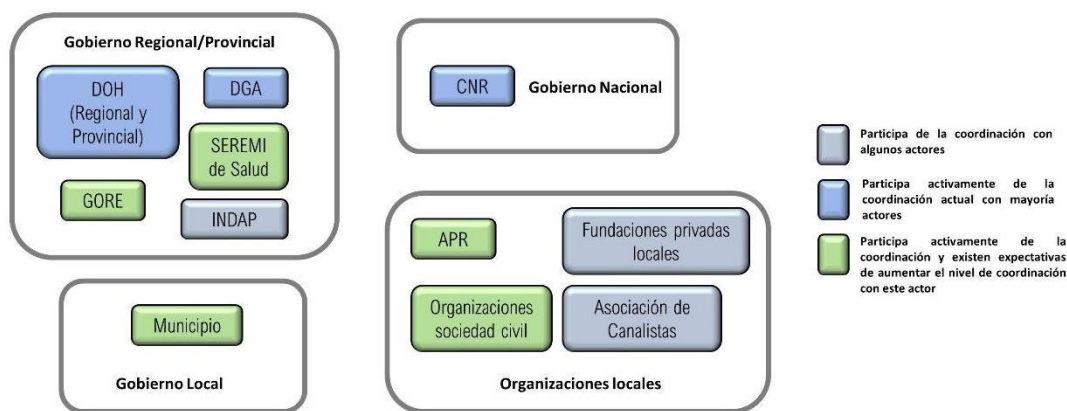


Figura 5-14 Diagrama de coordinación entre actores, actual y deseado para las cuencas de Ligua y Petorca

Fuente: elaborado en base a encuestas online marzo-abril 2020 (ver Anexo I, procesos participativos)

Instancias de coordinación (Mesas del Agua) con distintas capacidades de acción y resolución.

Debido a la grave crisis hídrica se generaron colaboraciones entre OUs y organizaciones del Estado y sociedad civil, que pueden dar señales de como debiese ser la coordinación inter-sectorial. Sin embargo, la mayor parte de las coordinaciones han sido reactivas y puntuales debido a la crisis de escasez hídrica en la Provincia de Petorca. Una de las cuáles sigue vigente son las Mesas del Agua, estando tres mesas activas que abordan las problemáticas de Petorca (Figura 5-15).

- 1.- Mesa de Agua Provincial: desde la coordinación del GORE se crea la Mesa del Agua regional, en donde participan las CASUB y los directores regionales de la DGA, MINAGRI, y DOH, gobernación y otros organismos públicos. Esta mesa del agua se reúne cada mes para buscar soluciones inter-institucionales para problemas de abastecimiento de agua en la Provincia.
- 2.- Mesa del Agua APRs Petorca: se inicia en el año 2017 a través del proyecto Nodo hidrodinámico para la adaptación al Cambio Climático en la Cuenca del río Petorca, de la Cooperativa APR Hierro Vejo (Fondo de Protección Ambiental del MMA). Dentro de sus labores, esta mesa visita a las localidades rurales, con el fin de conocer de forma colectiva y participativa las diversas realidades que presenta el territorio.
3. Mesa del Agua para Petorca: conformada por organizaciones sociales, ONGs y académicos, cuyo propósito es "levantar propuestas político-legislativas para recuperación del agua como derecho humano..." (Faúndez & Mundaca, 2018).

Figura 5-15 Mesas del agua vigentes en las cuencas de los ríos Ligua y Petorca.

Fuente: elaboración propia

Sin embargo, las dos mesas que todavía operan activamente en la Provincia de Petorca (Unión APRs, Mesa del Agua Provincial) enfrentan retos de financiamiento, descoordinación y poca vinculación entre ellas (Tabla 5-5).

Tabla 5-5 Evaluación comparativa de mesas del agua en la Provincia de Petorca.

Característica compartida por diferentes leyes y reglamentos que crean organizaciones de cuenca	Mesa Regional	Mesa Aguas Potable Rural
Las organizaciones están avaladas por leyes nacionales y refrendadas por leyes regionales.	No como organización. Sólo como instituciones del Estado	No como organización. Si como instituciones individuales en la Ley 20.998 de Servicios Sanitarios Rurales
Tienen personería jurídica y poder para recabar fuentes de financiamiento.	Sólo como organizaciones individuales del Estado.	La mesa del agua no cuenta con personería jurídica, pero si la Unión de APRs, la cual está vigente.
Autoridad en una serie de temas de gestión de agua lo cual lo hace ser importantes y necesarios.	Tienen legitimidad como Autoridades competentes en distintos temas.	No poseen autoridad legitimada por alguna política, pero si poseen autoridad basada en confianza en las comunidades
Financiamiento para inicial y para cubrir los costos de operación del sistema de gestión, así como para apoyar inversiones en la cuenca.	Los proyectos se realizan con fondos de las propias entidades participantes no directamente relacionada con el objetivo de la Mesa.	Los gastos de operación de la Mesa fueron financiados por el proyecto Nodo Hidrodinámico de financiación estatal. Hoy se auto gestiona entre la unión de APRs y el APR que recibe la mesa
Las agencias de la cuenca cuentan con apoyo de equipos técnicos estables y de alto nivel que se especializan en las áreas de mayor necesidad según sea la cuenca.	El apoyo técnico viene de las propias organizaciones como parte de su rol técnico (DOH, CNR, DGA, etc.). Además, si es necesario se subcontratan estudios.	Cuentan con un grupo voluntario de profesionales que apoyan en los proyectos, además de las visitas técnicas, mayoritariamente del Servicio de salud Provincial y DOH provincial.
Tienen un buen equipamiento logístico (local, vehículos, redes de observación y monitoreo, equipos	Sólo como organizaciones individuales del Estado y privadas, prestadas en favor de los objetivos de la Mesa.	Cuentan con un equipamiento mínimo, llamado Banco Técnico y Solidario, (como una ferretería popular), y lo administra la Oficina de Asuntos Hídricos.

computacionales etc.) para cumplir sus funciones.		
Las agencias de cuenca o equipos técnicos tienen un local adecuado para facilitar las reuniones y la participación de los actores.	Hacen uso de las oficinas Provinciales.	Cuentan con una oficina gracias a un proyecto presentado al Ministerio de Medio Ambiente (Nodo Hidrodinámico), el cual posee una sala de reuniones, bibliotecas y sistemas demostrativos de eficiencia hídrica.
Capacidades para presentar soluciones, formular planes maestros, crear capacidades, fiscalizar el cumplimiento de los acuerdos, cobrar por el agua y ordenar las intervenciones sobre o que afecte el agua en la cuenca.	No como Mesa, sólo como organizaciones individuales del Estado dentro de sus funciones competentes.	No puede tomar decisiones de planificación ni tienen rol de fiscalización, solo coordinar soluciones a problemas concretos de sus miembros, los cuales no pueden acceder a financiamientos del MOP, por lo tanto, solucionan a través de las llamadas <i>mingas del agua</i>

Fuente: elaboración propia en base a criterios en Dourojeanni et al., 2010. Tonos representan: rojo: criterio no se cumple, amarillo: criterio se cumple a medias, verde: criterio se cumple.

Desigual financiamiento, recursos técnicos y mayor coordinación entre el estado y usuarios.

Esta falta de coordinación también genera desiguales capacidades de las organizaciones de usuarios en cuanto al acceso a recursos económicos y técnicos. Tal cual se indica en el informe de la Gobernación Provincial de Petorca (2018) y en Guerrero (2019), ha habido un gasto importante en infraestructura hidráulica que es desigual y que no necesariamente está enfocada a resolver el problema de escasez, puesto que se ha concentrado en los usuarios que poseen la mayor parte de los derechos de aguas y que a su vez incentivan un uso más intensivo de la misma. Por otra parte, se ha gastado bastante en camiones aljibe (que no resuelven el problema de falta de acceso al agua. Como indica Budds (2012), el acceso a financiamiento e incentivos demanda un entendimiento y familiaridad con el complejo sistema normativo chileno; capacidades que no todas las OUsAs tienen. La estructura demográfica de la población (Anexo J, Descripción y Diagnóstico. Capítulo 3) es también un aspecto que se debe considerar como motivo para la falla de las iniciativas de capacitación anteriores. Esta disímil capacidad de enfrentar las crisis hídricas impacta en los deseos de conformación de nuevas OUsAs (*i. e.* al ver que no se obtienen beneficios de pertenecer a una asociación), en el funcionamiento efectivo de las ya existentes (*i. e.* al verse desplazadas por aquellas con mayor capacidad de pedir fondos públicos) y en la búsqueda consensada de soluciones integradas para las dificultades hídricas de toda la cuenca.

Entrevistas con representantes de 12 organizaciones de usuarios y cooperativas de agua de las cuencas de La Ligua y/o Petorca, respecto del estado de sus organizaciones en 5 aspectos (liderazgo, organización, coordinación, financiamiento y recursos técnicos), mostraron la organización interna, recursos técnicos y la coordinación con otros actores con menores evaluaciones (entre 'bien' y 'más o menos') para la mayoría de las organizaciones. Los recursos técnicos y financiamiento, sin embargo, pareciera que no está uniformemente disponible para todas las organizaciones (Figura 5-16).

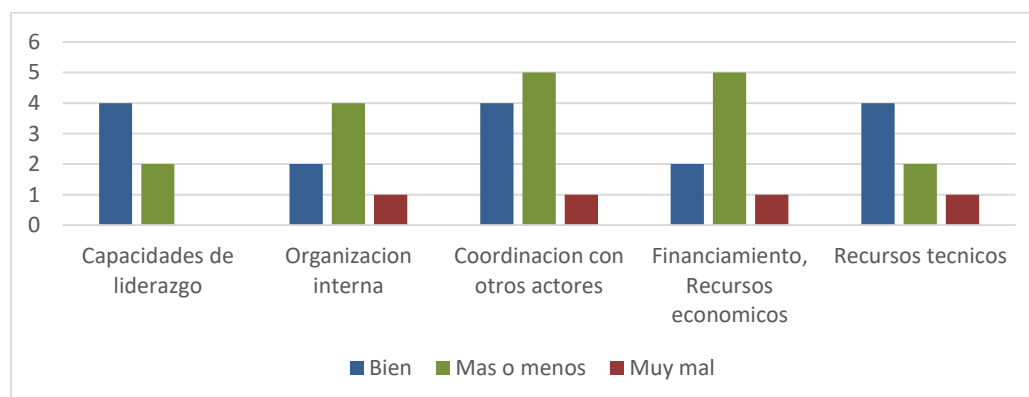


Figura 5-16 Autoevaluación de las organizaciones de usuarios de agua en la Provincia de Petorca.

Fuente: Encuestas online marzo-abril 2020 (ver Anexo I Procesos participativos)

Limitada coordinación entre iniciativas a nivel de cuenca.

A pesar de que existen dos Mesas del Agua muy activas y resolutivas, no hay mucha interacción entre ambas Mesas del Agua, lo que incide en la desarticulación de las distintas intervenciones de gestión hídrica que se llevan a cabo. La falta de una institucionalidad a nivel de cuenca que vele por la equitativa o justa distribución del recurso hídrico genera conflicto entre los distintos usos. En la Región de Valparaíso, en agosto de 2019 se promulgó la Política Hídrica Regional que considera principios básicos como la gestión equilibrada y equitativa entre los distintos usos, la gestión descentralizada concertada y con enfoque de cuenca hidrográfica, sin embargo, no puede establecer prioridades para el uso del agua entre los distintos usos, rol establecido al mercado por el Código de Aguas, motivo por el cual las OUAs, deberán encontrar incentivos y mecanismos que les promuevan a dialogar y buscar puntos en común.

Dificultades para fortalecer y masificar iniciativas exitosas.

A pesar de que se han generado interesantes iniciativas de coordinación interinstitucional a nivel Municipal, como, por ejemplo, la Oficina de Asuntos Hídricos de Petorca que apoya la gestión de las APRs, o la Unión de APRs que permite generar iniciativas como las Mingas del Agua, o la coordinación entre algunas CASUB y APRs, éstas no se han extendido a otras comunas y a otras organizaciones, lo que también limita el aporte que puedan hacer éstas a la gobernanza de la cuenca.

Desvinculación de iniciativas con la sociedad civil organizada.

Diversidad de iniciativas de la sociedad civil (ej. Cabildos por el Agua, juntas de vecinos) que no están vinculadas a otras organizaciones de usuarios que puedan generar interesantes alianzas en el territorio. Los usuarios sin DAA constituidos o ilegales tampoco son parte de instancias interinstitucionales que pudiesen generar acuerdos en común (DGA 2015). De esta necesidad de conectar con otros usuarios y la sociedad civil es que se desarrollaron algunas fundaciones privadas (por ejemplo, FODEPE).

5.2.5 Brechas de información

5.2.5.1 Brechas de información de monitoreo

Dispersión de información registrada y diversidad de plataformas de acceso y visualización.

Si bien INIA y el Ministerio de Agricultura han hecho esfuerzos por poder unificar información y ponerla a disposición de interesados, esta sigue estando dispersa para el usuario poco habituado a plataformas tecnológicas.

En las cuencas de los ríos Ligua y Petorca existen tres redes de medición a nivel de cuenca, aquellas que agrupan información de las estaciones administradas por el INIA, CEAZA y DMC. Además, existe una plataforma web desarrollada y operada por el Ministerio de Agricultura que agrupa estaciones meteorológicas de la Fundación de la Sociedad Agrícola y DMC. Ambas redes despliegan información en línea a tiempo real.

La existencia de estas redes, si bien entregan una cantidad de información que es importante para los niveles de estrés hídrico a los cuales están sometidas, genera confusión en los usuarios, ya que deben acceder a tres redes distintas para poder obtener la información retenida en ellas. Además, la forma de despliegue de los datos es distintas, lo cual genera experiencias de usuarios distintas.

Calidad y cantidad de estaciones de monitoreo deficiente.

Un análisis sencillo de las estaciones de monitoreo presentes en esta cuenca permite determinar la carencia de estaciones. En la cuenca del río Petorca es necesario la instalación de estaciones fluviométricas, meteorológicas y de calidad del agua. En la cuenca del río Ligua es necesario instalar estaciones fluviométricas aguas arriba de los embalses proyectados y en la zona media de la cuenca. Además, se hace necesario instalar estaciones meteorológicas en las zonas altas de la cuenca (Tabla 5-6).

Tabla 5-6 Carencia de cantidad de estaciones de monitoreo en las cuencas de los ríos Ligua y Petorca.

Cuenca	Tipo de estación	Sector
Petorca	Fluviométrica	Es necesario instalar al menos tres estaciones en: <ul style="list-style-type: none"> • Aguas arriba y aguas abajo del embalse las Palmas en el Estero Las Palmas • Aguas abajo del embalse Pedernal en el río Pedernal
Petorca	Meteorológica	Es necesario instalar al menos una estación de ruta de nieve en la zona alta de cuenca
Petorca	Calidad del agua	Es necesario instalar al menos seis estaciones en: <ul style="list-style-type: none"> • Principales afluentes (3) • En la sección media del río (3)
Ligua	Fluviométrica	Es necesario instalar, al menos, 5 estaciones fluviométricas en: <ul style="list-style-type: none"> • Principales afluentes (3) • En la sección media del río (2)
Ligua	Meteorológica	Instalar al menos 2 estaciones de ruta de nieve

Fuente: elaboración propia.

Así mismo, del análisis exploratorio de los datos de las estaciones de medición de calidad de agua, se evidencia una inconsistencia en la cantidad de estaciones de monitoreo "vigentes" con datos, en la cantidad de días muestreados y la cantidad de parámetros medidos en el tiempo. Esta inconsistencia en la información imposibilita una evaluación estacional o el establecimiento de una relación entre el régimen hidrológico de los ríos La Ligua y Petorca y los parámetros evaluados en cada toma de muestras; lo anterior, trae como consecuencia el desconocimiento de la calidad de agua real en los usos por SHAC y en cada cuenca, así como la dinámica temporal y espacial de los parámetros medidos.

5.2.5.2 Brechas de información de conocimiento

Caracterización de la hidrogeología del territorio y acceso a dicha información por parte de actores.

Respecto a la información sobre caracterización del territorio, se evidencia la carencia de información hidrogeológica a una escala local, puesto que las APR tienen desconocimiento sobre la litología en los pozos donde extraen agua, con lo cual, no solo no cuentan con los recursos necesarios para realizar profundizaciones de sus pozos, sino que además tienen la incertidumbre sobre la efectividad de la profundización en caso de realizarla. Sin embargo, existen otros actores, como por ejemplo algunas CAS que. 1) presentan mejor nivel organizacional interna, y 2) cuentan con mayores recursos, en donde han invertido, tanto en estudios específicos como en la ejecución de la profundización. Esta carencia de información a nivel local y pública, profundiza la brecha de acceso a la información entre los distintos actores, en donde aquellos con más recursos y organización interna logran mejorar sus condiciones de extracción de agua subterránea.

Conocimiento desactualizado de la infraestructura civil hidráulica.

Si bien existen estudios realizados por parte de la DGA o CNR sobre la infraestructura hidráulica asociada al riego o acumulación de agua, no se cuenta con un conocimiento acabado y actualizado de información sobre los canales destinados a riego como (ubicación, material, longitud, usuarios vinculados, caudal, entre otros) dificultando la estimación de pérdidas/ganancias y su caracterización dentro de un modelo hidrológico superficial.

Conocimiento desactualizado de las superficies agrícolas sin tecnificar.

Los catastros frutícolas y censos agropecuarios representan un esfuerzo significativo por mantener actualizadas las estadísticas en torno al sector agrícola (especies cultivadas, tecnificación, entre otros). Sin embargo, no se dispone información concreta sobre los predios no tecnificados, área, eficiencia de riego, cultivos asociados y localización, dificultando la modelación hidrológica superficial. Así mismo, dicho conocimiento facilitaría la priorización los esfuerzos económicos y de apoyo logístico por parte de la CNR orientados al apoyo dirigido a los agricultores para tecnificar sus sistemas de riego.

Conocimiento escaso sobre información base que permita evaluar los bienes y servicios ecosistémicos y el bienestar hidro-social.

La información disponible respecto de unidades ecosistémicas muestra un desbalance en el conocimiento de ecosistemas terrestres y acuáticos. Para los ecosistemas acuáticos la información ha sido recopilada de Estudios de Impacto Ambiental que se localizan en la cuenca, pero que no necesariamente reflejan esfuerzos de muestreos a escala de cuenca. A esto se suma, que el eje estratégico a 10 años de este componente es la de conservar, proteger y posiblemente restaurar la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos que de ella dependen, promoviendo un desarrollo sostenible.

Producto de todo lo anterior, es que se desconocen las relaciones de flujo de servicios ecosistémicos a escala reducida del territorio, por ejemplo, se desconoce el aporte en provisión hídrica producto del aumento de superficies dedicadas a la conservación. Asociado a la conservación, existen esfuerzos en ambas cuencas de conservar las fuentes de producción hídrica a través de los sitios prioritarios, no obstante, se refuerza que se desconocen los organismos fotosintéticos, macroinvertebrados, peces que son parte de esos sitios de alto valor en diversidad biológica que se busca conservar en el futuro y de la relación entre su dinámica y la mantención de fuentes de agua o zonas de recarga o de provisión de servicios ecosistémicos hídricos.

5.2.5.3 Brechas de acceso a la información

Existe una brecha de acceso a la información dada por los recursos propios que puedan contar las distintas OUA, lo cual se acentúa entre las CAS y las APR

5.2.5.4 Brechas de información de capacidades

Otro aspecto importante, es indicar que, sobre las cuencas de Petorca y Ligua, diversas instituciones estatales han realizado estudios sobre la disponibilidad hídrica y han generado políticas de gestión, como por ejemplo la Política Hídrica Regional desarrollada por el GORE. De los cuales han desarrollado modelos que permiten simular distintas condiciones hipotéticas.

De esta forma, existe suficientes análisis de la problemática de la cuenca y existen una buena batería de posibles acciones a realizar, sin embargo, la escasa coordinación entre las instituciones involucradas o la definición de una estrategia común para las cuencas en cuestión.

La generación de información técnica en distintas iniciativas realizadas por las instituciones públicas genera información de calidad, pero que no es entendible por los actores de la cuenca, así como tampoco utilizable por ellos.

5.3 Sustentabilidad

La presente sección tiene como objetivo describir los criterios de sustentabilidad desarrollados por la DGA, con el objetivo de evaluar el estado del acuífero considerando diferentes aspectos.

Estos criterios son definidos en 5 subcriterios orientados a:

Criterio 1: Evaluar descensos generales en cada SHAC. Si los descensos del nivel del acuífero son sostenidos en el tiempo y mayores al 5% del Volumen inicial, entonces se considera que el sistema no es sustentable

Criterio 2: Este criterio busca no afectar los recursos superficiales ya comprometidos. El grado de interacción debe ser menor que 10% de los flujos superficiales pasantes en cada una de las zonas, evaluados como el caudal promedio anual de 85% de probabilidad de excedencia.

Criterio 3: Para cada sector hidrogeológico, el modelo debe permitir una extracción mínima de un 95% de caudal ingresado como demanda y la oferta estará dada por el caudal de los pozos que el modelo indica que son factibles de obtener.

Criterio 4: En cada sector hidrogeológico no debe haber más de un 5% de pozos desconectados o colgados. En caso contrario el sector quedará cerrado.

Criterio 5: Verificar que el aumento de extracciones desde un sector no afecte la disponibilidad sustentable de otro sector aguas abajo o aguas arriba. El cumplimiento de este criterio estará dado porque ninguno de los sectores abiertos en que se aumente la demanda provoque el no cumplimiento de los criterios para los otros sectores abiertos, o para los sectores cerrados.

Los criterios 4 y 5 no pudieron ser implementados por no disponer de la información necesaria para incorporarla a la modelación hidrológica acoplada.

5.3.1 Resultados

Criterio de sustentabilidad 1

Se presenta en la Tabla 5-7, los resultados del criterio de sustentabilidad 1, dividido por SHAC. Se puede observar los volúmenes iniciales y finales, la variación de éstos y el límite inferior mínimo permitido. Analizando los datos obtenidos, se indica que el criterio de sustentabilidad 1, es no sustentable en 3 SHACs (Estero Los Ángeles, Estero Patahua y Río La Ligua Oriente), para el resto de los SHACs, este criterio se clasifica como sustentable. Así mismo, para el total de la cuenca, el criterio también es sustentable.

Tabla 5-7. Criterio de sustentabilidad 1, cuenca La Ligua

SHAC	V_0 [Hm^3]	V_{50} [Hm^3]	Variación [Hm^3]	Límite mínimo permitido [Hm^3]	Evaluación
Estero Alicahue	579,4	598,1	18,7	550,5	Sustentable
Estero Los Ángeles	109,4	61,6	-47,8	103,9	No Sustentable
Estero Patahua	483,1	424,4	-58,7	458,9	No Sustentable
Río La Ligua Cabildo	215,7	347,2	131,5	204,9	Sustentable
Río La Ligua Costa	341,2	487,6	146,4	324,2	Sustentable

Río La Ligua Oriente	19,3	11,1	-8,2	18,4	No Sustentable
Río La Ligua Pueblo	69,4	91,9	22,5	65,9	Sustentable
Total	1817,5	2021,9	204,4	1726,7	Sustentable

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada Capítulo 6).

Por su parte, se presenta en la Tabla 5-8, los resultados del criterio de sustentabilidad 1 para la cuenca del río Petorca, se observa que este criterio es sustentable sólo para la subcuenca Estero Las Palmas, para el resto de las subcuencas este criterio se clasifica como no sustentable, al igual que para la totalidad de la cuenca.

Tabla 5-8. Criterio de sustentabilidad 1, cuenca Petorca

SHAC	V _o [Hm ³]	V ₅₀ [Hm ³]	Variación [Hm ³]	Límite mínimo permitido [Hm ³]	Evaluación
Río Petorca Oriente	16,8	9,0	-7,8	16,0	No Sustentable
Río Petorca Poniente	66,1	50,1	-16,0	62,8	No Sustentable
Río Pedernal	34,9	31,0	-3,9	33,2	No Sustentable
Estero Las Palmas	22,6	28,7	6,	21,5	Sustentable
Río Sobrante	146,3	119,0	-27,3	139,0	No Sustentable
Total	286,7	237,8	-48,9	272,5	No Sustentable

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, capítulo 6).

Criterio de sustentabilidad 2

En la Tabla 5-9 y la Tabla 5-10, se presentan los caudales de afloramiento y recarga de las cuencas La Ligua y Petorca, respectivamente. En éstas se observa que en el río La Ligua, todos los SHACs son sustentables para los caudales de afloramiento, sin embargo, para los caudales de recarga, esto ocurre en todos excepto en Estero Lo Ángeles, no obstante la cuenca se evalúa como sustentable..

Por otra parte, en la cuenca del río Petorca, se debe indicar que es sustentable para todos los SHACs en lo que a caudal de afloramiento, excepto para Petorca Oriente. Para el caso de los caudales de recarga todos los SHACs son sustentables, por lo que la cuenca del río Petorca se clasifica como sustentable.

	Estero Alicahue	Estero Los Ángeles	Estero Patahua	Río La Ligua Cabildo	Río La Ligua Costa	Río La Ligua Oriente	Río La Ligua Pueblo	Total
Afloramiento								
Q ₅₀ [L/s]	0,002	0,0	0,0006	0,0007	0,007	0,0	0,003	0,01
Q ₀ [L/s]	0,07	0,01	0,002	0,03	0,04	0,0006	0,01	0,2
Diferencia [L/s]	-0,07	-0,01	-0,001	-0,03	-0,03	-0,0006	-0,007	-0,2
10%Q anual probabilidad 85% [L/s]	0,0002	0,0	6,3 E-5	5,7 E-5	0,0008	0,0	0,0003	0,001
Evaluación	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable
Recarga								
Q ₅₀ [L/s]	0,02	0,009	0,007	0,02	0,02	0,009	0,002	0,09
Q ₀ [L/s]	0,006	0,002	0,003	0,007	0,003	0,004	0,0008	0,03
Diferencia [L/s]	0,01	-0,007	0,004	0,01	0,02	0,005	0,001	0,04
10%Q anual probabilidad 85% [L/s]	0,003	0,0007	0,0005	0,001	0,001	0,0006	0,0002	0,06
Evaluación	Sustentable	No sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	0,007
Evaluación Total	Sustentable	No sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable

Tabla 5-9. Caudales de afloramiento y recarga cuenca río La Ligua

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, capítulo 6).

Tabla 5-10. Caudales de afloramiento y recarga cuenca río Petorca

	Río Petorca Oriente	Río Petorca Poniente	Río Pedernal	Estero Las Palmas	Río Sobrante	Total
Afloramiento						
Q ₅₀ [L/s]	0,007	0	0,0003	0,0002	0,0002	0,01
Q ₀ [L/s]	0,004	0,008	0,005	0,0004	0,008	0,2
Diferencia [L/s]	0,003	-0,008	-0,005	-0,0002	-0,008	-0,1
10%Q anual probabilidad 85% [L/s]	0,0006	0,0	2,5 E-5	1,5 e-5	1,8 E-5	0,0006
Evaluación	No Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable
Recarga						
Q ₅₀ [L/s]	0,001	0,004	0,001	0,004	0,008	0,02
Q ₀ [L/s]	0,0006	0,0009	0,0004	0,004	0,001	0,007
Diferencia [L/s]	0,0004	0,003	0,0006	0,0	0,007	0,01
10%Q anual probabilidad 85% [L/s]	0,001	0,003	0,0008	0,003	0,005	0,01
Evaluación	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable
Evaluación Total	No sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable	Sustentable

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada).

Criterio de sustentabilidad 3

En la Tabla 5-11 y la Tabla 5-12 se presentan los caudales de oferta y demanda de los ríos La Ligua y Petorca, respectivamente. Se puede observar, en la cuenca del río La Ligua que, en general la demanda no es satisfecha, con excepción del SHAC Estero Alicahue, en donde ésta es satisfecha en un 100%. No obstante, la cuenca se clasifica como no sustentable para el criterio 3.

En el caso de la cuenca del río Petorca, se aprecia un comportamiento similar que el río La Ligua, siendo la demanda no satisfecha en todos los SHACs.

Tabla 5-11. Caudales de oferta y demanda río La Ligua

	Estero Alicahue	Estero Los Ángeles	Estero Patahua	Río La Ligua Cabildo	Río La Ligua Costa	Río La Ligua Oriente	Río La Ligua Pueblo	Total
Caudal de demanda [m ³ /año]	866.257,7	8.864.381,5	3.255.826,3	18.334.466,1	359.807,0	27.132.704,9	9924637,0	68.738.080,5
Caudal de oferta [m ³ /año]	1.793.584,4	58.793,8	11.822,9	337.254,1	21.163,9	772.854,6	368.608,5	3.364.082,2
Porcentaje de satisfacción de demanda [%]	207,0	0,7	0,4	1,8	5,9	2,8	3,7	68.738.080,5
Clasificación	No sustentable	No sustentable	No sustentable	No sustentable	No sustentable	No sustentable	No sustentable	No Sustentable

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, Capítulo 6).

Tabla 5-12. Caudales de oferta y demanda río Petorca

	Río Petorca Oriente	Río Petorca Poniente	Río Pedernal	Estero Las Palmas	Río Sobrante	Total
Caudal de demanda [m ³ /año]	17.829.550,6	15.189.636,1	9.690.445,8	4.982.486,9	1.575.253,9	49.267.373,3
Caudal de oferta [m ³ /año]	310.347,3	741.982,3	116.538,4	391.513,7	305.958,7	1.866.340,4
Porcentaje de satisfacción de demanda [%]	1,7	4,9	1,2	7,9	19,4	3,8
Clasificación	No Sustentable	No Sustentable	No Sustentable	No Sustentable	No Sustentable	No Sustentable

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, capítulo 6).

5.4 Indicadores hídricos de la cuenca

Para evaluar el comportamiento de la cuenca ante las demandas de agua por parte de los usuarios, se utilizaron tres indicadores. Estos indicadores dan cuenta del déficit hídrico en la cuenca, el nivel de sobreexplotación del acuífero y de la satisfacción de la demanda, dando así una mirada más global sobre el comportamiento hídrico de la cuenca y de la efectividad de las iniciativas que componen el PEGH. Los tres indicadores son: Brecha hídrica (Hm^3), Cobertura de la demanda (%) y variación del almacenamiento del acuífero (Hm^3)

La brecha hídrica es el déficit de agua expresado en volumen en un periodo de tiempo, ya sea mensual, anual, decadal, etc.

La cobertura de la demanda puede entenderse como el porcentaje de la demanda que se cumple para un cierto porcentaje del tiempo en el año. Se calcula comparando la demanda con el agua efectivamente entregada en cada paso de tiempo. Esta se calcula como $\text{Entregas}_t / \text{Demanda}_t$ (ambos términos calculados por el modelo hidrológico acoplado). De esta manera se genera una serie de tiempo en el que los valores tienen un rango entre 0 y 1, siendo 0 una satisfacción nula de la demanda y 1 como una satisfacción completa de la demanda. A esta serie se le calculan los percentiles de 99% para la demanda de agua potable y de 85% para la demanda agrícola y se obtienen las confiabilidades APR y Agro que es satisfecha un 99% de las veces y un 85%, respectivamente. Estos porcentajes fueron elegidos porque son los que comúnmente se asocian a satisfacción de demandas en ambos sectores, aunque podrían ser usados otros valores.

Las demandas agrícolas se calcularon como la demanda evapotranspirativa de todos los cultivos presentes en la cuenca (m^3) y las entregas que dependen de la disponibilidad del recurso, pero también de aspectos tecnológicos como profundidad de pozos y restricciones de infraestructura para obtener agua de fuentes superficiales. Las demandas APR se calculan simplemente como la multiplicación de la población de cada APR por la dotación diaria definida por sus derechos de agua.

Si bien para este Plan, se ha elaborado en demanda completamente antrópicas, se podría ampliar a otros requerimientos ecológicos, como cumplimiento de un caudal ambiental, humedad para bosque nativo, etc.

El tercer indicador es la variación del volumen almacenado en el acuífero. Este indicador no solo está relacionado con la sustentabilidad del acuífero (Criterio 1), sino que es un complemento a la estimación de la brecha a partir de la demanda insatisfecha. Por ejemplo, la demanda de un uso puede estar satisfaciéndose completamente y por tanto, la brecha será nula (entendida como demanda insatisfecha) y la cobertura será de un 100%. Sin embargo, si la demanda es satisfecha por agua subterránea entonces el volumen de agua subterránea debe ser considerada como parte del déficit hídrico asociado a dicho uso

5.4.1 Indicadores bajo condición histórica

Evaluando los indicadores (brecha, variación del acuífero y cobertura demanda) para la condición histórica, nos dará un diagnóstico del estado de la cuenca para estos tres indicadores. Este diagnóstico será usado como punto de partida para evaluar las mejoras que propone el PEGH en la situación hídrica de la cuenca

El promedio decadal de los 3 indicadores para la cuenca del río Ligua se muestra en la Tabla 5-13. De igual forma, en la Tabla 5-14 se muestra el equivalente para la cuenca del río Petorca

Tabla 5-13 Indicadores de brecha, cobertura de la demanda y variación del acuífero para la condición histórica en la cuenca del río Ligua

Década	Brecha (Hm ³ /año)		Cobertura (%)		Variación del acuífero (Hm ³ /año)
	Agrícola	Agua potable Rural	Agrícola	Agua potable Rural	
1990	29,27	0,00	59,8%	100,0%	-
2000	39,65	0,12	65,4%	93,2%	-1,86
2010	85,67	0,48	47,4%	76,8%	-2,73

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, acápite 5.2.1).

Para la última década (2010-2019), se aprecia que cobertura agrícola y APR, es menor al 100%, esto significa que no se satisfacen las demandas. Particularmente, la agricultura solo se satisface un 47,4% del tiempo, el agua potable un 76,8% de la demanda.

Tabla 5-14 Indicadores de brecha, cobertura de la demanda y variación del acuífero para la condición histórica en la cuenca del río Petorca

Década	Brecha (Hm ³ /año)		Cobertura (%)		Variación del acuífero (Hm ³ /año)
	Agrícola	Agua potable Rural	Agrícola (p85)	Agua potable Rural (p99)	
1990	16,35	0,00	65,9%	92,9%	-
2000	25,84	0,25	63,3%	84,9%	-1,33
2010	48,26	0,52	50,3%	71,3%	-2,21

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, acápite 5.2.1).

Para la última década (2010-2019), se aprecia que cobertura agrícola y APR, es menor al 100%, esto significa que no se satisfacen las demandas. Particularmente, la agricultura solo se satisface un 50,3% del tiempo, el agua potable un 71,3% de la demanda.

La situación descrita anteriormente para la cuenca del río Ligua y Petorca, muestra una disminución temporal de los tres indicadores desde la década de 1990 en adelante, en donde se produce un aumento de la brecha y una disminución de la cobertura.

5.4.2 Indicadores bajo condición futura

Los indicadores ya descritos anteriormente fueron evaluados bajo la condición futura desarrollada para este Plan. Esta condición se basa considerando las proyecciones de cambio climático con los escenarios MIROC y CSIRO. Cabe mencionar que se utilizó el mismo patrón de la serie histórica para proyectar las series climáticas hasta 2060.

El promedio de la década 2040-2050 de los 3 indicadores para la cuenca del río Ligua se muestra en la Tabla 5-15. De igual forma, en la Tabla 5-16 se muestra el equivalente para la cuenca del río Petorca

Tabla 5-15 Indicadores de brecha, cobertura de la demanda y variación del acuífero para la condición futura en la cuenca del río Ligua

Década	Brecha (Hm ³ /año)		Cobertura (%)		Variación del acuífero (Hm ³ /año)
	Agrícola	Agua potable Rural	Agrícola (p85)	Agua potable Rural (p99)	
2020	98,80	0,0	45,3%	71,3%	-4,31
2030	107,41	1,09	41,6%	62,9%	-4,96
2040	98,92	1,59	45,2%	55,1%	-5,05

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, acápite 5.2.1).

Se aprecia que la condición de los 3 indicadores muestra que el déficit hídrico en el río Ligua irá aumentando, particularmente, se hace evidente el aumento de la brecha respecto a la condición histórica y la disminución de la cobertura, llegan a niveles preocupantes puesto que para la década del 2040, la cobertura será del 50% de la demanda.

Tabla 5-16 Indicadores de brecha, cobertura de la demanda y variación del acuífero para la condición futura en la cuenca del río Petorca

Década	Brecha (Hm ³ /año)	Cobertura (%)	Variación del acuífero
--------	-------------------------------	---------------	------------------------

	Agrícola	Agua potable Rural	Agrícola (p85)	Agua potable Rural (p99)	(Hm³/año)
2020	59,88	0,81	45,9%	60,2%	-1,55
2030	64,62	1,08	42,7%	53,4%	-1,17
2040	59,86	1,39	45,8%	47,8%	-0,81

Fuente: elaboración propia a partir de la modelación hidrológica superficial (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, acápite 5.2.1).

Al igual que en la cuenca del río Ligua, en la cuenca del río Petorca, los indicadores muestran situaciones críticas en torno al recurso hídrico, en donde se evidencia un aumento de la brecha hídrica y una disminución de la cobertura por debajo del 50% de la demanda.

Realizando un análisis conjunto de la brecha, de las coberturas y además de la variación del volumen de almacenamiento del acuífero, se aprecia que ambas cuencas presentan un déficit importante de agua, y que el problema se ha ido acrecentando con el tiempo, teniendo como promedio decadal (2010 al 2019) un déficit hídrico de 87 y 53 Hm³ para Ligua y Petorca, respectivamente. Esto indica claramente que ambas cuencas son deficitarias, y que dicho déficit no es exclusivamente estacional, y por tanto, esta situación no se subsana exclusivamente con redistribuir temporalmente el recurso, sino que complementando con una mejora en eficiencias de uso, permitiendo la recarga del acuífero y eventualmente la incorporación de nuevas fuentes.

Las proyecciones a futuro muestran un escenario agravado a la condición actual, debido a la disminución de precipitación en ambas cuencas en torno a un 20%. En caso de mantener la condición actual de gestión y aprovechamiento del recurso hídrico, el déficit de ambas cuencas aumentaría en 18% respecto a la condición actual (periodo 2010-2019), llegando a un déficit hídrico 114,1 Hm³ en Ligua y 66,8 Hm³ en Petorca en 2050.

De acuerdo a estos resultados, el objetivo hídrico de ambas cuencas se debe orientar a disminuir el déficit hídrico, aumentar la confiabilidad en la satisfacción de la demanda, todo esto bajo la condición de asegurar una sustentabilidad del acuífero. En este contexto, se hace poco probable planificar un aumento de la demanda, por el contrario, es factible que sea necesario reducir dicha demanda.

5.5 Análisis de sensibilidad

5.5.1 Descripción de escenarios de simulación

Como una forma de evaluar la eficacia de las alternativas para mejorar los indicadores de brecha, cobertura y variación del almacenamiento del acuífero, se simulan en el modelo hidrológico acoplado algunas de las iniciativas definidas en el Capítulo 7. Las iniciativas seleccionadas fueron aquellas que efectivamente puedan ser implementadas según las hipótesis y limitaciones del propio modelo. En las Tabla 5-17 y Tabla 5-18 se muestran los escenarios definidos por las acciones correspondientes. Todos los escenarios se listan y describen a continuación:

Tabla 5-17 Escenarios generados para simulación de efectividad de las medidas.

Escenario WEAP	Descripción	Código de la acción o iniciativa
Reference	<p>Simulación de la condición climática y de demanda histórica de la cuenca:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El clima usado proviene de los modelos engrillados del CR2MET desde 1979 a 2019. Los valores de cada grilla se extraen para cada HRU a simular a nivel semanal. • La demanda agronómica está definida por las superficies agrícolas y sus coeficientes de cultivos en un catchment agrícola de WEAP. Sus áreas son variables y se generan a partir de información histórica de Censos Agropecuarios e imágenes satelitales. • La demanda legal está definida por los DAA otorgados por DGA en un nodo de demanda WEAP, pero con consumo cero. Estos nodos de demanda se unen con nodos de demanda agronómica en cada zona de riego. • Si en un paso de tiempo, la demanda agronómica es menor a la demanda legal (en invierno generalmente), la demanda insatisfecha es cero y el remante entre la demanda legal y la agronómica es devuelta al acuífero; caso contrario, en ese paso de tiempo se genera un valor mayor a cero de demanda insatisfecha. 	No aplica
Futuro Base (FB)	<ul style="list-style-type: none"> • Clima histórico modificado con factores de cambio climático para Precipitación y Temperatura con el modelo MIROC. • El horizonte de tiempo de simulación corresponde desde el año 2020 a 2050 • Las condiciones históricas de uso de suelo, así como las proporciones de los diferentes cultivos se mantienen constantes a partir del año 2020. • Las demandas de agua potable tienen un incremento anual según crecimiento poblacional (la dotación se mantiene), sin embargo, los derechos de aprovechamiento se mantienen constantes desde el año 2020. 	No aplica

Fuente: Elaboración propia (Anexo H Modelación Hidrológica acoplada, cap.4.4).

Es importante recalcar que todos los escenarios Futuro Base se anidan bajo el escenario Futuro Base, y cada uno de ellos contiene las mismas características que el escenario Futuro Base, más las modificaciones específicas de cada escenario.

En estos nuevos escenarios se simulan en forma independiente algunas de las acciones descritas en el Capítulo 7. Es decir, para las condiciones meteorológicas y de demanda (agrícola y demanda de agua potable) definidas en el escenario Futuro Base (FB) se agregan en el modelo hidrológico acoplado los distintos elementos que simulan las acciones a modelar.

Las acciones se han supuesto que se implementan desde el inicio del futuro base, es decir desde el año 2020 y no necesariamente coincide con el plazo de inicio estipulado en cada acción (corto, mediano o largo plazo). De esta manera, estas acciones pueden compararse entre sí y también evaluar la mejora en los indicadores con respecto a sus escenarios base de cambio climático. La Tabla 5-18 describe estos escenarios:

Tabla 5-18 Escenarios base generados para simulación de efectividad de las medidas.

Escenario WEAP	Descripción	Código de la acción
(FB) + Aducciones APRs	<p>Aducciones para alimentar a APRs, desde sectores alto de ambas cuencas. En Petorca se simuló la Aducción Hierro Viejo y en La Ligua, la Aducción Alicahue.</p> <p>Supuesto: Estas acciones van orientadas exclusivamente a dotar de agua a APR que estén conectada a dichas aducciones.</p>	NF-08 y NF-02
(FB) + Embalse Las Palmas	<p>Incorporación de nueva infraestructura proyectada, específicamente el Embalse Las Palmas en cuenca río Petorca.</p> <p>Supuesto: el volumen embalsado se asigna exclusivamente a nodos agrícolas conectados al embalse bajo una determinada regla de operación</p>	NF-04
(FB) + Embalse Pedernal	<p>Incorporación de nueva infraestructura proyectada, específicamente el Embalse Pedernal en cuenca río Petorca.</p> <p>Supuesto: el volumen embalsado se asigna exclusivamente a nodos agrícolas conectados al embalse bajo una determinada regla de operación</p>	NF-07
(FB) + Embalse Los Ángeles	<p>Incorporación de nueva infraestructura proyectada, específicamente el Embalse Los Ángeles en cuenca río La Ligua.</p> <p>Supuesto: el volumen embalsado se asigna exclusivamente a nodos agrícolas conectados al embalse bajo una determinada regla de operación</p>	NF-05
(FB) + Embalse La Chupalla	<p>Incorporación de nueva infraestructura proyectada, específicamente el Embalse La Chupalla en cuenca río</p>	NF-06

Escenario WEAP	Descripción	Código de la acción
	<p>La Ligua.</p> <p>Supuesto: el volumen embalsado se asigna exclusivamente a nodos agrícolas conectados al embalse bajo una determinada regla de operación</p>	
(FB) + Nuevas Fuentes	<p>Se considera la incorporación de agua desde desalación por 1 m³/s</p> <p>Supuesto: el caudal se reparte equitativamente entre las dos cuencas y se asigna exclusivamente a nodos agrícolas conectadas</p>	NF-03
(FB) + Organización	<p>Se considera la conformación de una entidad única en la cuenca encargada de repartir el agua en base a alícuotas si los caudales superficiales o volúmenes subterráneos.</p> <p>Supuesto: se le asignó máxima prioridad al consumo humano, simulado en nodos de demanda para APR, los cuales se les asignó prioridad 1 y al resto de los usos, prioridad 2</p>	FO-01; FO-02; FO-03; AG-04
(FB) + Prorrato	<p>Se considera la operatividad del comité del agua que limita la extracción en un 30% de los derechos de agua</p> <p>Supuesto: Solo consideraría para los nodos agrícolas. La demanda APR no se ve afectada por este prorrato</p>	FO-01; FO-02; FO-03; AG-04
(FB) + eficiencia	<p>En este escenario se propone mejorar el uso del agua en la zona agrícola en base a dos acciones: i) disminuir las pérdidas en el riego intrapredial, y ii) disminuir las pérdidas por conducción en los canales de riego del sistema</p> <p>Supuesto: se espera una eficiencia a un nivel de 85%</p>	ME-01 y ME-02

Fuente: elaboración propia (Ver Anexo H, modelación hidrológica acoplada, acápite 4.4)

5.5.2 Resultados obtenidos y comparación de escenarios

A continuación, se muestran los resultados de los escenarios Futuro Base (usando como base el modelo MIROC) y de los escenarios de gestión definidos de acuerdo a las iniciativas analizadas (ver capítulo 6) los cuales fueron evaluados en el periodo 2040-2050 (mayor detalle de la implementación de dichas iniciativas en la modelación puede verse en Anexo H, Modelación Hidrológica acoplada, Capítulo 5).

Para el río Ligua, el escenario histórico (ver Tabla 5-13), se aprecia que la brecha agrícola es elevada llegando casi a los 86 Hm³/año y la cobertura de la demanda agrícola es

menor al 50%. En el caso del agua potable rural, la cobertura de la demanda de agua potable es igual a 55% de la demanda. En consecuencia, la cuenca del río Ligua presenta un alto porcentaje de insatisfacción de la demanda en la actualidad.

Para evaluar la eficacia de distintas iniciativas, se simularon distintos escenarios basados en una iniciativa en particular (definidas en el capítulo 6). Estos escenarios contemplan que cada iniciativa comienza en el año 0 del escenario futuro, es decir, en el año 2020. Es necesario indicar que el comienzo de esta iniciativa en estos escenarios independientes de simulación, no coincide necesariamente con el plazo de comienzo de la iniciativa propuesto en el Plan (mayor detalle de la implementación de dichas iniciativas en la modelación puede verse en Anexo H, Modelación Hidrológica acoplada, Capítulo 5).

Los resultados de cada escenario muestran el nivel de eficacia en mejorar la condición hídrica de la cuenca, la cual la expresamos a través de los tres indicadores: Brecha, cobertura de la demanda y variación del volumen almacenado en el acuífero.

Los escenarios, bajo sus supuestos, están orientados ya sea a disminuir la brecha agrícola y aumentar su cobertura (Embalse Los Ángeles, La Chupalla, nuevas fuentes-desalación, mejora eficiencia) o la brecha APR y su cobertura de la demanda (Aducción Alicahue). Existen otros escenarios que involucran tanto a la demanda agrícola como a la demanda de agua potable rural, como lo son los escenarios organización y prorrateo.

Los resultados de los indicadores de cuenca para cada uno de los escenarios de gestión simulados se muestra en la Tabla 5-19.

Tabla 5-19 Resultados de la simulación de los escenarios como promedio decadal 2040-2050 en las cuenca del río Ligua.

Década	Brecha (Hm ³ /año)		Cobertura (%)		Variación del acuífero (Hm ³ /año)
	Agrícola	Agua potable Rural	Agrícola	Agua potable Rural	
Futuro	98,92	1,59	45,2%	55,1%	-5,05
Aducciones APR	98,9	1,11	45,2%	68,8%	-4,88
Embalse La Chupalla	97,92	1,53	45,9%	47,5%	-5,02
Embalse los Ángeles	90,51	1,53	50,3%	47,4%	-4,78
Nuevas fuentes	65,7	1,59	64,6%	55,3%	-4,67
Organización	96	1,61	47,3%	44,7%	-5,2
Prorrateo	98,5	1,60	57,5%	57,5%	-5,44
Mejora eficiencia	91,9	1,59	48,9%	55,1%	-4,29

Fuente: elaboración propia (ver Anexo H, Modelación Hidrológica acoplada, Capítulo 5.2.2).

En el caso del agua potable rural, el escenario aducciones, hace alusión a la aducción Alicahue contemplada para esta cuenca. Dicho escenario no logra disminuir completamente la brecha, sino que la disminuye en un 0,4 Hm³/año. Detallando este escenario (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, capítulo 5.2), se aprecia que

dicha aducción no abastece a todas las APR, sino que a 13 de ellas. Sin embargo, la aducción, con un caudal de 42 l/s no es capaz de satisfacer completamente la demanda de dichas 13 APR. Al igual que la brecha hídrica, la cobertura para APR logra su mejor aumento en este escenario, sin embargo la cobertura de la demanda no es completa, logrando porcentajes cercanos al 80%. Para el resto de los escenarios, no se visualizan mejoras sustanciales en los indicadores.

Para la demanda agrícola, los escenarios que logran mejores resultados son el prorrateo y la inclusión de nuevas fuentes de agua a través de la desalación. Este ingreso de 0,5 m³/s, permite que la brecha disminuya en 33,2 Hm³/año y la cobertura aumenta a 64,6%. Los restantes escenarios orientados a la agricultura, logran resultados similares disminuyendo la brecha hasta 9 Hm³/año, y la cobertura mejora hasta un 50%. Entre este grupo de escenario destacan los embalses Los Ángeles y La Chupalla, los cuales por separado no logran mejorar sustancialmente la situación del déficit hídrico de la agricultura. El embalse que logra mejores resultados es el embalse Los Ángeles

En el caso de variación del almacenamiento en el acuífero, se aprecia que este valor es negativo, lo cual muestra que el acuífero sigue mostrando un decaimiento constante para todos los escenarios simulados.

Para el río Petorca, el escenario histórico (ver Tabla 5-14), se aprecia que la brecha agrícola es elevada llegando casi a los 50 Hm³/año y la cobertura de la demanda agrícola es menor al 50%. En el caso del agua potable rural, la brecha es de 0,48 Hm³/año y la cobertura de la demanda de agua potable es igual a 77% de la demanda. En consecuencia, la cuenca del río Petorca presenta un alto porcentaje de insatisfacción de la demanda en la actualidad.

Para evaluar la eficacia de distintas iniciativas, se simularon distintos escenarios basados en una iniciativa en particular (definidas en el capítulo 6). Estos escenarios contemplan que cada iniciativa comienza en el año 0 del escenario futuro, es decir, en el año 2020. Es necesario indicar que el comienzo de esta iniciativa en estos escenarios independientes de simulación, no coincide necesariamente con el plazo de comienzo de la iniciativa propuesto en el Plan (mayor detalle de la implementación de dichas iniciativas en la modelación puede verse en Anexo H, Modelación Hidrológica acoplada, Capítulo 5).

Los resultados de cada escenario muestran el nivel de eficacia en mejorar la condición hídrica de la cuenca, la cual la expresamos a través de los tres indicadores: Brecha, cobertura de la demanda y variación del volumen almacenado en el acuífero.

Los escenarios, bajo sus supuestos, están orientados ya sea a disminuir la brecha agrícola y aumentar su cobertura (Embalse Las Palmas, Pedernal, nuevas fuentes-desalación, mejora eficiencia) o la brecha APR y su cobertura de la demanda (Aducción Hierro Viejo). Existen otros escenarios que involucran tanto a la demanda agrícola como a la demanda de agua potable rural, como lo son los escenarios organización y prorrateo.

Los resultados de los indicadores de cuenca para cada uno de los escenarios de gestión simulados se muestra en la Tabla 5-20.

Tabla 5-20 Resultados de la simulación de los escenarios como promedio decadal 2040-2050 en las cuenca del río Petorca

Década	Brecha (Hm ³ /año)		Cobertura (%)		Variación del acuífero (Hm ³ /año)
	Agrícola	Agua potable Rural	Agrícola	Agua potable Rural	
Futuro	59,9	1,39	45,9%	47,8%	-0,81
Aducciones APR	59,9	0,85	45,8%	68,5%	-0,76
Embalse Las Palmas	45,4	1,39	59,5%	47,6%	-0,55
Embalse Pedernal	45,3	1,34	59,5%	49,5%	-0,51
Nuevas fuentes	32,5	1,33	71,6%	49,5%	-0,8
Organización	57,7	1,51	48,4%	42,3%	-0,81
Prorratio	59,3	1,39	49,5%	49,5%	-0,93
Mejora eficiencia	54,2	1,39	50,8%	47,6%	-0,75

Fuente: elaboración propia (ver Anexo H, Modelación Hidrológica acoplada, capítulo 5.2.2).

En el caso del agua potable rural, el escenario aducciones, hace alusión a la aducción Hierro Viejo contemplada para esta cuenca. Dicho escenario no logra disminuir completamente la brecha, sino que la disminuye en un 0,54 Hm³/año. Detallando este escenario (ver Anexo H Modelación hidrológica acoplada, capítulo 5.2), se aprecia que dicha aducción no abastece a todas las APR de la cuenca, sino que a 19 de ellas. Esta aducción, con un caudal de 43 l/s, es capaz de satisfacer completamente la demanda de dichas 19 APR. Al igual que la brecha hídrica, la cobertura para APR logra su mejor aumento en este escenario, sin embargo la cobertura de la demanda no es completa, logrando porcentajes cercanos al 70% para la totalidad de las APR de la cuenca. Para el resto de los escenarios, no se visualizan mejoras sustanciales en los indicadores.

Para la demanda agrícola, los escenarios que logran mejores resultados son el prorratio y la inclusión de nuevas fuentes de agua a través de la desalación. Este ingreso de 0,5 m³/s, permite que la brecha disminuya en 27,4 Hm³/año y la cobertura aumenta a 71,6%.

Los embalses Las Palmas y Pedernal, logran disminuir la brecha hasta 14 Hm³/año, y la cobertura mejora hasta un 60%, siendo las siguientes iniciativas en lograr una mejor disminución de la brecha. El resto de los escenarios, no logra una reducción importante de la brecha ni un aumento de la cobertura de la demanda.

En el caso de variación del almacenamiento en el acuífero, se aprecia que este es valor es negativo, lo cual muestra que el acuífero sigue mostrando un decaimiento constante para todos los escenarios simulados.

5.6 Mercado de aguas

La caracterización del mercado de aguas en las cuencas de la Ligua y Petorca se realizó a partir de la revisión bibliográfica de tres estudios realizados a nivel nacional y regional en esta materia: El estudio básico del Diagnóstico para desarrollar plan de riego en las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca (CNR, 2016), el informe final de Análisis de Mercados de Derechos de Aprovechamiento de Aguas en Chile (DGA, 2018c) y el estudio Sustentabilidad de Asentamientos Humanos Rurales en Chile. Análisis desde los Comités de Agua Potable Rural- Provincia de Petorca (DGA, 2019c). Dichos estudios ofrecen un análisis de la dinámica de los mercados de aguas en las cuencas de la Ligua y Petorca actualizada hasta el año 2019, por lo que no fue necesario su actualización con revisiones posteriores de las inscripciones de transacciones en los CBRs de la zona de estudio.

5.6.1 Aspectos generales

Algunos aspectos generales sobre el mercado de aguas en Chile han sido descritos por Donoso *et al.*, (2010) quien indica que éstos han madurado durante los últimos 40 años desde la promulgación del Código de Aguas del año 1981. Sin embargo, se observa mayor movimiento en años secos y con mayor concentración en el sector agrícola. Los precios de las transacciones tienen gran variabilidad, la que se puede asociar en parte a asimetrías de información.

En cuanto a las cuencas de la Ligua y Petorca, el estudio realizado por CNR (2016) identificó que debido a la escasez hídrica permanente de esta zona, predominan tres tipos de transacciones o dinámicas del mercado de aguas: 1) compraventas asociadas a la conformación de comunidades de aguas subterráneas entre los años 2001 y 2013 (57 en el río La Ligua y 60 en el río Petorca), 2) ventas de agua informal, principalmente entre agricultores y contratistas de ESVAL para satisfacer necesidades de las APR y 3) cambios de puntos de captación de DAA que ascienden a 237 y 176 en las cuencas de la Ligua y Petorca respectivamente entre los años 1988 y 2015.

5.6.2 Descripción de la dinámica del mercado de aguas en las cuencas de la Ligua y Petorca

Como se mencionó previamente, hay tres estudios que proveen información cuantitativa sobre la dinámica del mercado de aguas en la zona, los cuales se centraron en las transacciones de derechos de aguas subterráneas, dado que estos corresponden a los que presentan mayor movimiento. Mientras los estudios DGA (2018c) y DGA (2019c) utilizan la misma metodología y criterios para analizar las compraventas de DAA registradas en los Conservadores de Bienes Raíces de Petorca y La Ligua (CBR), el estudio CNR (2016) sólo difiere en que no se indica explícitamente si los siguientes registros fueron excluidos: 1) transacciones entre parientes, cónyuges, parientes legítimos hasta el segundo grado de consanguinidad y entre personas que esté ligadas por vínculos de adopción, 2) Transacciones hechas por empresas sanitarias, 3) Transacciones entre empresas relacionadas que no han sido constituidas como sociedades anónimas, 4) Exclusión de valores atípicos, por lo que los resultados podrían diferir en parte debido a estas

diferencias metodológicas. La otra diferencia es el período considerado en el análisis, mientras el estudio CNR (2016) consideró las inscripciones realizadas entre los años 2002 y 2013, DGA (2018c) utilizó una base de datos provista por la DGA con registros entre los años 2010 y 2018, y DGA (2019c) consideró los registros de transacciones del CBR entre los años 2014 y 2018.

De acuerdo con los resultados presentados en la Figura 5-17a), se observa un número creciente de transacciones de DAA entre los años 2002 y 2013 en la cuenca del río Ligua, con un mínimo de 1 transacción por año a un máximo de 14. Sin embargo, el precio presenta una gran variabilidad. Dicha variabilidad se observa también en el Figura 5-17b), la que indica diferencias significativas entre los precios por venta de DAA en la cuenca del río Ligua. Estos valores fluctúan entre 78.97 UF/l/s para el período entre 2002 y 2013 y 188 UF/l/s para el período 2010-2018, indicando aumentos significativos en las medianas de los precios de DAA probablemente asociado a la sequía que afectó a gran parte del país en la última década y que no fue incorporada en el estudio CNR (2016). Se reitera que dado que los estudios analizados utilizan períodos distintos, pueden no ser comparables directamente, pero si proveen información que contribuye a la descripción de la dinámica de mercados en la cuenca. Finalmente, en la Tabla 5-21 se presenta el número de inscripciones por SHAC reportado por el estudio DGA (2019c). En cuanto al río Petorca, a diferencia del río La Ligua, de acuerdo a los registros del estudio CNR (2016) presentados en la Figura 5-18a), si bien no se registra un aumento de las transacciones de DAA en el tiempo, si se observa un aumento en los precios de las transacciones, los cuales fluctúan entre un mínimo de 3.8 UF/l/s a 193.4 UF/l/s, el aumento puede estar relacionado con la sequía que inició en el año 2010. En cuanto a la comparación de los tres estudios disponibles en la zona, de acuerdo a lo presentado en la Figura 5-18b), se generó un aumento en el número y valor de transacciones en la cuenca del río Petorca en la última década, alcanzando un valor de 107.1 UF/l/s.

Debido a que el estudio DGA (2019c) provee una versión actualizada de los registros de inscripciones de compraventas de DAA en las cuencas, y que incluye además un análisis distribuido en distintos SHACs, se decide adoptar dichos valores para el presente estudio. Se observa que la cuenca del río La Ligua tiene un mercado de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas más activo o dinámico que la cuenca del río Petorca, sin embargo, la mediana de los precios de venta por unidad de caudal (l/s) en ambas cuencas es muy similar. En cuanto a la variabilidad espacial, los datos indican un mercado más activo en los SHACs del Río Petorca Poniente, río La Ligua Pueblo y río La Ligua Cabildo.

a)

b)

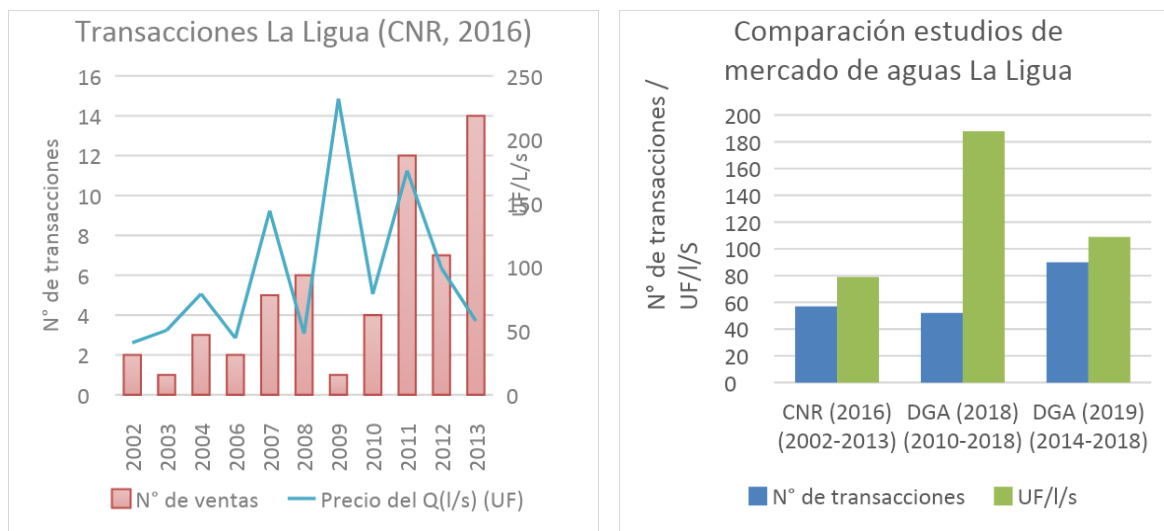


Figura 5-17 Transacciones de DAA en la cuenca de la Liga reportada por estudios previos.

Fuente: elaboración propia a partir de información contenida en CNR (2016b), DGA (2018c) y DGA (2019c).

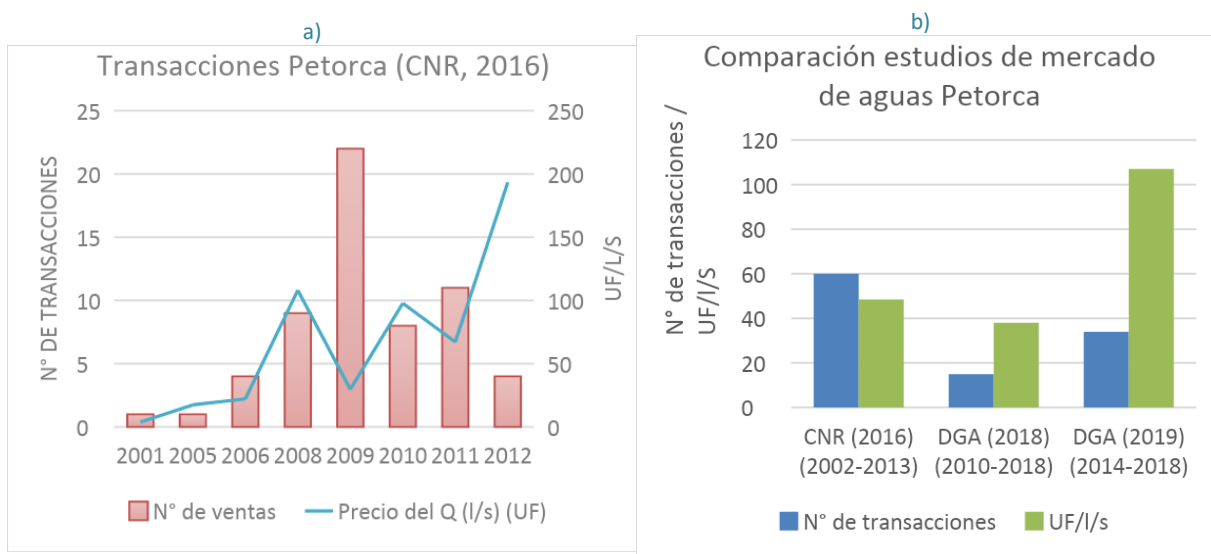


Figura 5-18 Transacciones de DAA en la cuenca del río Petorca reportada por estudios previos.

Fuente: elaboración propia a partir de información contenida en CNR (2016), DGA (2018c) y DGA (2019c).

Tabla 5-21 Número y valor de las transacciones del mercado de aguas de las cuencas del río Ligua y Petorca, 2014-2018.

Acuífero SHAC	Número de datos sin outliers	Mediana precio l/s UF	Mediana precio l/s \$	Precio establecido l/s (\$) al 12 de agosto 2020
Acuífero Petorca	34	107,1	2.950.214	3.069.687,348
SHAC Sector 1- río Pedernal	1	108,9	3.000.000	3.121.278,732
SHAC Sector 2- Estero Las Palmas	7	108,9	3.000.218	3.121.278,732
SHAC Sector 3- Río del Sobrante	1	36,3	1.000.000	1.040.426,244
SHAC Sector 4- Río Petorca Poniente	21	105,2	2.900.210	3.015.229,776
SHAC Sector 10- Río Petorca Oriente	4	145,2	4.000.290	4.161.704,976
Acuífero La Ligua	90	108,9	3.000.218	3.121.278,732
SHAC Sector 5- Estero Alicahue	13	54,4	1.500.109	1.559.206,272
SHAC Sector 6- Río La Ligua oriente	16	96,1	2.649.315	2.754.406,668
SHAC Sector 7- Río La Ligua Cabildo	24	108,9	3.000.218	3.121.278,732
SHAC Sector 8- Río La Ligua Pueblo	25	108,9	3.000.218	3.121.278,732
SHAC Sector 9- Estero Los Ángeles	2	271	7.467.209	7.767.369,48
SHAC Sector 11- Río La Ligua Costa	5	167,5	4.615.720	4.800.864,9
SHAC Sector 12- Estero Patagua	5	181,5	5.000.363	5.202.131,22

Fuente: DGA (2019c).

6. ACCIONES DEL PLAN

Las acciones a implementar en el PEGH buscan mejorar los indicadores definidos para la cuenca. Como ya se explicó anteriormente, es necesario desarrollar acciones o iniciativas que favorezcan la eficiencia en el uso, su redistribución temporal, recuperación de acuíferos e incluso la incorporación de nuevas fuentes de agua.

Sin duda las iniciativas orientadas a estas acciones no mejoran por si sola la situación hídrica de las cuencas, sino que es necesario implementar medidas orientadas a mejorar la gestión del recurso, las capacidades técnicas, la información disponible para la toma de decisiones, todo en un marco de sostenibilidad de acuífero del ecosistema de la cuenca. En este sentido, cobra gran interés desarrollar una gestión integrada de cuencas.

Según la estrategia Nacional de Recursos Hídricos, la gestión hídrica requiere el perfeccionamiento en la institucionalidad del agua a nivel nacional y regional, específicamente en:

- Aumentar las facultades de fiscalización y sanciones
- Mejorar los sistemas de información
- Simplificar los procedimientos para la regularización de derechos de aprovechamiento
- Integrarla gestión de las aguas de la cuenca y asegurar una participación de todos los usuarios en el manejo de éstas a largo plazo
- Mejorar el marco normativo para evitar la existencia de especuladores
- Considerar los usos no extractivos

Bajo este concepto, las acciones del Plan Estratégico de Gestión Hídrica abarcarán, entre otros, los siguientes puntos:

6.1 Gobernanza

La literatura en gestión adaptativa apunta hacia la necesidad de contar con múltiples organizaciones con multiplicidad de roles de manera que, si una deja de funcionar, las otras puedan tomar ciertos roles (García et al., 2016; Olsson et al., 2007; Pahl-Wostl, 2006; Rijke et al., 2012). La noción de gobierno como la única autoridad de toma de decisiones ha sido reemplazada por una gobernanza policéntrica, con análisis e integración, multiescala, que reconoce que una gran cantidad de actores en diferentes entornos institucionales, pueden contribuir a la gestión de un recurso (Pahl-wostl et al., 2007). En esta gobernanza multi-actor, multi-escala, es clave la búsqueda de objetivos en común y priorización de usos en el territorio, falencia que ha sido identificada en el sistema de gestión hídrica en Chile (Centro Atacama, 2010).

Además de la estructura de toma de decisiones, la gestión hídrica sustentable requiere de instituciones y organizaciones fortalecidas, pero flexibles a los cambios. La gestión de la adaptación implica pasar de una predicción y control a un enfoque de aprendizaje continuo en base a la prueba y error, y la capacidad o flexibilidad para responder a diferentes cambios que se vayan generando (Pahl-Wostl, 2006). En este sentido, la cartera de acciones desarrolladas bajo el concepto de Gobernanza, así como el eje Fortalecimiento de OUA, apunta a dos objetivos: 1) crear, fortalecer y modernizar las organizaciones de usuarios de agua (incluyendo agrupaciones y cooperativas de agua potable rural) y 2) crear paulatinamente una organización deliberativa a nivel de cuenca que aglutine esfuerzos e incluya a todos los actores de la cuenca.

Las estrategias concretas que serán desarrolladas en acciones para aportar a la institucionalidad del agua a nivel de cuenca responden a las distintas brechas identificadas como parte del diagnóstico realizado. Muchas de ellas están relacionadas, por lo que una misma acción puede responder a más de una brecha.

Tabla 6-1 Resumen de las acciones necesarias para disminuir las brechas identificadas sobre la gobernanza en los ríos Ligua y Petorca.

CÓDIGO	ACCIONES	OBJETIVO	BRECHA QUE ABORDA	Organismo encargado
AG-01	Fortalecimiento Mesas del Agua APR: Apoyo a las APR y las Mingas del Agua.	Fortalecer y expandir a otras APRs la experiencia de gestión colaborativa de la Unión de APRs de Petorca para promover soluciones colaborativas entre APRs.	Falta de mecanismos para el fortalecimiento homogéneo de las asociaciones de agua potable rural Dificultades para fortalecer y masificar iniciativas de coordinación exitosas	DOH
AG-02	Creación y fortalecimiento de las Oficinas de Asuntos Hídricos como ente técnico a nivel Municipal	Crear un ente por cada Municipio que permita acercar la gestión municipal, a los requerimientos hídricos de las comunas y los distintos usuarios.	Desvinculación con el Municipio y desiguales capacidades de las organizaciones de usuarios en cuanto al acceso a recursos económicos y técnicos.	GORE
AG-03	Apoyo a la creación de Mesas del Agua de la Sociedad Civil	Incentivar la conformación de una Mesa del Agua por cuenca que aglutine a todas las iniciativas existentes de la sociedad civil en cada cuenca y la coordinación con otras iniciativas en las cuencas de Ligua y Petorca	Desvinculación de iniciativas de gestión hídrica con la sociedad civil organizada.	GORE
AG-04	Creación y promoción de un Comité coordinador a nivel de cuencas	Incentivar la conformación de una organización deliberativa a nivel de cuencas.	Brecha de coordinación entre OUAs con otros actores en la cuenca.	GORE

Fuente: elaboración propia (Anexo D, Plan de Acción).

6.2 Fortalecimiento de Organizaciones de Usuarios de Agua

Los Organismos Usuarios del Agua históricamente han participado o llevado a cabo instancias de gestión de recursos hídricos. Siendo principalmente las juntas de vigilancias quienes mayormente han realizado la gestión del recurso hídrico.

En este sentido fortalecer las capacidades de dichas instituciones cumplirá un rol fundamental en la gestión del recurso hídrico.

El fortalecimiento de las OUA no debe ser pensado en capacidades internas exclusivamente, sino en capacidades e instancias de coordinación entre ellas. Esto es importante, puesto que se persigue una gestión integrada de recurso hídrico.

En este sentido, y de acuerdo a las brechas identificadas en este aspecto, se proponen 3 acciones a implementar en el plan:

- Programa de apoyo legal y técnico para la conformación y operación de las Juntas de Vigilancia
- Programa de apoyo legal y organizativo para la conformación de Asociaciones de canalistas y CASUB
- Programa de mentorías para el fortalecimiento y modernización de APRs/CASUB de la Provincia

Tabla 6-2 Resumen de las acciones necesarias para disminuir las brechas identificadas en las OUA en los ríos Ligua y Petorca.

CÓDIGO	ACCIONES	OBJETIVO	BRECHA QUE ABORDA	Organismo encargado
FO-01	Programa de apoyo a la conformación y legalización de las Juntas de Vigilancia	Continuar el trabajo realizado por varias instituciones para diagnosticar dificultades y transferir capacidades a los usuarios de aguas para la constitución de Juntas de Vigilancia que fortalezca la gestión de sus recursos hídricos.	Fortalecimiento y Formación de Organizaciones de Usuarios de Agua Inexistencia de Juntas de Vigilancia operativas	CNR
FO-02	Programa de apoyo a conformación de las OUA.	Apoyar individual, organizacional y legalmente a las Organizaciones de Usuarios de Agua en la regularización y perfeccionamiento de sus Derechos de Aprovechamiento de Agua, así como en el proceso de organización y coordinación con los usuarios.	Inexistencia de Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas	CNR
FO-03	Programa de mentorías para el fortalecimiento y modernización de APRs/CASUB de la Provincia	fomentar el aprendizaje mutuo entre OUAS y APRs en distintos niveles organizativos para fortalecer la capacidad de gestión de las organizaciones de usuarios más débiles y nuevas.	Limitadas iniciativas de fortalecimiento y formación de capital humano entre usuarios.	OUA

Fuente: elaboración propia (Anexo D, Plan de Acción).

6.3 Recuperación de Acuíferos

Uno de los principales resultados obtenidos en la brecha hídrica es la sobre-explotación del agua subterránea, lo cual se ha ido acrecentando en el tiempo, además, las proyecciones de precipitación por el cambio climático, no son auguriosas e intensificarán esta brecha.

Ante la escasa temporalidad de lluvia en ambas cuencas y la inexistencia de glaciares en la cuenca, la principal fuente de abastecimiento es subterránea. Es por eso que es necesario proteger y gestionar todas las instancias posibles para realizar la infiltración y recarga al acuífero.

Teniendo en cuenta que la precipitación es escasa en la cuenca, se favorecieron acciones contempladas como parte de las soluciones basadas en la naturaleza en donde se favorezca la infiltración mediante sistemas y procesos naturales. Normalmente este tipo de solución tiene alta eficiencia, fácil de implementar y mantener.

En ambas cuencas, las zonas de ladera son lugares donde se produce la mayor infiltración, debido a la presencia de vegetación natural que favorece dicho propósito, recargando "lateralmente" los acuíferos.

Por otra parte, los excedentes de escurrimiento superficial de las crecidas en los ríos Petorca y Ligua se propone que sean inducidos naturalmente para recarga directa a acuíferos que están altamente presionados. Estas medidas se basan en construir y mantener pequeñas lagunas de infiltración en las llanuras de inundación. Se propone que estas lagunas sean construidas en los tramos medios de ambos ríos.

Por ello las acciones propuestas son:

- Promover la conversión de sitios prioritarios existentes y creación de nuevas superficies a territorios bajo la protección legal para la conservación biológica y provisión de fuente hídrica
- Construcción de piscinas de infiltración en llanura de inundación en ríos Ligua y Petorca

Tabla 6-3 Resumen de las acciones necesarias sobre la recuperación de acuíferos identificadas sobre la demanda insatisfecha en los ríos Ligua y Petorca.

CÓDIGO	ACCIONES	OBJETIVO	BRECHA QUE ABORDA	Organismo encargado
RA-01	Promover la conversión de los Sitios Prioritarios existentes a territorios bajo protección legal para la conservación biológica	Aumentar la superficie destinada a la conservación biológica en estas cuencas	Pérdida de superficie de vegetación nativa que presta servicios ecosistémicos de provisionamiento y regulación, así como fuente hídrica para la recarga de acuíferos.	DGA
RA-02	Construcción de piscinas de infiltración en llanura de inundación en ríos Ligua y Petorca	Aumentar la superficie destinada a la conservación biológica en estas cuencas	Disminución del acuífero de -2,2 Hm ³ en Petorca y de 2,73 Hm ³ en Ligua	DOH

Fuente: elaboración propia (Anexo D, Plan de Acción).

6.4 Nuevas fuentes de agua

Ambas cuencas son altamente deficitarias en el recurso hídrico, en donde dicho déficit no se debe exclusivamente a un desfase entre la oferta y la demanda, sino que además se evidencia una sobredemanda del recurso. En este sentido es de vital importancia realizar acciones que vayan orientadas a dichos déficit.

Para ello se tomaron en cuenta las acciones que ya tiene considerando el Estado de Chile a distintos niveles de desarrollo, ya sea a nivel de ingeniería, otros en licitación de construcción o ya en etapa de construcción.

Se han considerados dos aducciones de agua

Se consideró la evaluación en el plan de los 4 embalses que están en carpeta del MOP, en donde el embalse Las Palmas ya está en construcción.

No se consideró factible la carretera hídrica (ninguna de sus versiones) debido al horizonte de tiempo de plan.

- Reutilización de aguas servidas tratadas
- Aducción APR- Alicahue
- Aducción única APR- Hierro Viejo
- Aporte de agua a las cuencas del río Petorca y La Ligua proveniente de desalación
- Construcción Embalse Las Palmas
- Construcción Embalse Los Ángeles
- Construcción Embalse La Chupalla
- Construcción Embalse Pedernal

Tabla 6-4 Resumen de las acciones necesarias sobre la incorporación de nuevas fuentes identificadas sobre la demanda insatisfecha en los ríos Ligua y Petorca.

CÓDIGO	ACCIONES	OBJETIVO	BRECHA QUE ABORDA	Organismo encargado
NF-01	Reutilización de aguas servidas tratadas	Implementar medidas para reutilizar aguas rurales servidas como una medida de la conservación de recursos hídricos.	Deficit de 88,9 Hm ³ en Ligua y 51,5 Hm ³ en Petorca	DOH
NF-02	Aducción APR Alicahue	Disminuir la actual brecha de suministro de agua potable para las APR MOP y NO-MOP estimada en 32.3 l/s para APR Cabildo-La Ligua	Deficit de 0,48 Hm ³ de APR en la cuenca del río Ligua	DOH
NF-03	Aducción APR Hierro Viejo	Disminuir la actual brecha de suministro de agua potable para las APR MOP y NO-MOP estimada en 30 l/s	Deficit de 0,52 Hm ³ de APR en la cuenca del río Petorca	DOH
NF-04	Aporte de agua a las cuencas del río Petorca y La Ligua proveniente de desalación	Evaluar la factibilidad de incorporar 1 m ³ /s de agua proveniente de desalación	Deficit de 88,9 Hm ³ en Ligua y 51,5 Hm ³ en Petorca	DOH
NF-05	Construcción de embalse de regadío Las Palmas	Asegurar el abastecimiento de agua en el periodo de mayor demanda de agua para los cultivos y extender el riego en el valle del río Petorca.	Deficit de 48,3 Hm ³ en riego en la cuenca del río Petorca	DOH

NF-06	Construcción de embalse de regadio Los Ángeles	Asegurar el abastecimiento de agua en el periodo de mayor demanda de agua para los cultivos y extender el riego en el valle del río Ligua.	Deficit de 85,7 Hm ³ en riego en la cuenca del río Ligua	DOH
NF-07	Construcción de embalse de regadio La Chupalla	Asegurar el abastecimiento de agua en el periodo de mayor demanda de agua para los cultivos en el valle del río Ligua.	Deficit de 85,7 Hm ³ en riego en la cuenca del río Ligua	DOH
NF-08	Construcción de embalse de regadio Pedernal	Asegurar y extender el abastecimiento de agua de riego en el periodo de mayor demanda de agua para los cultivos en el valle del río Petorca.	Deficit de 48,3 Hm ³ en riego en la cuenca del río Petorca	DOH

Fuente: elaboración propia (Anexo D, Plan de Acción).

6.5 Mejoras de eficiencia

Debido al estado deficitario de ambas cuencas y la importancia que presenta la agricultura en ambas cuencas, es necesario mejorar la eficiencia de riego, tanto en su conducción como en la tecnología de riego.

Las acciones propuestas son:

- Mejora eficiencia en la conducción de canales de regadío
- Mejora de la tecnología de riego de superficies agrícolas sin tecnificar

Tabla 6-5 Resumen de las acciones necesarias sobre el aumento en la eficiencia de riego identificadas sobre la demanda insatisfecha en los ríos Ligua y Petorca.

CÓDIGO	ACCIONES	OBJETIVO	BRECHA QUE ABORDA	Organismo encargado
ME-01	Mejora eficiencia en la conducción de canales de regadío	Aumentar la eficiencia de riego a un 85% en ambas cuencas	Deficit de 85,7 Hm ³ en riego en la cuenca del río Ligua y de 48,3 Hm ³ en la cuenca del río Petorca	CNR
ME-02	Mejora riego intrapredial	Aumentar la eficiencia de riego a un 85% en ambas cuencas	Deficit de 85,7 Hm ³ en riego en la cuenca del río Ligua y de 48,3 Hm ³ en la cuenca del río Petorca	CNR

Fuente: elaboración propia (Anexo D, Plan de Acción).

6.6 Sistemas de Información

Para poder realizar una correcta gestión de recursos, es necesario contar con información oportuna y confiable. En este sentido destaca que existen brechas de información en variados aspectos de ambas cuencas, por ejemplo, hay desconocimiento de la calidad de las aguas, de los tipos de ecosistemas presentes en la cuenca y su estado de conservación, carencia de conocimiento hidrogeológico a nivel local de cada APR, estado de conservación de los canales de riego, etc.

Por otra parte, hay información sobre aspectos meteorológicos, y particularmente, hay varias instituciones que tienen estaciones meteorológicas en monitoreo continuo. Cada institución tiene su propia plataforma de visualización de la información, lo que genera confusión en los usuarios. Por lo tanto, es necesario desarrollar una única plataforma que unifique y simplifique el acceso a la información.

Es por ello, que las acciones mostradas a continuación apuntan a disminuir dichas brechas, con el objetivo de implementar una gestión de recursos hídricos con capacidades de toma de decisión.

Las acciones propuestas, se muestran a continuación:

- Creación plataforma única de visualización de datos en cada cuenca
- Estándares de medición y envío de datos por terceros de acuerdo con requerimientos DGA
- Ampliación de la red de monitoreo para la caracterización del recurso hídrico
- Programa de monitoreo ciudadano
- Catastro de canales de conducción y distribución de agua para riego
- Catastro de tecnificación del tipo de riego de la superficie agrícola
- Estudios hidrogeológicos locales en APR
- Plan de Monitoreo de Calidad del Agua

Tabla 6-6 Resumen de las acciones identificadas sobre la carencia de información para la caracterización del recurso hídrico en los ríos Ligua y Petorca.

CÓDIGO	ACCIONES	OBJETIVO	BRECHA QUE ABORDA	Organismo encargado
AI-01	Creación plataforma única de visualización de datos en cada cuenca	agrupar y homologar en una sola plataforma toda la información de monitoreo generada en la cuenca, facilitando su acceso y disponibilidad de información generada. A esta plataforma deberían adherirse las distintas instituciones gubernamentales y universidades estatales. Además pueden adherirse organizaciones privadas.	Complejo acceso a la información existente	DGA
AI-02	Estándares de medición y envío de datos por terceros de acuerdo a requerimientos DGA	Aumentar la información continua referente a monitoreo del recurso hídrico en las cuencas Ligua y Petorca	Carencia de estaciones de monitoreo que permita caracterizar los recursos hídricos en la cuenca	DGA
AI-03	Ampliación de la red de monitoreo para la caracterización del recurso hídrico	Aumentar la información continua referente a monitoreo del recurso hídrico en las cuencas Ligua y Petorca	Carencia de estaciones de monitoreo que permita caracterizar los recursos hídricos en la cuenca	DGA

AI-04	Programa de Monitoreo ciudadano	aumentar el conocimiento e información sobre los recursos hídricos en las cuencas, democratización del conocimiento y empoderamiento de las asociaciones civiles en la cuenca.	Desvinculación de iniciativas de gestión hídrica con la sociedad civil organizada.	Soc Civil
AI-05	Catastro infraestructura de conducción y distribución de agua para riego	Realizar un levantamiento de información relevante sobre los canales destinados a riego en las cuencas de los ríos Ligua y Petorca	Deficit de 85,7 Hm3 en riego en la cuenca del río Ligua y de 48,3 Hm3 en la cuenca del río Petorca	CNR
AI-06	Catastro superficies agrícolas sin tecnificar	Realizar un levantamiento de información relevante sobre las áreas agrícolas sin tecnificar y los cultivos presentes en estas en la cuenca de los ríos Ligua y Petorca	Deficit de 85,7 Hm3 en riego en la cuenca del río Ligua y de 48,3 Hm3 en la cuenca del río Petorca	CNR
AI-07	Estudios hidrogeológicos locales en APR	Realizar estudios que permita conocer aspectos relevantes de la litología y del acuífero en donde se emplazan las APR, con de fin de aumentar la certeza sobre la seguridad de recurso hídrico al profundizar el pozo	Deficit de agua para consumo humano de 0,48 Hm3 de APR en la cuenca del río Ligua y de 0,52 Hm3 en la cuenca del río Petorca	DOH

AI-08	Diseño e implementación de un plan de monitoreo de calidad de aguas	Aumentar el conocimiento sobre la calidad de agua de las cuencas y reducir la brecha de inconsistencia en la cantidad de estaciones de monitoreo "vigentes" con datos, en la cantidad de días muestreados y la cantidad de parámetros medidos en el tiempo	Inconsistencia en la cantidad de estaciones de monitoreo "vigentes" con datos, en la cantidad de días muestreados y la cantidad de parámetros medidos en el tiempo	DGA
-------	---	--	--	-----

Fuente: elaboración propia (Anexo D, Plan de Acción).

6.7 Capital humano

La gestión integrada es uno de los pilares principales para mejorar la seguridad hídrica en ambas cuencas, para ello es necesario que cada OUA tenga profesionales con capacidades técnicas que permitan abordar los nuevos desafíos que esto conlleva.

En este sentido, las acciones que se proponen son:

- Generación de un fondo concursable provincial, regional y/o nacional para mejoramiento de infraestructura y capacidades de APR
- Creación de programa de acompañamiento continuo a OUA y APR

Tabla 6-7 Resumen de las acciones identificadas sobre la debilidades en capital humano asociadas a OUA en los ríos Ligua y Petorca.

CÓDIGO	ACCIONES	OBJETIVO	BRECHA QUE ABORDA	Organismo encargado
CH-01	Generación de un fondo provincial, regional y/o nacional para mejoramiento de infraestructura y capacidades de APR	Permitir que las APR/SSR puedan acceder a fondos concursables que permitan reemplazar la infraestructura que está en mal estado o que no es capaz de portear el caudal necesario.	Falta de mecanismos para el fortalecimiento homogéneo de las asociaciones de agua potable rural	DOH
CH-02	Creación de programa de acompañamiento continuo a OUA y especialmente a APR	fomentar el aprendizaje mutuo entre OUAS y APRs en distintos niveles organizativos para fortalecer la capacidad de gestión de las organizaciones de usuarios más débiles y nuevas.	Falta de mecanismos para el fortalecimiento homogéneo de las OUAs y asociaciones de agua potable rural	DOH

Fuente: elaboración propia (Anexo D, Plan de Acción).

6.8 Medio Ambiente

Las acciones que se detallan a continuación se estructuran principalmente por el desconocimiento existente sobre la calidad y tipo de ecosistemas acuáticos existentes, la biodiversidad potencial y actual, así como la delimitación de los humedales y sus demandas hídricas.

- Actualización del inventario Nacional de Humedales a nivel local
- Estudios técnicos sobre funcionamiento ecológico y social de los humedales
- Estudio relaciones de causalidad entre el ecosistema y la generación de bienestar social.
- Estudio valoración flujo de servicios ecosistémicos a diversas escalas

Tabla 6-8 Resumen de las acciones necesarias para disminuir las brechas identificadas sobre las unidades ambientales y sus servicios ecosistémicos en la cuenca de los ríos Ligua y Petorca.

CÓDIGO	ACCIONES	OBJETIVO	BRECHA QUE ABORDA	Organismo encargado
EC-01	Actualización del inventario Nacional de Humedales a nivel local	Incrementar el conocimiento sobre la dinámica espacio-temporal de los ecosistemas acuáticos mediante la delimitación de los humedales de manera histórica	Reducido entendimiento sobre la dinámica espacio temporal de los ecosistemas acuáticos, con énfasis en límites fijos y estáticos de los humedales	MMA
EC-02	Estudios técnicos sobre funcionamiento ecológico y social de los humedales	Incrementar el conocimiento sobre la dinámica espacio-temporal de los ecosistemas acuáticos mediante la delimitación de los humedales de manera histórica	Carencia de información y desconocimiento sobre la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas	MMA
EC-03	Desarrollar estudios e investigaciones holísticas con el objetivo de cuantificar las relaciones de causalidad entre el ecosistema y la generación de bienestar social.	Incrementar el conocimiento sobre la dinámica espacio-temporal de los ecosistemas acuáticos mediante la delimitación de los humedales de manera histórica	Carencia de conocimiento sobre los servicios ecosistémicos que genera el ecosistema en la cuenca.	MMA
EC-04	Iniciar estudios que valoran y relacionan el flujo de servicios ecosistémicos a diversas escalas.	Incrementar el conocimiento sobre la dinámica espacio-temporal de los ecosistemas acuáticos mediante la delimitación de los humedales de manera histórica	Carencia de conocimiento sobre los servicios ecosistémicos que genera el ecosistema en la cuenca	MMA

Fuente: elaboración propia.

7. CARTERA DE INICIATIVAS

Las acciones mencionadas en este PEGH son una selección de acciones identificadas a partir del trabajo interdisciplinario de los investigadores del proyecto con los actores del territorio, todas importantes para la mejora de la gestión hídrica en las cuencas. Sin embargo, su implementación en el territorio requiere de una hoja de ruta que establezca la prioridad en el tiempo de cada una de ellas.

La priorización de acciones en el territorio en un contexto de escasez hídrica es altamente compleja debido a la necesidad de comparar criterios muy distintos, para los cuáles no siempre se tiene el mismo tipo de información, o en algunos casos el impacto es inconmensurable (Dodgson et al. 2000). En la mayoría de los casos el costo económico de la acción es el criterio utilizado para decidir su implementación. En otros métodos de evaluación utilizados, la imprecisión, la incertidumbre y los aspectos arbitrarios de los datos se agregan en un número o puntaje para cada alternativa, lo que enmascara valoraciones muy negativas generalmente en los aspectos sociales y ambientales (Roy & Vincke 1981; Vincke 1986). Sin embargo, en un contexto de escasez hídrica y conflictos socioambientales, se hace fundamental la priorización de la sostenibilidad social y ambiental de las propuestas traducida ya sea en la ponderación a los criterios sociales por encima de los económicos, o en la incorporación de la opinión de los principales actores en alguna etapa de selección de las propuestas (Banco Mundial, 2018). Involucrar a los principales afectados en la toma de decisiones puede generar impactos positivos en la sustentabilidad de las decisiones (Dietz & Stern 2008). En este sentido en esta etapa, además del costo, tiempo de implementación e impacto en la brecha, se levantó la opinión de los principales actores en las cuencas sobre cada una de las propuestas (criterio Importancia para los actores locales) para ayudar en la distribución de las acciones en el tiempo.



Figura 7-1 Criterios considerados para la priorización de las actividades a implementar en el Plan Estratégico.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se describen las variables utilizadas en la priorización de propuestas de acciones (ver Figura 7-1):

- **Acciones:** Propuesta de estrategias de gestión, infraestructura e información que apuntan a cerrar brechas específicas de las categorías: gobernanza, fortalecimiento de organizaciones, mejora de la eficiencia, búsqueda de nuevas fuentes, sistemas de información, capital humano y medio ambiente.
- **Brecha que aborda:** Descripción de la brecha específica dentro de cada categoría que va a ser abordada por la acción. La brecha no hace referencia a la brecha hídrica de la cuenca (diferencia entre oferta y demanda), si no a objetivos específicos dentro de cada categoría.
- **Impacto esperado en la brecha (cuantitativo):** Traduce el impacto de cada acción en una métrica cuantitativa lo más aproximada posible (metros cúbicos, hectáreas, personas, etc.)
- **Criterios de evaluación:**
 - **Impacto en la brecha específica (bajo, medio, alto):** Traducción del impacto cuantitativo de cada acción en su brecha específica, en una escala cualitativa que va de bajo, medio a alto. Si la acción cierra la brecha, el impacto es alto. Si la acción requiere de una o más acciones para cerrar la brecha, el impacto puede ser de medio a bajo (ver contenido fichas en anexo). En el caso de las acciones que cierran la brecha en demanda hídrica, se consideró
 - Bajo: si cierra del 0%-30% de la demanda
 - Medio: si cierra 30%-60% de la demanda
 - Alto: si cierra 60%-100% de la demanda

- **Beneficio percibido por los actores locales (bajo, medio, alto):** El beneficio de cada acción según la percepción de los actores en el territorio fue levantado con encuestas online a los principales actores en cada cuenca. La encuesta fue enviada a todos los actores, pero respondida por 10 personas representantes de Asociación de canalistas, Asociación Gremial, CASUB, APRs y municipio de Petorca. Para cada acción o grupo de acciones (por ejemplo, en el caso de eficiencia hídrica se tenía una sola alternativa) se preguntó cómo evaluaban el beneficio de la acción en una escala de 'Beneficio alto', 'Medio, o 'Bajo'. La evaluación final de la acción es resultado de lo que respondió más del 60% de los entrevistados. En el caso que no hubiese una mayoría del 60% por alguna de las opciones, la evaluación final es "medio", por ejemplo: 50% Alto, 40% Medio, 10% bajo, en ese caso la evaluación es beneficio 'medio.
- **Costo de implementación y operación:** El costo fue estimado o levantado de bibliografía, para luego ser traducido a una escala de Alto, Medio y Bajo. Donde Alto >999999 UF, Medio 99999UF y Bajo 9999 UF.
- **Tiempo de implementación:** información estimada en las fichas en una escala de corto, medio y largo plazo de implementación, que en algunos casos incluye también la operación de la acción.
- **Prioridad:** La prioridad de la acción se establece de la combinación del Impacto esperado en la brecha, Beneficio percibido por los actores locales, costo de implementación y operación y el tiempo de implementación. La combinación da tres posibles resultados de Prioridad.
 - ALTA: se debe implementar lo antes posible
 - MEDIA: se puede implementar a mediano plazo
 - BAJA: se puede implementar a más largo plazo

La combinación de escalas en los 4 criterios anteriores se estableció según **Reglas De Criterio Experto**, donde son más importantes, e igualmente relevante entre ellas, el impacto en la brecha y la importancia para los actores, seguidas por el costo y el tiempo de implementación. De esta manera si una acción tiene un alto impacto en la brecha y es altamente valorada (beneficio), el tiempo y costo se consideran como irrelevantes. En cambio, si los primeros criterios tienen menor valoración, se evalúa el costo (menor costo mejor) y el tiempo (menor tiempo mejor) en la evaluación general de la acción. De esta manera se incorpora la opinión local sobre el beneficio de las acciones en las cuencas, dando como resultado la siguiente tabla:

Tabla 7-1 Priorización de las acciones.

Impacto en la brecha específica (ALTO, MEDIO, BAJO)	Beneficio percibido por actores locales (ALTO, MEDIO, BAJO)	Costo de implementación y operación (ALTO, MEDIO, BAJO)	Tiempo de implementación (CORTO, MEDIO, LARGO)	Prioridad
ALTO	ALTO	No se considera	No se considera	ALTA
ALTO	MEDIO	BAJO, MEDIO	No se considera	ALTA
ALTO	MEDIO	ALTO	CORTO, MEDIO	ALTA
ALTO	MEDIO	ALTO	LARGO	MEDIA
ALTO	BAJO	BAJO, MEDIO	No se considera	MEDIA
ALTO	BAJO	ALTO	CORTO, MEDIO	MEDIA
ALTO	BAJO	ALTO	LARGO	BAJA
MEDIO	ALTO	BAJO, MEDIO	No se considera	ALTA
MEDIO	ALTO	ALTO	No se considera	MEDIA
MEDIO	MEDIO	BAJO, MEDIO	No se considera	MEDIA
MEDIO	MEDIO	ALTO	CORTO, MEDIO	MEDIA
MEDIO	MEDIO	ALTO	LARGO	BAJA
MEDIO	BAJO	BAJO, MEDIO	No se considera	MEDIA
MEDIO	BAJO	ALTO	No se considera	BAJA
BAJO	ALTO	BAJO, MEDIO	No se considera	MEDIA
BAJO	ALTO	ALTO	No se considera	BAJA
BAJO	MEDIO, BAJO	No se considera	No se considera	BAJA

Fuente: elaboración propia.

7.1 Impacto sobre la brecha

El impacto sobre la brecha se entiende como el aporte cuantitativo de disminución que significa cada acción sobre aquella brecha asociada a las acciones.

De las acciones consideradas, 4 de ellas (12%) consideran que tienen un impacto bajo sobre la disminución de la brecha, 16 (50%) presentan un impacto medio y finalmente 13 (38%) acciones presentan un impacto alto sobre la brecha (Figura 7-2). El desarrollo en detalle de la determinación del impacto de cada una de las iniciativas definidas en el capítulo 6 (ver detalles en Anexo D.1), se puede ver en Anexo D.3

Esto representa que pocas acciones presentan un bajo impacto sobre las brechas y particularmente estas acciones son necesarias para la implementación de otras acciones con mayor impacto. Por ejemplo, la acción "catastro de canales de riego" presenta un bajo impacto para disminución de la brecha de demanda insatisfecha, sin embargo, es un paso fundamental para poder aplicar la acción "mejora de eficiencia de conducción".

La mayoría de las acciones presenta un impacto medio, es decir, que cada una por sí sola no es capaz de disminuir considerablemente las brechas, con lo cual queda de manifiesto

la necesidad de incorporar una combinación de ellas para lograr la disminución de la brecha asociada.

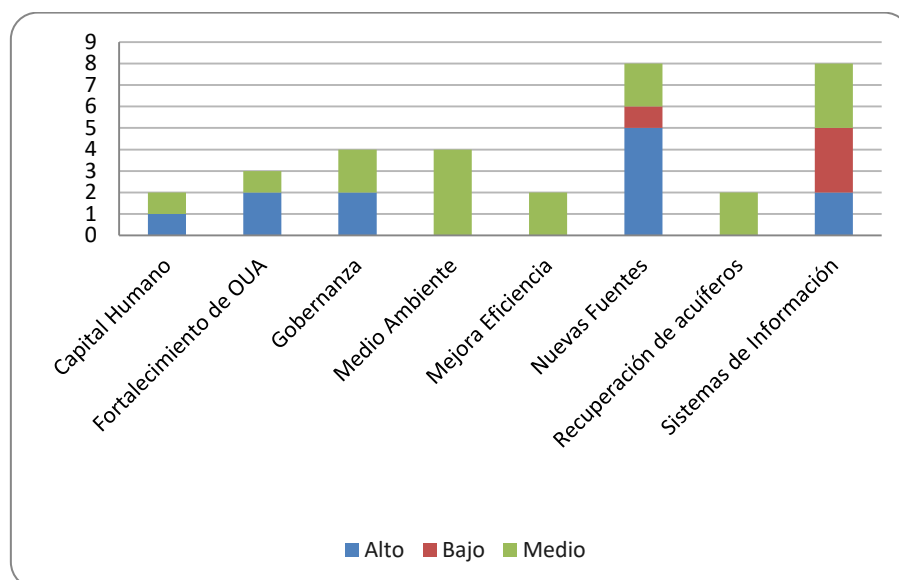


Figura 7-2 Distribución del impacto de reducción de la brecha en cada eje definido.

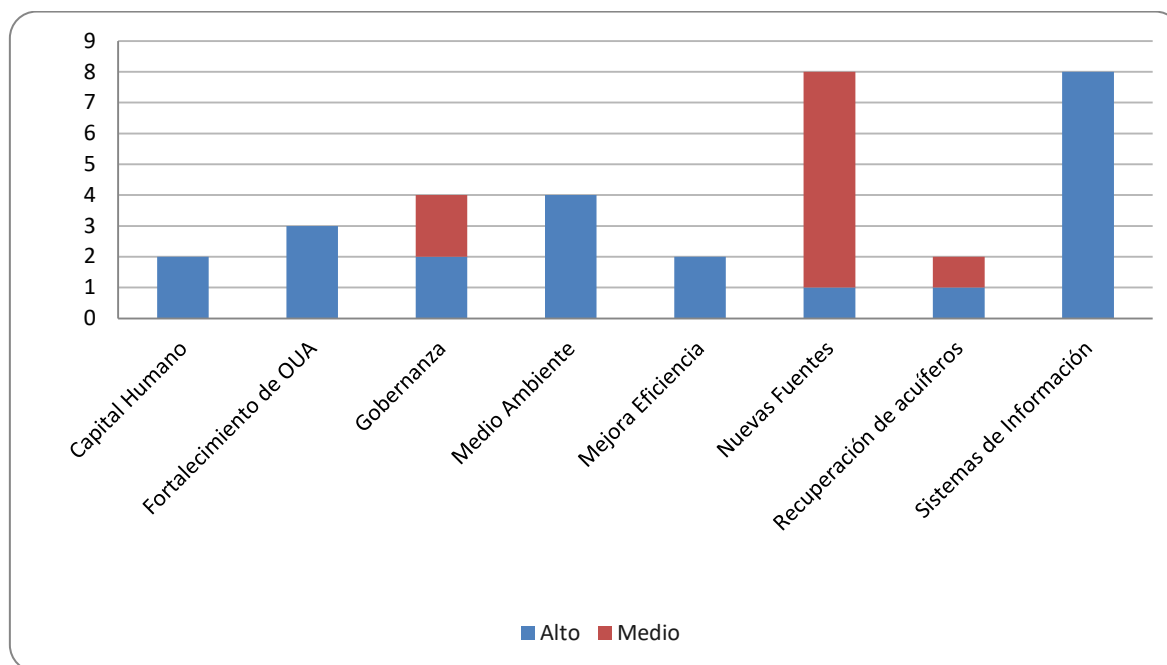
Fuente: elaboración propia.

7.2 Beneficio percibido por los actores locales

De igual forma que la evaluación del impacto, se desarrolló la percepción de la aceptación de las medidas por parte de los actores locales (ver Figura 7-3). Esta se obtuvo a través de formularios online enviadas vía mail a dichos actores.

De las 33 acciones, un 68% presenta un alto valor de aceptación por parte de los actores locales, un 29% una aceptación media, no se aprecia una baja aceptación de las iniciativas por parte de los actores locales. Este alto nivel de aceptación obedece principalmente al trabajo conjunto con la comunidad en la determinación de las acciones. El desarrollo en detalle de la determinación del beneficio percibido de los actores de cada una de las iniciativas definidas en el capítulo 6 (ver detalles en Anexo D.1), se puede ver en Anexo D.3

Figura 7-3 Distribución de la aceptación por parte de actores locales de las acciones propuestas.



Fuente: elaboración propia.

7.3 Evaluación económica

Tal como se comentó anteriormente la inversión necesaria para implementar la acción (APEX) y el costo de operación de ellas (COPEX) es uno de los criterios para priorizar la ejecución de las acciones (más detalles ver apéndice D.2 del anexo D).

Como parte de la descripción de las medidas consideradas en este estudio se realizó una estimación del CAPEX y OPEX de cada una. CAPEX (abreviación del inglés *capital expenditure*) se refiere a la inversión de capital necesaria para llevar a cabo la medida, es decir gasto que no son recurrentes. En cambio OPEX (abreviación del inglés *operational expenses*), se refiere a los gastos recurrentes y necesarios para el funcionamiento de la medida.

La evaluación de estas dos medidas se realizó a partir de la descripción o definición de las medidas. Para esto se tomó en cuenta la duración de la medida, las necesidades de inversión y las actividades y gastos necesarios para su funcionamiento. La cuantificación económica de estos costos se hizo a partir de estudios existentes. De estos se obtuvieron costos unitarios que fueron utilizados para estimar los costos de la medida de interés. Se debe tener en cuenta que estas evaluaciones buscan entregar una aproximación gruesa del costo asociado a la implementación de las medidas por lo que no se deben interpretar como una evaluación económica detallada de las mismas (Figura 7-4).

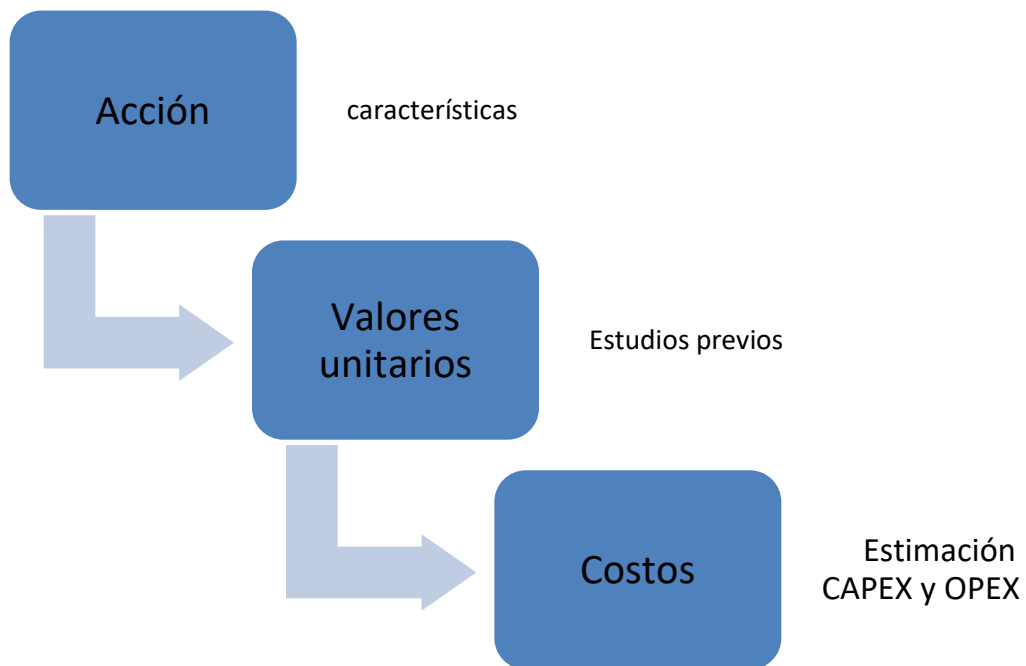


Figura 7-4 Metodología de obtención del CAPEX (Capital Expenditure) y OPEX (Operational Expenses).

Fuente: elaboración propia.

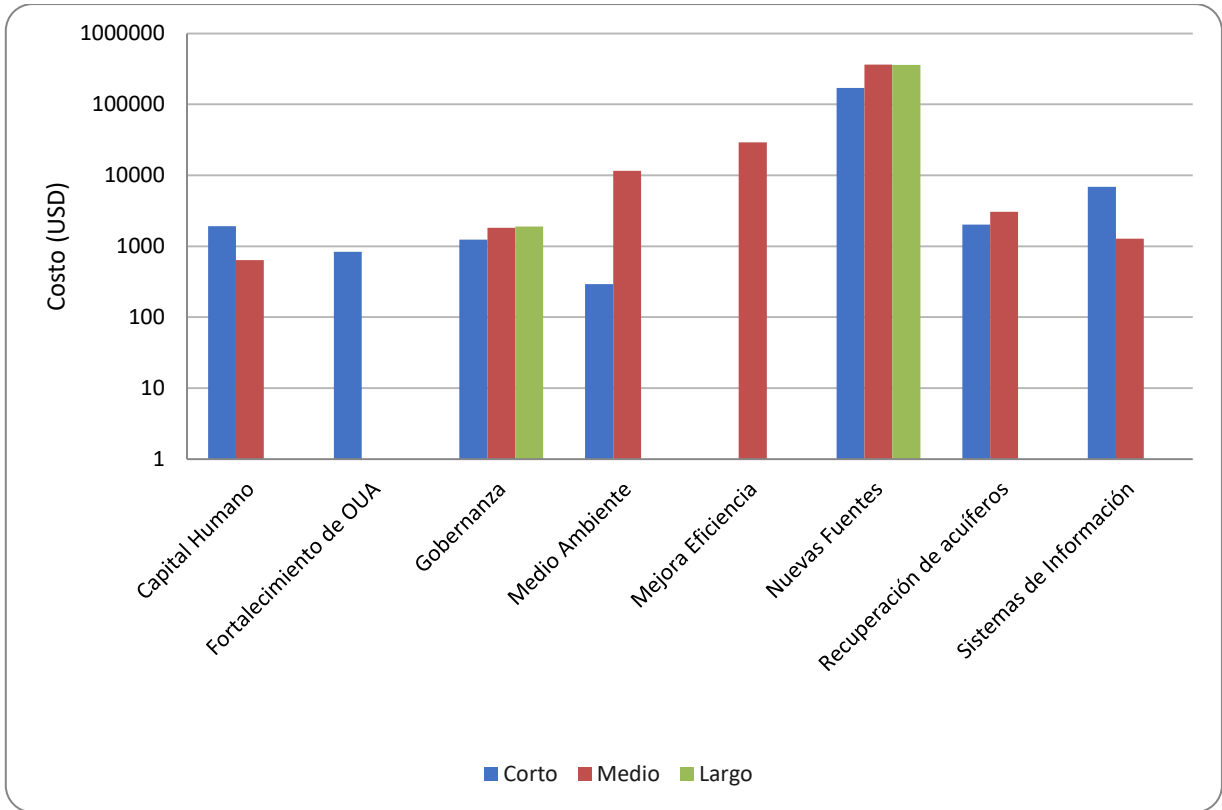


Figura 7-5 Distribución de los costos de implementación y operación de las acciones evaluadas en las cuencas del río Ligua y Petorca.

Fuente: elaboración propia.

De la Figura 7-5 se aprecia que los mayores costos están asociadas a las nuevas fuentes de agua, lideradas por la compra de volúmenes de agua a una desalación y a la construcción de los 4 embalses proyectados para estas cuencas.

En forma agrupada (Figura 7-6), un gran porcentaje del costo de implementación de las acciones son aquellas orientadas a infraestructuras como embalses, aducciones y compra de agua para desalación.

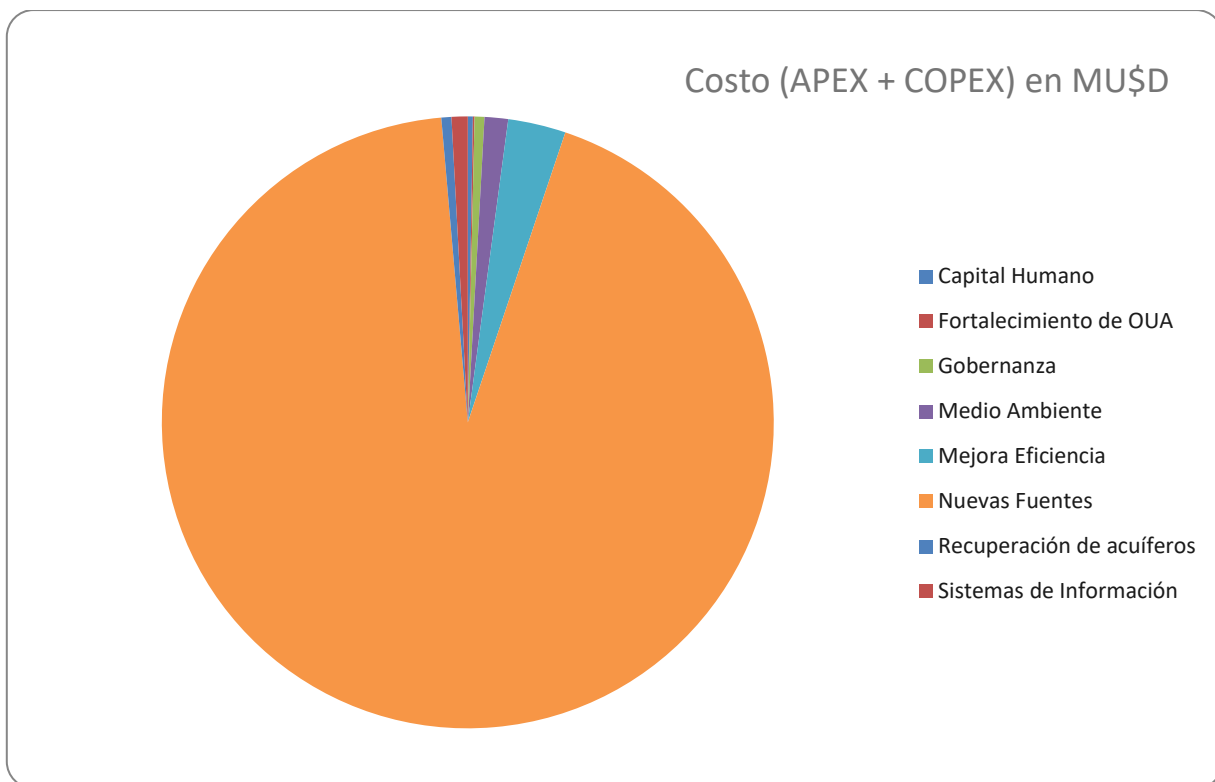


Figura 7-6 Distribución de los costos (MU\$D) de las acciones.

Fuente: elaboración propia.

Cabe señalar que en varias acciones, se estimaron rangos de financiamiento, debido a que no fue posible cuantificar acotar su magnitud y alcance de las iniciativas, lo cual llevó a dificultades de estimar los costos de algunas acciones. El detalle de costos (APEX y COPEX) para cada acción puede verse en la ficha de cada una de ellas, las cuales están incorporadas en el Apéndice D.2 del Anexo D.

7.4 Plazos de implementación de las acciones

La priorización de las acciones se traduce en iniciativas que deben implementarse en el corto plazo (prioridad alta), mediano plazo (prioridad media) y largo plazo (prioridad baja). El plazo de implementación responde entonces a la efectividad en cerrar alguna brecha identificada, el beneficio identificado por los actores, el costo y el tiempo de cada acción, lo da como resultado la siguiente tabla:

Tabla 7-2 Plazos de implementación de las acciones.

EJE	PLAZO DE IMPLEMENTACIÓN		
	CORTO	MEDIANO	LARGO
RECUPERACIÓN DE ACUÍFERO	RA-02.- Construcción de piscinas de infiltración en llanura de inundación en ríos Ligua y Petorca	RA-01.- Promover la conversión de sitios prioritarios existentes y creación de nuevas superficies a territorios bajo la protección legal para la conservación biológica y provisión de fuente hídrica	
GOBERNANZA	AG-01. Fortalecimiento Mesas del Agua APR, Apoyo a las APR y las Mingas del Agua.	AG-02. Creación y fortalecimiento de las Oficinas de Asuntos Hídricos como ente técnico a nivel Municipal AG-03. Apoyo a la creación de Mesas del Agua de la Sociedad Civil	AG-04. Creación y promoción de un Comité coordinador a nivel de cuencas
FORTALECIMIENTO OUA	FO-01. Programa de apoyo a la conformación y legalización de las Juntas de Vigilancia FO-02. Programa de apoyo a conformación de las OUA. FO-03. Programa de mentorías para el fortalecimiento y modernización de APRs/CASUB de la Provincia		

EJE	PLAZO DE IMPLEMENTACIÓN		
	CORTO	MEDIANO	LARGO
NUEVAS FUENTES	NF-05. Construcción de embalse de regadío Las Palmas NF-03. Aducción Hierro Viejo NF-02.- Aducción Alicahue	NF-04. Aporte de agua a las cuencas del río Petorca y La Ligua proveniente de desalación	NF-01. Reutilización de aguas servidas tratadas NF-06. Construcción de embalse de regadío Los Ángeles*. NF-07. Construcción de embalse de regadío La Chupalla*. NF-08. Construcción de embalse de regadío Pedernal*
MEJORAS DE EFICIENCIA		ME-01. Mejora eficiencia en la conducción de canales de regadío ME-02. Mejora riego intrapredial	
CAPITAL HUMANO	CH-02. Creación de programa de acompañamiento continuo con a OUA y especialmente a APR	CH-01. Generación de un fondo provincial, regional y/o nacional para mejoramiento de infraestructura y capacidades de APR	
SISTEMAS DE INFORMACIÓN	AI-01. Creación plataforma única de visualización de datos en cada cuenca AI-02. Estándares de medición y envío de datos por terceros de acuerdo a requerimientos DGA AI-04. Programa de Monitoreo ciudadano AI-05. Catastro infraestructura de conducción y distribución de agua para riego AI-06. Catastro superficies agrícolas	AI-03. Ampliación de la red de monitoreo para la caracterización del recurso hídrico	

EJE	PLAZO DE IMPLEMENTACIÓN		
	CORTO	MEDIANO	LARGO
	sin tecnificar AI-07.- Estudios hidrogeológicos locales en APR AI-08.- Plan de monitoreo de calidad del agua.		
MEDIO AMBIENTE	EC-01. Actualización del inventario Nacional de Humedales a nivel local	EC-02.- Estudios técnicos sobre funcionamiento ecológico y social de los humedales EC-03.- Desarrollar estudios e investigaciones holísticas con el objetivo de cuantificar las relaciones de causalidad entre el ecosistema y la generación de bienestar social. EC-04.- Iniciar estudios que valoran y relacionan el flujo de servicios ecosistémicos a diversas escalas.	

(*) Los proyectos de embalses son proyectos ya en etapa de construcción o prefactibilidad. Sin embargo, se consultó por su beneficio esperado y modelaron hidrológicamente para integrarlos en las acciones propuestas.

Fuente: elaboración propia (Anexo D, Plan de Acción).

7.5 Alternativas seleccionadas

Todas las alternativas identificadas provienen de una selección de ideas del territorio que además fueron evaluadas con mayoría de aceptación por los actores locales. Por lo tanto, la totalidad de las acciones fueron seleccionadas para ser incorporadas como parte del Plan Estratégico, solo se somete a discusión la implementación de la totalidad de los embalses proyectados, puesto que ellos en su operación conjunta no logran disminuir completamente la brecha.

Como ya se comentó anteriormente, se realizó una priorización de las acciones basados en la combinación de 4 criterios: Impacto, percepción local, costo y plazo de implementación.

Los resultados de la priorización de cada una de las acciones se muestran en la siguiente tabla

Tabla 7-3 Priorización de las acciones definidas.

CÓDIGO	ACCIONES	PRIORIDAD
AG-02	Creación y fortalecimiento de las Oficinas de Asuntos Hídricos como ente técnico a nivel Municipal	MEDIA
AG-03	Apoyo a la creación de Mesas del Agua de la Sociedad Civil	MEDIA
AG-01	Fortalecimiento Mesas del Agua APR: Apoyo a las APR y las Mingas del Agua.	ALTA
AG-04	Creación y promoción de un Comité coordinador a nivel de cuencas	ALTA
CH-01	Generación de un fondo provincial, regional y/o nacional para mejoramiento de infraestructura y capacidades de APR	ALTA
CH-02	Creación de programa de acompañamiento continuo a OUA y especialmente a APR	ALTA
FO-01	Programa de apoyo a la conformación y legalización de las Juntas de Vigilancia	ALTA
FO-02	Programa de apoyo a conformación de las OUA.	ALTA

CÓDIGO	ACCIONES	PRIORIDAD
FO-03	Programa de mentorías para el fortalecimiento y modernización de APRs/CASUB de la Provincia	ALTA
NF-01	Reutilización de aguas servidas tratadas	BAJA
NF-04	Aporte de agua a las cuencas del río Petorca y La Ligua proveniente de desalación	ALTA
NF-05	Construcción de embalse de regadío Las Palmas	ALTA
NF-06	Construcción de embalse de regadío Los Ángeles	MEDIA
NF-07	Construcción de embalse de regadío La Chupalla	MEDIA
NF-08	Construcción de embalse de regadío Pedernal	MEDIA
NF-02	Aducción APR Alicahue	MEDIA
RA-02	Construcción de piscinas de infiltración en llanura de inundación en ríos Ligua y Petorca	MEDIA
NF-03	Aducción APR Hierro Viejo	ALTA
ME-01	Mejora eficiencia en la conducción de canales de regadío	ALTA
AI-01	Creación plataforma única de visualización de datos en cada cuenca	ALTA
AI-02	Estándares de medición y envío de datos por terceros de acuerdo a requerimientos DGA	ALTA
AI-03	Ampliación de la red de monitoreo para la caracterización del recurso hídrico	ALTA
AI-04	Programa de Monitoreo ciudadano	ALTA
ME-02	Mejora riego intrapredial	ALTA

CÓDIGO	ACCIONES	PRIORIDAD
AI-05	Catastro infraestructura de conducción y distribución de agua para riego	MEDIA
AI-06	Catastro superficies agrícolas sin tecnificar	MEDIA
AI-08	Diseño e implementación de un plan de monitoreo de calidad de aguas	ALTA
EC-01	Actualización del inventario Nacional de Humedales a nivel local	ALTA
EC-02	Estudios técnicos sobre funcionamiento ecológico y social de los humedales	ALTA
EC-03	Desarrollar estudios e investigaciones holísticas con el objetivo de cuantificar las relaciones de causalidad entre el ecosistema y la generación de bienestar social.	ALTA
EC-04	Iniciar estudios que valoran y relacionan el flujo de servicios ecosistémicos a diversas escalas.	ALTA
AI-07	Estudios hidrogeológicos locales en APR	MEDIA
RA-01	Promover la conversión de los Sitios Prioritarios existentes a territorios bajo protección legal para la conservación biológica	ALTA

Fuente: elaboración propia (Anexo D, Plan de Acción).

Un alto porcentaje de las acciones (70%) presenta una alta prioridad de implementación, un 24% presenta una prioridad media y solo un 6% presenta baja prioridad. De las acciones con alta prioridad predominan las acciones asociadas a carencia de información, nuevas fuentes y medio ambiente (Figura 7-7).

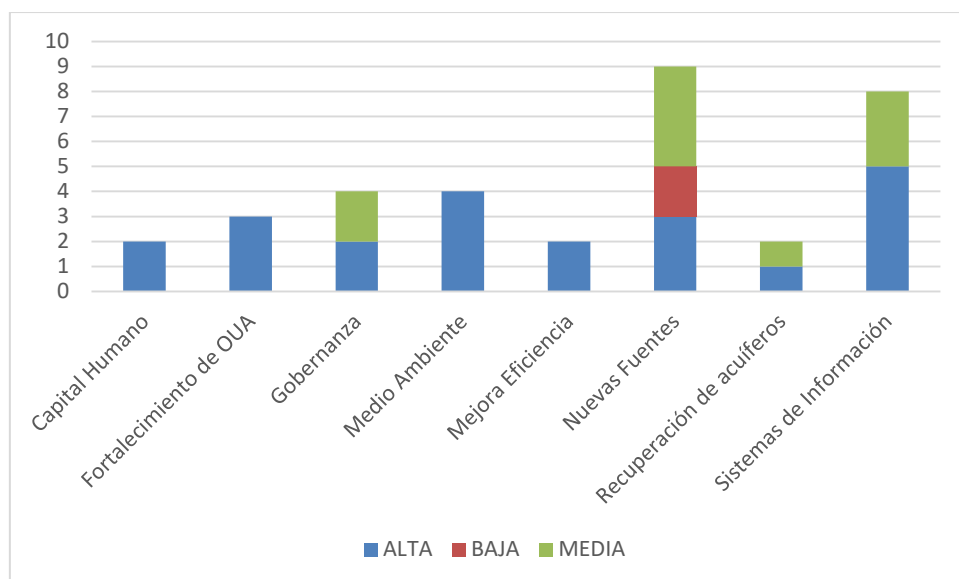


Figura 7-7 Distribución de la priorización de acciones.

Fuente: elaboración propia (Anexo D, Plan de Acción)..

7.6 Evaluación conjunta del Plan

7.6.1 Indicadores

Para evaluar las mejores condiciones que generan las iniciativas planteadas anteriormente, se simularon estas en conjunto en el modelo integrado. Para ello se generó un único escenario por cuenca en el cual se incorporaron las iniciativas definidas en los distintos escenarios. Estas iniciativas fueron puestas en marcha de acuerdo a los plazos de implementación expresados anteriormente.

En el río Ligua se consideraron los escenarios: Aducción Alicahue, Prorrato, Desalación, Embalse Los Ángeles y Embalse Chupalla. En el río Petorca se consideraron los escenarios: Aducción Hierro Viejo, Embalse Las Palmas, Desalación, Prorrato y Embalse Pedernal. En la Figura 7-8 se puede apreciar los escenarios considerados y su fecha propuesta para su puesta en marcha en el PEGH.

Los escenarios del PEGH para ambos ríos fueron comparados con la situación futura de las cuencas, en caso de no implementar el PEGH (escenario Futuro). Esta condición futura considera que se mantienen los derechos de agua otorgados al 2019, así como la superficie de riego.

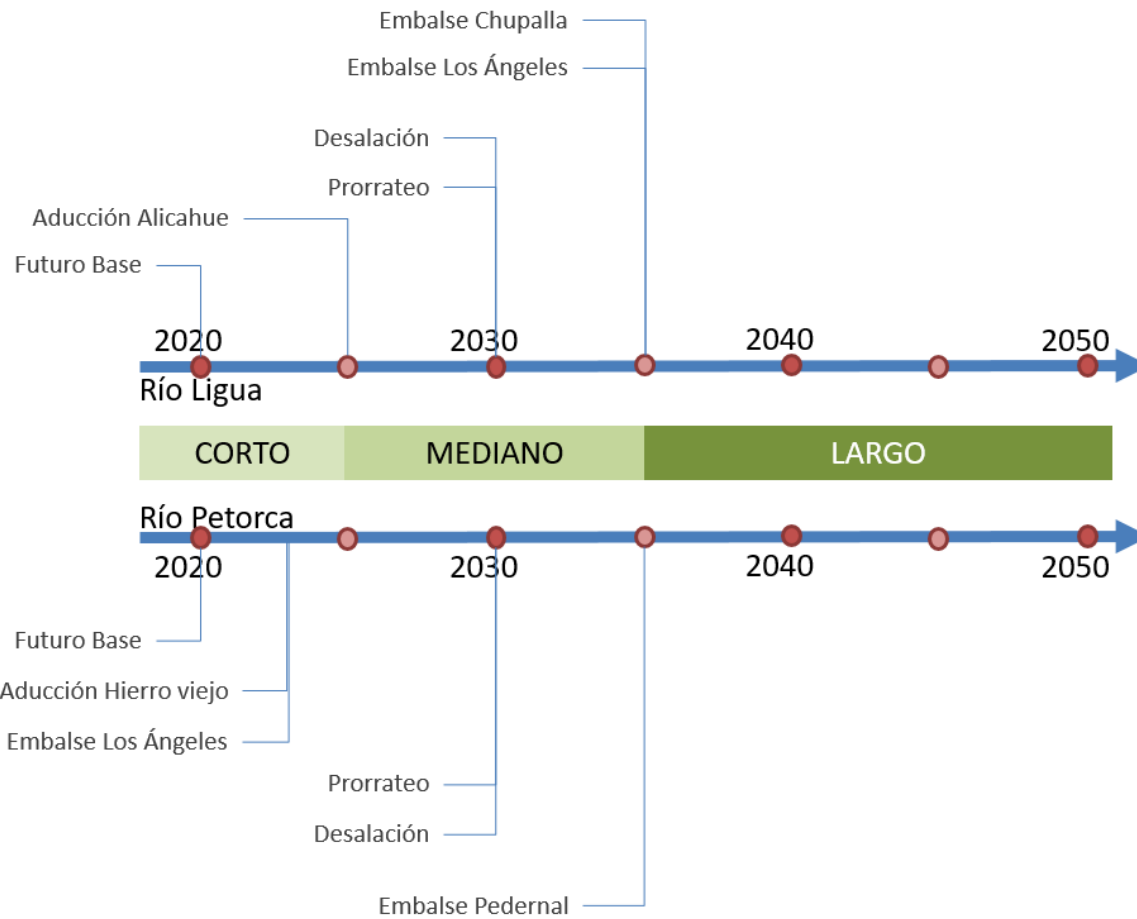


Figura 7-8 Esquema temporal de la simulación del PEGH para las cuencas de los ríos Ligua y Petorca

Fuente: elaboración propia

Los resultados de los indicadores del PEGH se muestran en la Tabla 7-4.

Tabla 7-4 Promedio decadales de los indicadores del plan PEGH en los ríos Ligua y Petorca y su comparación con el escenario futuro e histórico.

Década	Brecha (Hm ³ /año)		Cobertura (%)		Variación del acuífero (Hm ³ /año)
	Agrícola	Agua potable Rural	Agrícola	Agua potable Rural	
Ligua					
Histórico (2010-2019)	85,67	0,48	47,4%	76,8%	-2,73
Futuro (2040-2050)	98,92	1,59	45,2%	55,1%	-5,05
PEGH (2040-2050)	49,3	1,10	73,8%	68,9%	-2,53
Petorca					
Histórico (2010-2019)	48,26	0,52	50,3%	71,3%	-2,21
Futuro (2040-2050)	59,86	1,39	45,8%	47,8%	-0,81
PEGH (2040-2050)	22,0	0,86	81,0%	67,9%	-0,7

Fuente: elaboración basado en resultados de modelación (anexo H. modelo hidrológica acoplado, capítulo 5.2.2)

En el río Ligua se aprecia que la implementación del plan mejora los indicadores en la década 2040-2050 disminuyendo la brecha hídrica del sector agrícola en 50 Hm³/año y aumentando su cobertura en un 28%. Similar situación se aprecia en el agua potable rural, en donde la brecha disminuye en 0,5 Hm³/año y la confiabilidad aumenta en 14%. A su vez, la variación del volumen almacenado disminuyó en 2,3 Hm³/año. De esta forma, la brecha total (que incluye las brechas agrícolas, de demanda de agua potable rural y la variación del almacenamiento del acuífero) pasó de 105,6 Hm³/año (en el escenario futuro) a 52,9 Hm³/año con la implementación del PEGH. Así, la brecha total, disminuyen en un 50%.(Figura 7-9)

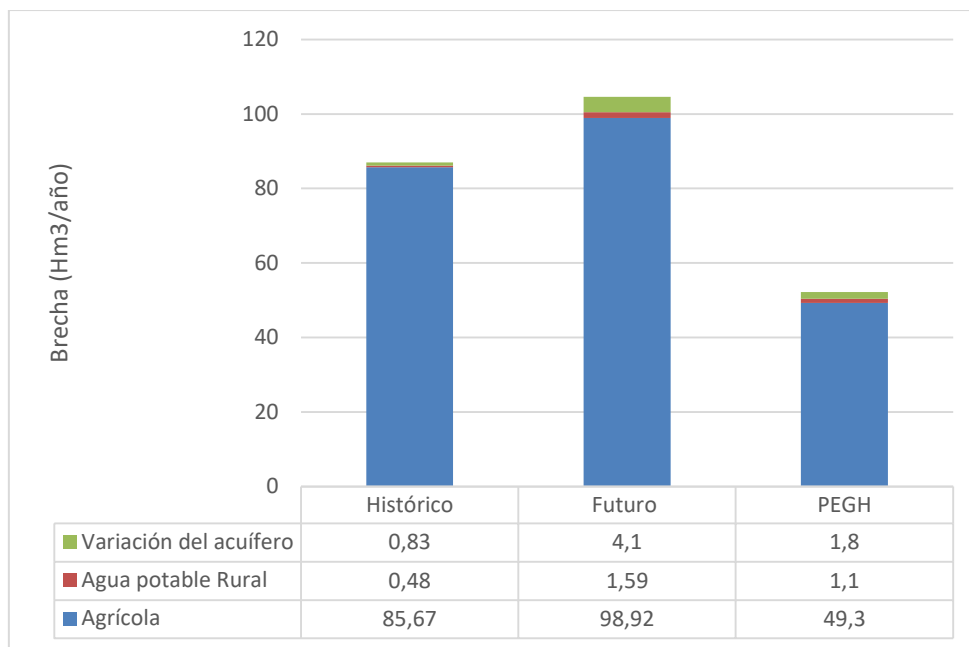


Figura 7-9 Variación de la brecha total al implementar el PEGH en la cuenca del río Ligua

Fuente: elaboración propia basado en resultados modelación hidrológica acoplada (Anexo H modelación hidrológica acoplada, capítulo 5.2.2)

La variación temporal de la brecha hídrica en el periodo 1980-2050 (que incluye los escenarios históricos y futuros) y la disminución temporal de la brecha agrícola una vez implementado el Plan se muestra en la Figura 7-10

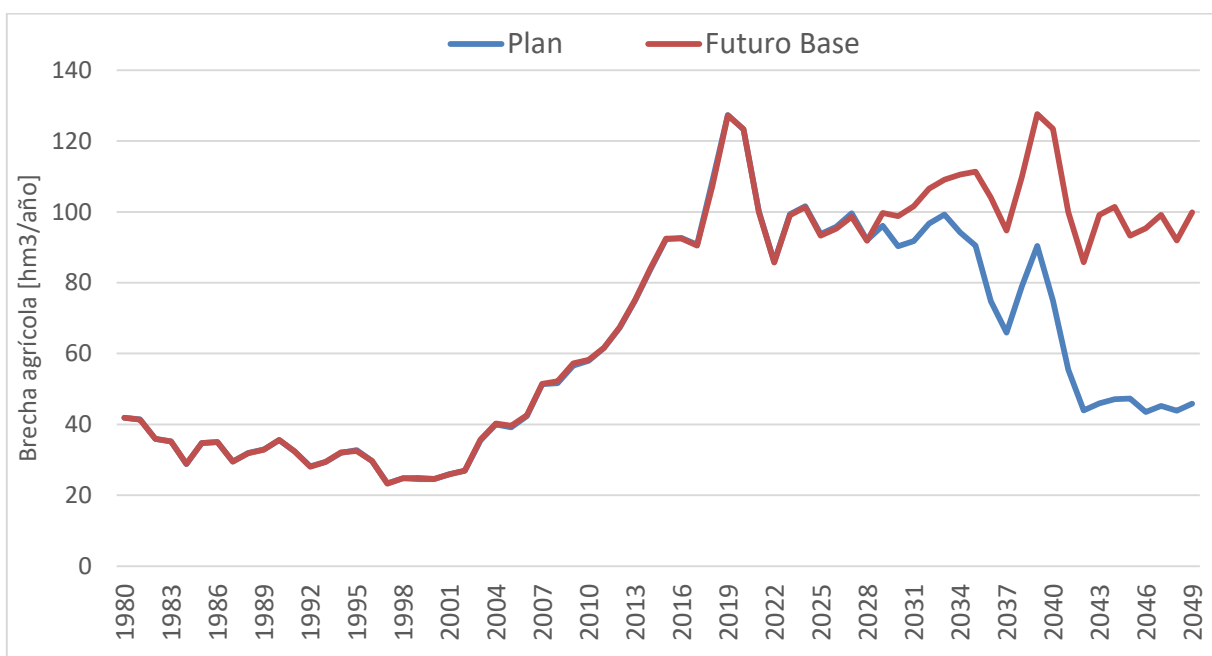


Figura 7-10 Evolución temporal de la brecha agrícola bajo escenario histórico, futuro y con la implementación del Plan en la cuenca del río Ligua

Fuente: elaboración propia basado en resultados modelación hidrológica acoplada (Anexo H modelación hidrológica acoplada, capítulo 5.2.2)

Se aprecia que la brecha agrícola disminuye levemente a partir del año 2020 al 2028. A partir de dicho año se aprecia una reducción notoria de la brecha, y la mayor reducción se logra en torno en los 2030 cuando la desalación está operativa.

Es importante señalar que el PEGH incorpora los dos embalses que están identificados en el Banco Integrado de Proyectos del MOP para esta cuenca (embalses La Chupalla y Embalse Los Ángeles). La simulación de estos embalses se realizó considerando una regla de operación estimada y que puede que no obedezca a la regla de operación bajo una gestión del recurso hídrico, por lo tanto, los resultados en la disminución de la demanda insatisfecha (brecha) como en la variación de la cobertura de la demanda pueden variar si se aplica otra regla de operación.

En forma análoga, se muestra la evolución temporal de la brecha de agua potable para la cuenca del río Ligua, considerando la condición histórica, la futura y la aplicación del Plan (Figura 7-11).

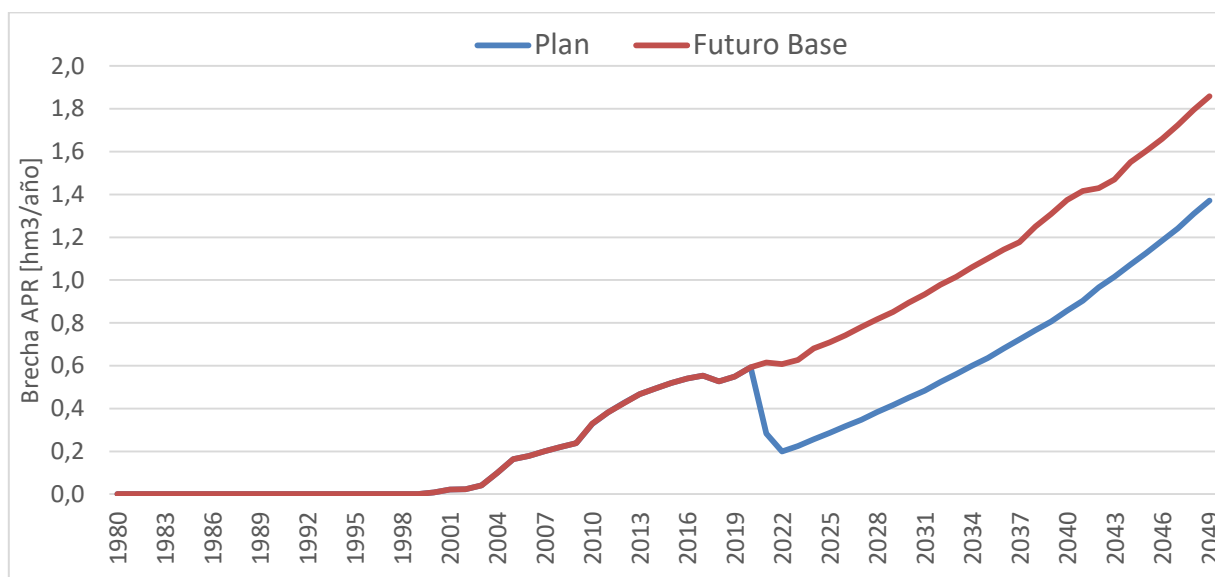


Figura 7-11 Evolución temporal de la brecha de agua potable bajo escenario histórico, futuro y con la implementación del Plan en la cuenca del río Ligua

Fuente: elaboración propia basado en resultados modelación hidrológica acoplada (Anexo H modelación hidrológica acoplada, capítulo 5.2.2)

Se aprecia que bajo la aplicación el PEGH, la brecha de agua potable disminuye cuando se implementa el Plan. Esta disminución obedece principalmente a la puesta en operación de

la aducción Alicahue. La brecha no disminuye completamente ya que esta aducción no abarca al totalidad de SSR presentes en la cuenca.

En el río Petorca, al igual que en el río Ligua, se aprecia que la implementación del plan mejora los indicadores en la década 2040-2050 disminuyendo la brecha hídrica del sector agrícola en 11,6 Hm³/año y aumentando su cobertura en un 35%. Similar situación se aprecia en el agua potable rural, en donde la brecha disminuye en 0,5 Hm³/año y la confiabilidad aumenta en 20%. A su vez, la variación del volumen almacenado disminuyó en 0,7 Hm³/año. De esta forma, la brecha total (que incluye las brechas agrícolas, de demanda de agua potable rural y la variación del almacenamiento del acuífero) pasó de 62,1 Hm³/año (en el escenario futuro) a 23,6 Hm³/año con la implementación del PEGH. Así, la brecha total, disminuyen en un 62%.(Figura 7-12)

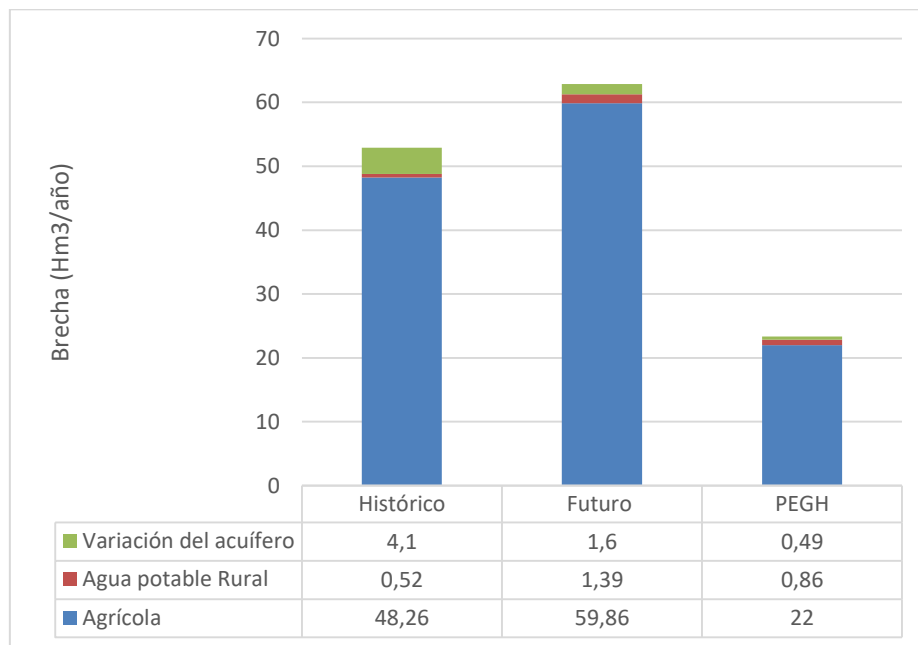


Figura 7-12 Variación de la brecha total al implementar el PEGH en la cuenca del río Petorca

Fuente: elaboración propia basado en resultados modelación hidrológica acoplada (Anexo H modelación hidrológica acoplada, capítulo 5.2.2)

Se aprecia que bajo la aplicación el PEGH, la brecha de agua potable disminuye cuando se implementa el Plan. Esta disminución obedece principalmente a la puesta en operación de la aducción Hierro Viejo. La brecha no disminuye completamente ya que esta aducción no abarca la totalidad de SSR presentes en la cuenca.

La variación temporal de la brecha hídrica en el periodo 1980-2050 (que incluye los escenarios históricos y futuros) y la disminución temporal de la brecha agrícola una vez implementado el Plan se muestra en la Figura 7-13

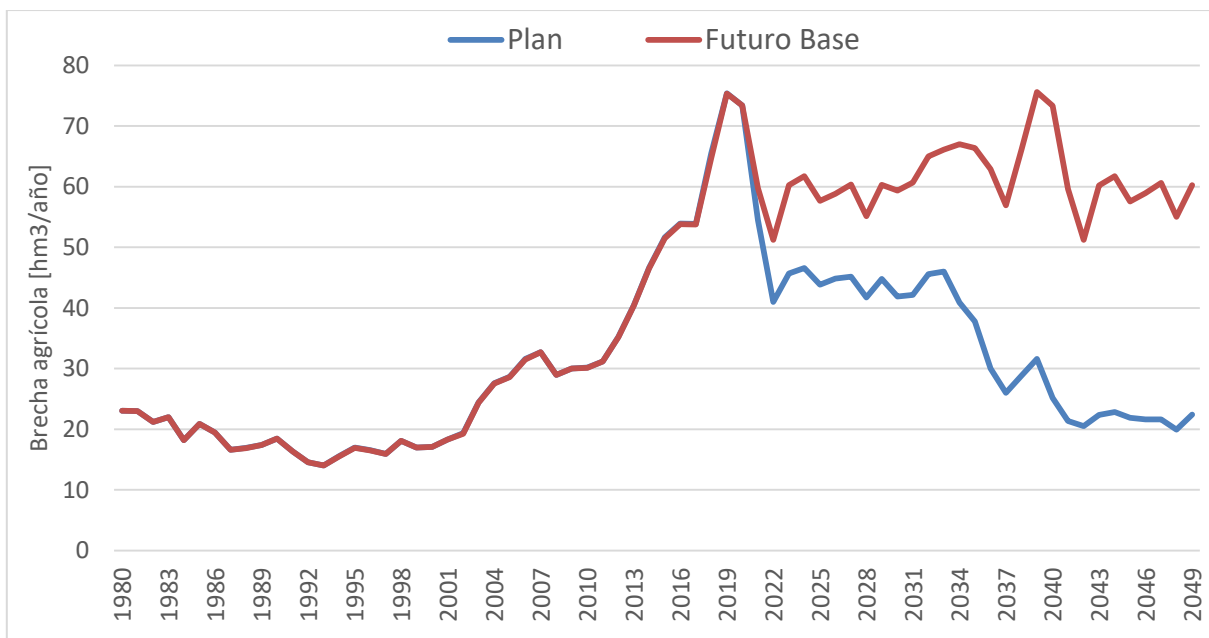


Figura 7-13 Evolución temporal de la brecha agrícola bajo escenario histórico, futuro y con la implementación del Plan en la cuenca del río Petorca

Fuente: elaboración propia basado en resultados modelación hidrológica acoplada (Anexo H modelación hidrológica acoplada, capítulo 5.2.2)

Se aprecia que la brecha agrícola comienza a disminuir a partir del año 2020. En el año 2022 se aprecia una mantención de la brecha y posterior al año 2030 la brecha sigue disminuyendo en forma sostenida, logrando una disminución del orden del 65% respecto a la condición futura proyectada para el año 2050.

Es importante señalar que el PEGH incorpora los dos embalses que están identificados en el Banco Integrado de Proyectos del MOP para esta cuenca (embalses Las Palmas y Embalse Perdernal). La simulación de estos embalses se realizó considerando una regla de operación estimada y que puede que no obedezca a la regla de operación bajo una gestión del recurso hídrico, por lo tanto, los resultados en la disminución de la demanda insatisfecha (brecha) como en la variación de la cobertura de la demanda pueden variar si se aplica otra regla de operación.

En forma análoga, se muestra la evolución temporal de la brecha de agua potable para la cuenca del río Ligua, considerando la condición histórica, la futura y la aplicación del Plan (Figura 7-14).

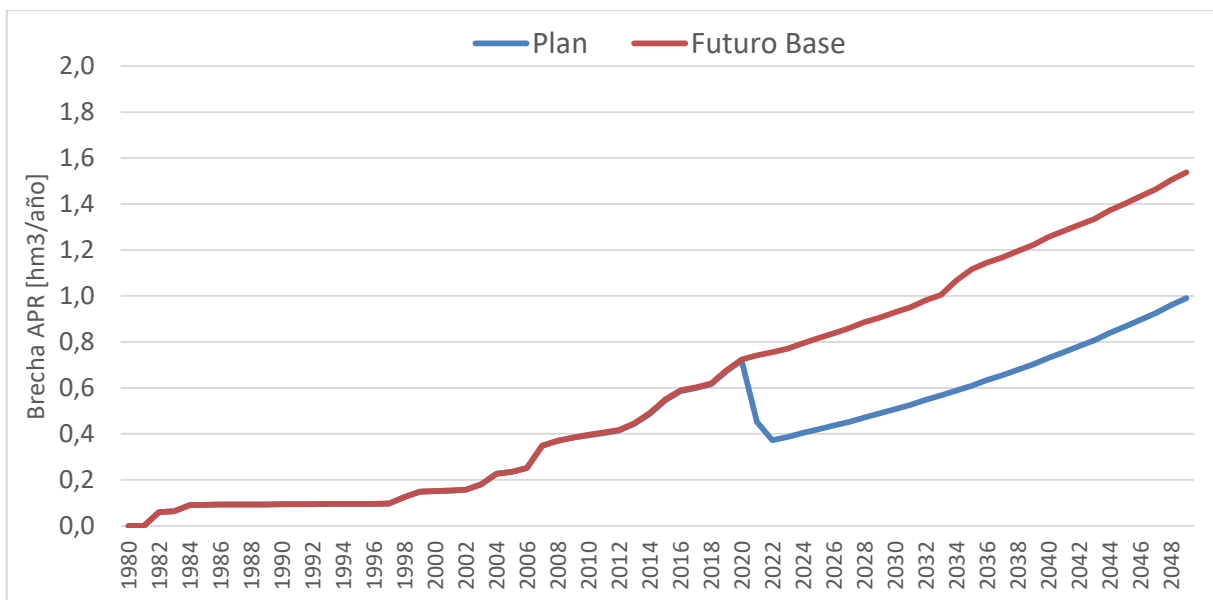


Figura 7-14 Evolución temporal de la brecha de agua potable bajo escenario histórico, futuro y con la implementación del Plan en la cuenca del río Petorca

Fuente: elaboración propia basado en resultados modelación hidrológica acoplada (Anexo H modelación hidrológica acoplada, capítulo 5.2)

En términos generales, la implementación del PEGH permite mejorar la situación hídrica en ambas cuencas, las iniciativas que componen el Plan no son suficiente para eliminar las brechas completamente.

La agricultura pareciera ser la mayor beneficiada, ya que la brecha disminuye en mayor porcentaje, así como su cobertura logran un mayor aumento, el aumento del consumo de agua potable es importante, pero no es suficiente.

Esto lleva a analizar más en detalle las iniciativas planteadas, particularmente aquellas que están el Banco integrado de proyecto. Por ejemplo, los 4 embalses proyectados no logran disminuir considerablemente las brechas agrícolas ni las de agua potable, por lo tanto, será necesario desarrollar estudios más profundos en cuanto a la hidrología proyectada, demandas estimadas y la regla de operación con el fin de encontrar soluciones más eficientes. Los embalses ubicados en la cuenca del río Petorca logran una mayor disminución de la brecha, pero no es sustancial el aporte de ellos en el PEGH. Las aducciones proyectadas logran una mejor importante en las APR, en donde la aducción Hierro viejo permite obtener una cobertura igual al 100% de las APR conectada a dicha aducción. En el caso de la aducción Alicahue, en la cuenca del río Ligua, los 42 l/s no son suficiente para satisfacer a todas las APR conectadas. En ambas aducciones, se ve la efectividad de las medidas, pero estas no son suficientes para la completa disminución de la brecha, por lo que será necesario evaluar la factibilidad técnica, hidrológica y económica de ampliar la cantidad de aducciones internas.

Como resultado general de los PEGH, se puede deducir que las iniciativas permiten disminuir la brecha y aumentar la cobertura, sin embargo, estas no son suficiente para paliar el déficit hídrico en forma completa. Particular interés debe darse a las aducciones mostrando una buena efectividad en disminución de la demanda de agua potable y la necesidad de pensar nuevas aducciones para ello. En contraposición los embalses proyectados no logran un efecto de disminución importante en la brecha agrícola, debido principalmente a la escasez del recurso y probablemente a la regla de operación elegida para esta simulación.

La totalidad de las medidas simuladas, no eliminan completamente el déficit hídrico, lo cual conlleva a concluir sobre la necesidad de disminuir la demanda principalmente agrícola, cambiando a cultivos con menor demanda o bien disminuyendo la superficie asociada a riego.

Probablemente en un corto plazo sea necesario profundizar en algunas iniciativas como el dimensionamiento de los embalses y su regla de operación utilizada. Redistribución de APR conectadas a aducciones y como se implementará la gobernanza propuesta para la correcta implementación del PEGH

7.6.2 Criterios de sustentabilidad

Al igual que en el escenario histórico (Reference) y el caso futuro (Futuro Base MIROC) se calcularon los criterios de sustentabilidad para el escenario de implementación del Plan (PEGH 2020–2050).

En la tabla se muestra el cumplimiento de los criterios CS1, CS2 y CS3, comparando el caso futuro (FB MIROC) y el caso de implementación del Plan (PEGH 2020-2050) (Tabla 7-5). Se aprecia que la implementación del PEGH realiza mejoras en los respectivos SHAC, pero no logra el cumplimiento de los criterios de sustentabilidad cuando estos se incumplen bajo el escenario futuro.

Llamativo es el caso de la satisfacción de la demanda para uso agrícola, en donde el PEGH sí logra un aumento en la satisfacción de la demanda, pero no logra que esta llegue a un 95% de la demanda, por lo tanto, se mantiene el incumplimiento de este criterio (CS3). Esto ocurre en todos los SHAC, a excepción de los SHAC Estero Alicahue y Estero los Ángeles.

A modo de ejemplo, se muestra el aumento en la satisfacción de la demanda al implementar el PEGH en el SHAC Estero Patagua (Figura 7-15) en donde para el año 2050 la satisfacción de la demanda subterránea bajo el escenario futuro es 64% y con la implementación del PEGH aumenta a un 67%. Similar situación puede verse en el SHAC Ligua Oriente (Figura 7-16), en donde la satisfacción de la demanda agrícola de fuente subterránea es igual a un 55% en el año 2050 y ésta aumenta a un 58% bajo la aplicación del PEGH.

Estos resultados muestran que el Plan no es capaz de satisfacer la totalidad de la demanda subterránea agrícola y por lo tanto, será necesario tomar otras medidas como la reducción de superficie agrícola y/o cambios de cultivo con menor demanda hídrica.

Tabla 7-5 Cumplimiento de los criterios de sustentabilidad por SHAC aplicando el PEGH en las cuencas del Río Ligua y del Río Petorca

Sector	CS1		CS2		CS3-Agro		CS3-APR	
	Futuro	PEGH	Futuro	PEGH	Futuro	PEGH	Futuro	PEGH
Rio_Pedernal	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple
Estero_Las_Palmas	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple
Rio_del_Sobrante	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	Cumple	No cumple
Rio_Petorca_Poniente	Cumple	No cumple	No Cumple Drain	No Cumple Drain	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple
Estero_Alicahue	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple
Rio_La_Ligua_Oriente	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	Cumple	No cumple
Rio_La_Ligua_Cabildo	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple
Rio_La_Ligua_Pueblo	No cumple	No cumple	No Cumple	No Cumple Drain	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple
Estero_Los_Angeles	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple
Rio_Petorca_Oriente	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	No cumple	Cumple
Rio_La_Ligua_Costa	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple
Estero_Patagua	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados de la modelación hidrológica acoplada (Anexo H Modelación hidrológica acoplada, capítulo 6)

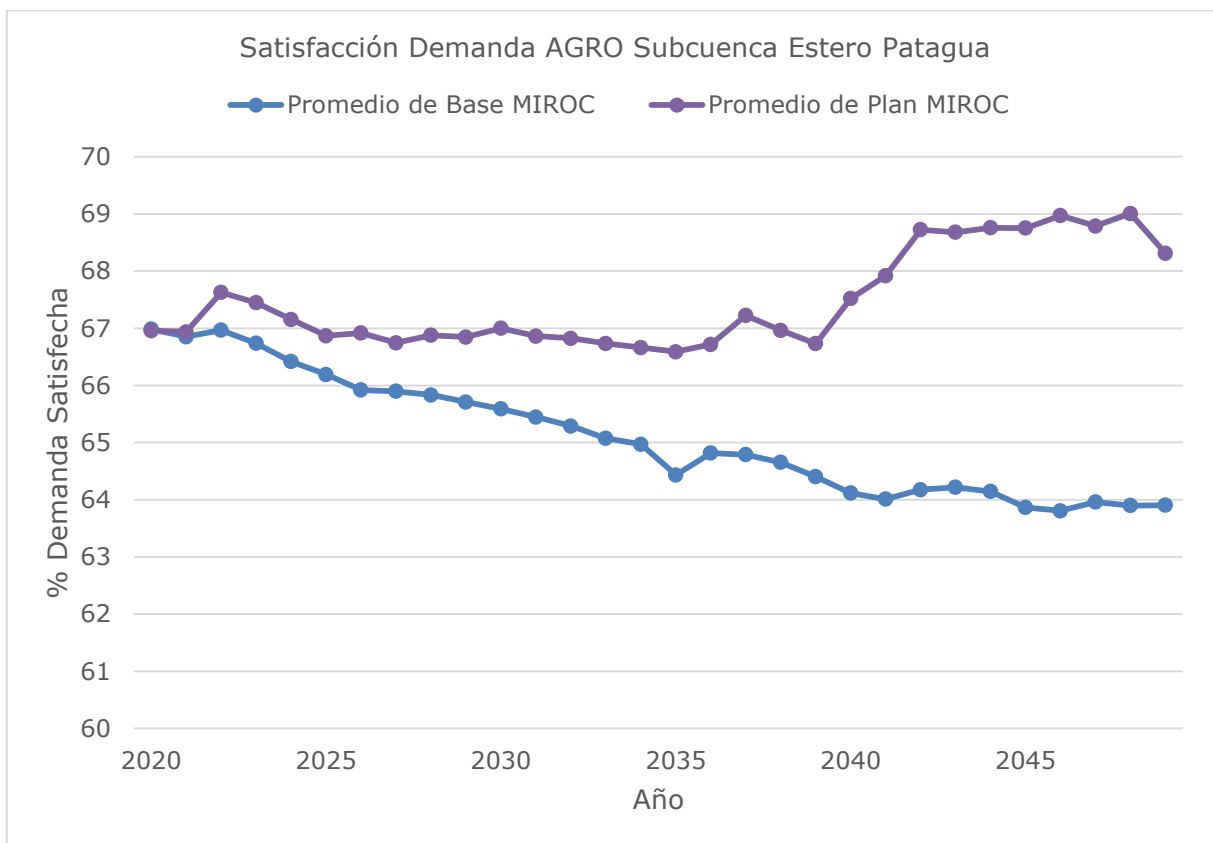


Figura 7-15 Satisfacción demanda agrícola subcuenca Estero Patagua (criterios CS3)

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados de la modelación hidrológica acoplada (Anexo H modelación hidrológica acoplada)

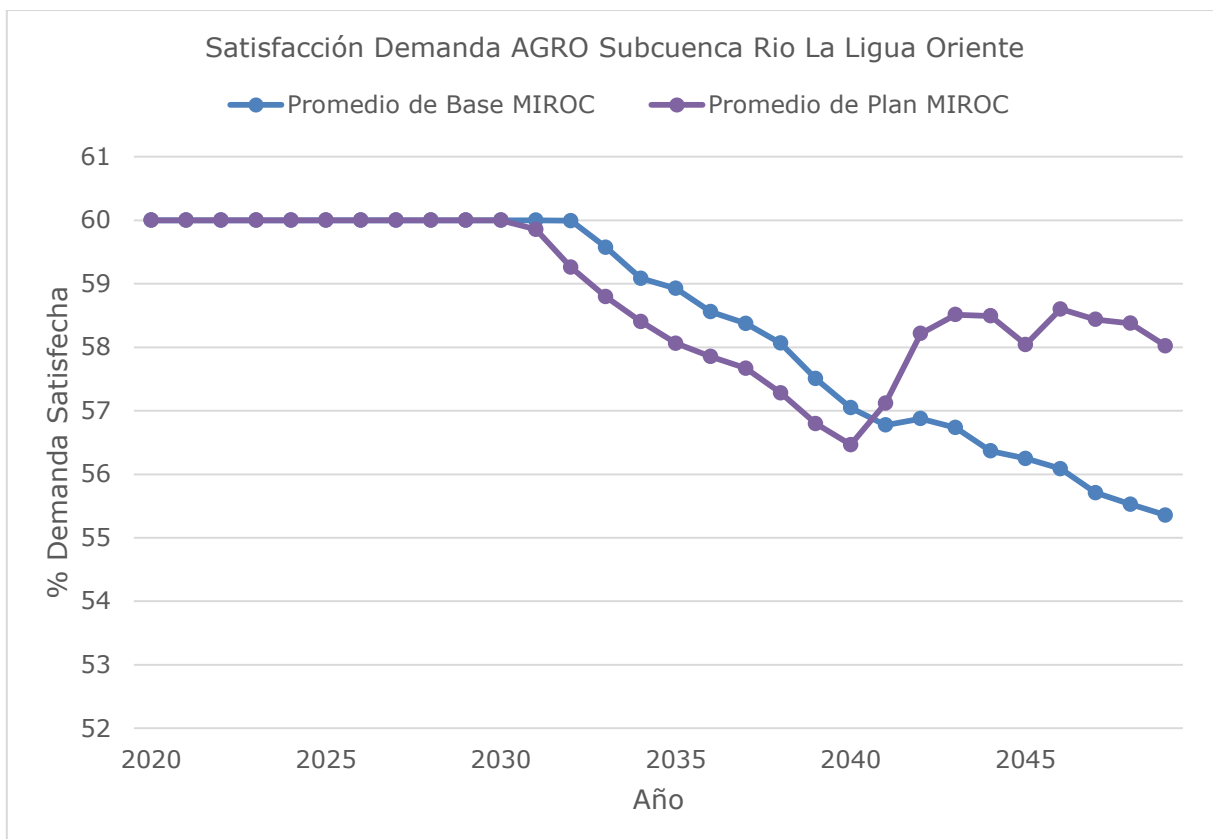


Figura 7-16 Satisfacción demanda agrícola SHAC Río La Ligua Oriente (criterio CS3)

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados de la modelación hidrológica acoplada (Anexo H, modelación hidrológica acoplada, capítulo 6)

7.7 Líneas de acción

- **Ejecutora o mandante DGA**

Las siguientes acciones tendrían como principal ejecutor o mandante a la DGA:

- AI-01. Creación plataforma única de visualización de datos en cada cuenca
- AI-02. Estándares de medición y envío de datos por terceros de acuerdo con requerimientos DGA
- AI-03. Ampliación de la red de monitoreo para la caracterización del recurso hídrico
- AI-04. Programa de monitoreo ciudadano
- AI-08 Diseño e implementación de un plan de monitoreo de calidad de las aguas
- RA-01 Promover la conversión de los Sitios Prioritarios existentes a territorios bajo protección legal para la conservación biológica

- **Otras instituciones**

Aunque las siguientes acciones se visualizan en coordinación y/o con el apoyo de la D.G.A., el impulsor principal son otras instituciones Nacionales descentralizadas y Regionales, e incluso lideradas por OUA y otras organizaciones de usuarios de agua.

Dirección de Obras Hidráulicas

- NF-01- Reutilización de aguas servidas tratadas – SISS - DOH
- NF-02. Aducción APR Alicahue
- NF-03. Aducción APR Hierro Viejo
- NF-04. Aporte de agua a las cuencas del río Petorca y La Ligua proveniente de desalación
- NF-05. Construcción de embalse de regadío Las Palmas
- NF-06. Construcción de embalse de regadío Los Ángeles
- NF-07. Construcción de embalse de regadío La Chupalla
- NF-08. Construcción de embalse de regadío Pedernal
- AI-07. Estudios hidrogeológicos locales en APR
- CH-01. Generación de un fondo concursable provincial, regional y/o nacional para mejoramiento de infraestructura y capacidades de APR (con Unión APR)
- CH-02. Creación de programa de acompañamiento continuo a OUA y especialmente a APR.
- AG-01. Fortalecimiento Mesas del Agua APR: Apoyo a las APR y las Mingas del Agua.
- RA-02. Construcción de piscinas de infiltración en llanura de inundación en ríos Ligua y Petorca.

Comisión Nacional de Riego

- FO-01. Programa de apoyo legal y técnico para la conformación y operación de las Juntas de Vigilancia
- FO-02. Programa de apoyo legal y organizativo para la conformación de Asociaciones de canalistas y CASUB
- ME-01. Mejora eficiencia en la conducción de canales de regadío
- ME-02. Mejora riego intrapredial
- AI-05. Catastro infraestructura de conducción y distribución de agua para riego
- AI-06. Catastro superficies agrícolas sin tecnificar

Gobierno Regional

- AG-02. Creación y fortalecimiento de las Oficinas de Asuntos Hídricos como ente técnico a nivel Municipal
- AG-03. Apoyo a la creación de Mesas del Agua de la Sociedad Civil
- AG-04. Creación y promoción de un Comité coordinador a nivel de cuencas

Ministerio de Medio Ambiente

- EC-01. Actualización del inventario Nacional de Humedales a nivel local
- EC-02. Estudios técnicos sobre funcionamiento ecológico y social de los humedales
- EC-03. Estudio relaciones de causalidad entre el ecosistema y la generación de bienestar social.
- EC-04. Estudio valoración flujo de servicios ecosistémicos a diversas escalas.

Organizaciones de Usuarios de Agua y otras organizaciones

- AI-04. Programa de monitoreo ciudadano
- FO-03. Programa de mentorías para el fortalecimiento y modernización de APRs/CASUB de la Provincia

Fuente: elaboración propia

8. IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN

8.1 Hitos de referencia en la implementación del Plan

Corto Plazo

- Se está realizando el diagnóstico de necesidades para conformar Juntas de Vigilancia en la cuenca de la Ligua (FO-01)
- Se cuenta con un programa de acompañamiento continuo a las OUA conformadas y a APR (CH-01).
- Las APRs y CASUB con más experiencia cuentan con una red de apoyo interinstitucional para traspasar experiencia y conocimiento a otras organizaciones (FO-02)
- Se han desarrollado 55 estudios hidrogeológicos para las APRs (AI-07)
- Se ha generado un programa de fortalecimiento de las Mesas del Agua APR y se cuentan con dos Unión de APR fortalecidas.
- Se está trabajando en las bases para la creación de un Comité coordinador a nivel de cuencas (AG-04)¹².
- Se está implementando el diagnóstico de las necesidades de mejorar de revestimiento de canales y riego intrapredial (ME-01, ME-02).
- Se ha puesto en funcionamiento las obras del embalse Las Palmas (NF-04) y las aducciones de Hierro Viejo (NF-02) y Alicahue (NF-08)

Mediano Plazo

- Se cuenta con nuevas Juntas de Vigilancia en la cuenca de la Ligua (continuación FO-01)
- Se ha creado la Mesas del Agua de la Sociedad Civil (AG-03)
- Se han abierto Oficinas de Asuntos Hídricos en todos los municipios de la cuenca (AG-02).
- Se han generado negociaciones entre las Mesas Productivas, Mesa Sociedad Civil y Mesa APRs para la creación de un Comité de cuenca (continuación AG-04).
- La red de monitoreo es más extensa debido a la puesta en marcha de las estaciones de monitoreo fluviométrica, meteorológica
- Existe un conocimiento más acabado del ecosistema (EC-02, EC-03 y EC-04), lo cual permitirá dar un diagnóstico real de la situación de estos ecosistemas, particularmente definir nuevas acciones para disminuir las brechas identificadas en esta etapa

¹² Aunque esta acción no solo es importante, sino fue valorada muy positivamente, requiere de un trabajo previo con las distintas Mesas que no estará listo en el corto plazo.

- La puesta en marcha del plan de monitoreo de calidad fisicoquímica del agua subterránea y superficial (AI-08) permitirán mejorar el diagnóstico y definir nuevas brechas, las cuales deberán ser subsanadas con acciones específicamente definidas
- Se ha aumentado la eficiencia de riego, mejorando la conducción y distribución en canales (ME-01), así como en la tecnificación del riego propiamente tal (ME-02)

Largo Plazo

- Se encuentran en funcionamiento los 3 embalses restantes en proyecto (NF-04 al NF-07).
- Se encuentra operativo el comité de cuenca (AG-04)

Fuente: elaboración propia

8.2 Estrategia de implementación

La estrategia de implementación del plan obedece a la priorización realizada anteriormente y al plazo de ejecución de dichas acciones, tal como se muestra en la Figura 8-1.

En ella se observa que para el corto plazo 15 son las acciones que deben ser implementadas. En términos generales, estas acciones obedecen a la infraestructura que está en construcción actualmente (Embalse Las Palmas y la aducción de Hierro Viejo) y a la construcción de piscinas de infiltración en las llanuras de inundación de los ríos Petorca y, a la conformación y legalización de Organismos Usuarios del Agua y a la generación de información para el monitoreo.

En el mediano plazo, se implementan fuertemente las acciones que permiten conocer los humedales existentes en la cuenca, su funcionamiento y servicios ecosistémicos existentes, y finalmente su relación entre dichos servicios ecosistemas y provisión de recursos hídricos. Dentro de esto mismo, se consideró la protección oficial de sitios prioritarios existentes en la cuenca como sitios de provisión hídrica. Además, se incluyen las obras de aducción de Alicahue, la implementación de fondos para el mejoramiento continuo de las APR, instalación de estaciones de monitoreo y el fortalecimiento de instancias coordinadoras en asuntos hídricos.

Finalmente, en el largo plazo se espera que el comité de cuencas se encuentre operativo y permita llevar a cabo la gestión de cuencas. Además, los restantes embalses en carpeta deberían estar entrando en operación.

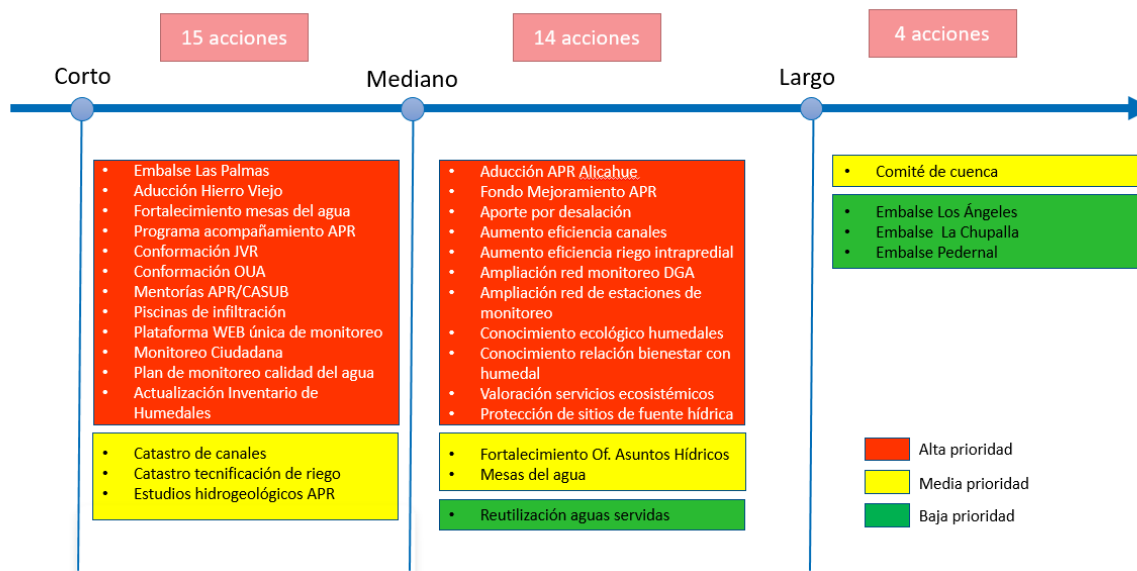


Figura 8-1 Línea de tiempo de implementación de las acciones y su prioridad de implementación.

Fuente: elaboración propia (Ver Anexo D, apéndice D.3).

8.2.1 Aspectos institucionales

En la implementación del Plan, deben participar activamente diversas instituciones estatales y privadas, a distintas escalas espaciales y administrativas. De esta forma se velará por la correcta implementación y ejecución de este Plan.

A continuación, se muestran el rol de las instituciones, tanto públicas como privadas en las respectivas acciones.

Tabla 8-1 Rol de las instituciones sectoriales y regionales en la implementación del Plan.

Institución	Rol	Inversión Millones de U\$D
Dirección General de Aguas	Definición de acciones orientadas a la obtención de información y a la conformación de las mesas del agua y el comité del agua	6,9
Dirección de Obras Hidráulicas	Construcción de grandes obras de regulación, particularmente de los 4 embalses planteados como iniciativa estatal Mejoramiento de la infraestructura de las APR, así como sus capacidades técnicas. Construcción de las aducciones de Hierro Viejo y Alicahue	900,8

Institución	Rol	Inversión Millones de U\$D
Comisión Nacional de Riego	Mejoramiento de eficiencia en el riego y fortalecimiento y modernización de Juntas de vigilancia y CASUB	30,4
Ministerio de Medio Ambiente	Aumento del conocimiento y caracterización de los humedales existentes. Participación activa en la generación de figuras de protección oficial de zonas como fuentes de provisión de recursos hídricos	15,0
Gobierno Regional	Implementación de medidas no estructurales (soluciones basadas en la naturaleza) y apoyo en la conformación de las mesas del agua y del comité de cuencas	5,7
Organizaciones de Usuarios de agua	Permitir y facilitar la gestión del agua, participando en reforzar las capacidades técnicas y de gestión. Tecnificación de riego e implementación de sistemas de medición, telemetría y automatización intra y extrapredial	2,2
Sociedad civil	Conformación y participación en mesas de la sociedad civil y en el monitoreo ciudadano	0,2

Fuente: elaboración propia (Anexo D, Plan de Acción)..

8.2.2 Aspectos de cultura del Agua

Los principales aspectos relacionados con la cultura del agua que deben ser incorporados en la implementación del Plan son los siguientes.

8.2.2.1 Gobernanza y Gestión Integrada de Recursos Hídricos

La definición de una gobernanza para la gestión integrada de los recursos hídricos en las cuencas de Ligua y Petorca es sin lugar a duda una de las actividades con mayor relevancia.

Dado el interés y la participación histórica de distintos tipos de organizaciones en torno al recurso hídrico, es importante que esta gestión se realice incorporando todos los actores de la cuenca. En este Plan se han identificado 3 grandes grupos: Los agricultores representados en las CAS principalmente; las cooperativas de Agua Potable Rural, representadas en la Unión APR y la sociedad Civil en general.

El modelo de gobernanza presentado (Anexo J. Descripción y Diagnóstico. Capítulo 3.5), se basa en la conformación de un comité de cuenca que agrupa dichos grupos en sus respectivas mesas del agua.

Es importante que la conformación de este comité sea autónomo y cuente con financiamiento propio. Las funciones de este comité no solo deben ser monitorear y gestionar el recurso hídrico, sino que debe contar con facultades que permita prevenir y solucionar potencial conflictos en torno al agua, su calidad y medio ambiente, y además deberá ser la entidad de monitorear el cumplimiento del Plan.

8.2.2.2 Eficiencia en el uso del recurso

La acción con mayor aceptación por parte de los actores participantes del proceso de elaboración del Plan Estratégico es el aumento de eficiencia en el uso del agua, y principalmente asociada al uso agrícola de la misma.

Actualmente se realiza una inversión permanente en esta materia, pero se requiere un plan específico, con objetivos, metas e indicadores que permitan evaluar el cumplimiento de las mismas. En complemento, se requiere la definición de responsabilidades respecto de la implementación del Plan.

8.2.2.3 Sustentabilidad del recurso

La sustentabilidad del recurso hídrico en estas cuencas es crítica, por lo que la sociedad y los usuarios deben entender que esta es una brecha en sí y que muchas de las acciones orientadas a tener mayor disponibilidad del recurso hídrico disponible, como aumento de la eficiencia en el uso, no debe ir exclusivamente a aumentar la productividad, sino que gran parte debe orientarse a mejorar los niveles de sostenibilidad del recurso hídrico como también permitir el establecimiento de un caudal ambiental.

8.2.3 Aspectos de financiamiento

El costo del Plan es de 958,159 MMUSD para las 33 acciones definidas, en donde un 94% de dicho monto es considerando las obras de infraestructura hidráulica

De acuerdo a la estrategia de implementación del Plan y a la cartera de acciones a implementar en el corto, mediano y largo plazo, la inversión a realizar en dichos plazos se distribuye según se muestra en la Figura 8-2.

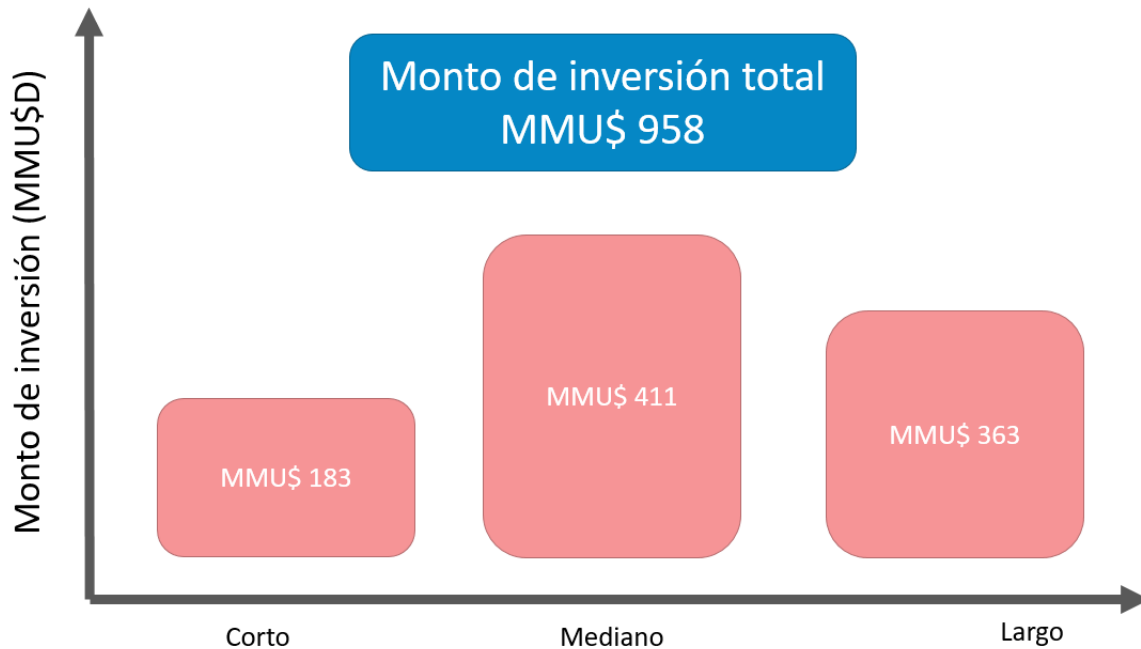


Figura 8-2 Distribución de los costos de implementación y operación del Plan Estratégico de Gestión Hídrica de las cuencas Ligua y Petorca

Fuente: elaboración propia (Anexo D. Acciones del Plan Apéndice D.3)

El financiamiento proviene principalmente de las instituciones que participan en la implementación de las acciones. La DOH es la principal fuente de financiamiento, en conjunto con la CNR de acuerdo a las mejoras en infraestructura de obras de riego y la incorporación de mayores hectáreas con riego tecnificado.

Durante la ejecución de la elaboración del Plan se evidenciaron algunas instancias en donde es posible llevar a cabo algunas alianzas público-privadas, ya sea para el financiamiento como para la operación de las acciones. Estas se refieren principalmente a 1) la compra de agua proveniente de desalación, 2) reutilización de aguas residuales y 3) Instalación y operación de estaciones de monitoreo.

9. MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL PLAN

Una parte importante del Plan es el seguimiento, pues permitirá evaluar si: 1) se están llevando a cabo las acciones definidas, y 2) la eficacia en la disminución de las brechas. Además, es importante que el Plan sea adaptativo, por lo que es relevante que se puedan tomar las medidas correspondientes en una etapa temprana.

La acción del seguimiento es una actividad técnica, permanente y que debe evaluar el plan en forma periódica, por ejemplo, en forma anual. Se propone que el seguimiento sea llevado a cabo por una Secretaría Técnica que esté comprendida por el comité de cuenca, sin embargo, esto solo se logrará en los últimos años del Plan, ya que se espera que el

Comité de Cuenca esté completamente implementado en el largo plazo. Por este motivo es necesario que el seguimiento los primeros años lo lleve adelante una Secretaría Técnica de transición. Esta Secretaría debe estar alojada en un espacio de gobernanza que ya esté operativo, como podría ser la Oficina Técnica Hídrica en la cuenca del río Petorca, o bien su equivalente en la cuenca del río Ligua. Posteriormente, ambas secretarías deberán ir migrando hacia una secretaría técnica de los respectivos comités de cuenca.

9.1 Plan de Monitoreo

El plan de monitoreo considera la evaluación del nivel de cumplimiento y eficacia del Plan en la disminución de las brechas. Para ello se propone la implementación de 4 tipos de indicadores de acuerdo al tipo de seguimiento a implementar:

- Indicadores de déficit hídrico
- Indicadores de gestión
- Indicadores de información
- Indicadores de inversión

9.1.1 Indicadores de déficit hídrico

Este indicador corresponde a variables de estado de los recursos hídricos y usos del agua. En este sentido, los indicadores debieran considerar aspectos de confiabilidad, sustentabilidad de acuífero, volumen embalsado, volumen de acuífero, entre otros.

1. Volumen embalsado (Hm^3): Volumen almacenado en forma superficial previa a la temporada de riego
2. Volumen almacenado en acuífero (Hm^3): Volumen almacenado en el año hidrológico y variación del volumen respecto al año anterior
3. Hectáreas regadas (há): Evaluar la variación de hectáreas de riego respecto al año anterior
4. Volumen de agua potable provisto por camiones aljibes (Hm^3): Volumen de agua que es transportado por camiones aljibes para consumo de agua potable, principalmente rural

9.1.2 Indicadores de gestión

Este indicador considera el seguimiento de la implementación de las acciones asociadas a la gobernanza y gestión del recurso hídrico.

- a) Conformación oficial de OUA: Tener un registro de la OUA, tanto como junta de vigilancia como CASUB conformadas oficialmente como personalidad jurídica y reportar el nivel de organización de cada una de ellas
- b) Organismos de gestión: Generar un registro de las otras instancias de gobernanza, como las mesas del agua, oficina hídrica y el propio comité de cuenca.
- c) Funcionamiento de Oficina de Asuntos Hídricos a nivel municipal

9.1.3 Indicadores de información

Estos corresponden al seguimiento de las acciones promocionadas en el plan, tanto en su inversión, puesta en marcha y operación.

- a) Inversión: Cumplimiento de los montos de inversión programada para el periodo
- b) Operación: Cumplimiento de los montos de operación programados para el periodo
- c) Cantidad de estaciones hidrométricas instaladas y en operación

9.1.4 Seguimiento

Tal como se mencionó anteriormente, el seguimiento debe ser llevado a cabo por profesionales capacitados que pertenezcan a la secretaría técnica del comité de cuenca. Los resultados de este seguimiento deben ser transparentadas en las distintas instancias de la gobernanza de la cuenca, tanto a nivel público como privado.

9.2 Mecanismos para el análisis y toma de decisiones

El plan, para que cumpla los objetivos planteados, es necesario que no solo se lleve a cabo el proceso de seguimiento, sino que, además, se realice una evaluación para una actualización considerando los procesos adaptativos para ello.

En este sentido, la actualización del modelo integrado, permitirá ir subsanando las limitaciones propias por la carencia de información y además ajustarse a particularidades del territorio que no pudieron ser advertidas en esta primera implementación. La actualización del modelo integrado debiera ser llevado por personal capacitado perteneciente a la secretaría técnica que realiza el seguimiento del Plan.

10. BRECHAS E INSTANCIAS DE MEJORAS

10.1 Información y conocimiento de la cuenca

A pesar que es una cuenca con un gran nivel de presión del recurso hídrico, el nivel de información es escaso comparado con otras cuencas del país. Durante el estudio que dio origen al PEGH se evidenció la carencia de estaciones de medición del recurso hídrico, así como su calidad, tanto superficial como subterránea. Se evidencian sectores de la cuenca con nula información hidrometeorológica o de fluviometría, como por ejemplo en la zona alta y quebradas afluentes. Es particularmente de interés la falta de estaciones fluviométricas en la zona media de la cuenca. Estos tramos o sectores de cuenca son importantes, porque es donde se produce la recarga al acuífero y es donde la escorrentía superficial alimentará a los embalses proyectados.

La carencia de información no solo es nivel de cuantificar el recurso hídrico, sino que también en calidad del agua, tanto subterránea como superficial. Esto se debe a la carencia de monitoreo y a la escasa estandarización de las pocas campañas que se han llevado a cabo.

Sumado a la carencia de información es aspectos fisicoquímicos del agua, hay una carencia de información y desconocimiento del ecosistema acuático y sus humedales. Esto impide el poder desarrollar una estrategia de conservación de ecosistemas o la mantención de un caudal ambiental demanda ambiental, entre otros.

10.2 Implementación del modelo hidrológico acoplado

El modelo hidrológico acoplado presenta un comportamiento correcto y cumple con el objetivo para este Plan. Sin embargo, dada la complejidad de la situación hídrica de ambas cuencas, es necesario afinar lo más que sea posible la implementación de este modelo.

En este sentido, sería importante contar con información medida sobre las tasas de evaporación real tanto en zonas agrícolas como en zonas de vegetación natural ya que es un componente muy relevante en el balance hídrico total de las cuencas semi-áridas.

Por otra parte, el modelo hidrogeológico presenta una buena calibración en términos generales en la cuenca, presenta una calibración mediana en algunos SHAC. Realizando un análisis de la información disponible en la cual se basó la implementación del modelo. Se debe indicar que el fondo de acuífero fue obtenido a partir del estudio de Ayala y Cabrera (2014) en el cual se indica que se conformó la geometría a partir de prospecciones geofísicas desarrolladas por ellos mismos y un estudio geofísico desarrollado el año 2011 por geodatos.

Se recomienda revisar o actualizar la información generada en el estudio fechado durante el año 2014, con el fin de comprobar que el volumen almacenado esté bien definido.

10.3 Efectividad de las iniciativas propuestas

Se ha demostrado que las acciones implementadas en el PEGH disminuyen la brecha hídrica, aumentando la cobertura de la demanda. Sin embargo, la totalidad de las acciones puestas en marcha no son capaces de disminuir completamente la brecha, evidenciando que el problema en estas dos cuencas es más complejo debido a la disminución de precipitación futura y a la sobre-explotación de los acuíferos. Pareciera que la solución más evidente es lograr un prorrateo superior al 30% de los derechos de agua actualmente otorgados, pero para ello será necesario el entendimiento de todos los actores de la cuenca sobre la delicada situación de esta y la implementación de un organismo de cuenca, al cual hemos llamado comité de cuenca, que apoye y administre la gestión del recurso hídrico.

El PEGH para ambas cuencas tiene un costo de US\$ 958 millones, en donde un 94% corresponde a nuevas fuentes, como la desalación y la construcción de los embalses Las Palmas, Pedernal, Chupallas y Los Ángeles.

De los resultados de aumento de confiabilidad, se aprecia que la efectividad de los embalses no es de gran importancia por sí solos, y es la desalación aquella que logra mejorar la condición de la cuenca.

Por el monto económico que requiere las iniciativas de los embalses, y la baja efectividad en mejorar las confiabilidades, se recomienda revisar la evaluación técnico-económica de cada uno de ellos. El PEGH muestra claramente que es necesario construir embalses en ambas cuencas para mejorar la confiabilidad y disminuir el déficit hídrico. Sin embargo, el segundo embalse en cada cuenca, no genera los impactos esperados, ya que en ambos casos la efectividad de los embalses depende de los niveles de precipitación.

Otro punto importante, es que, para ninguna de las acciones modeladas en el PEGH, la confiabilidad de las APR es superior al 80%, esto quiere decir que para las acciones implementadas en el escenario PEGH no es posible asegurar un abastecimiento al 95% de seguridad. En este sentido se hace imprescindible implementar otras acciones definidas en este mismo Plan. Como por ejemplo estudiar las condiciones hidrogeológicas locales de cada APR con el propósito de profundizar el pozo de abastecimiento, evitando así que estos pozos queden colgados en el acuífero.