



Gobierno
de Chile

**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN**

ACTUALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN DEL SISTEMA ACUÍFERO LA LIGUA-PETORCA

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

AC INGENIEROS

S.I.T. N°442

Santiago, agosto 2019

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

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

Director General de Aguas
Ingeniero Comercial Sr. Óscar Cristi Marfil

Jefa (S) División de Estudios y Planificación
Ingeniera Civil Andrea Osses Vargas

Inspector Fiscal
Hidrólogo Carlos Flores Arenas

Inspector Fiscal Subrogante
Ingeniera Agrícola Pamela García Serrano

AC INGENIEROS

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Guillermo Cabrera Fajardo

Profesionales

Ingeniero Civil Lem Mimica Viladrich
Ingeniero Civil Alex Samuel Cifuentes
Ingeniera Civil Ángela Fuentes Norambuena

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca, tienen desde hace varios años sus acuíferos en estado crítico de sustentabilidad. A causa de su estado crítico, se realizó una actualización de la modelación de los acuíferos de estas cuencas, a objeto de poder evaluar, con información actualizada, si las condiciones existentes en este acuífero permiten la aplicación del artículo 62 del Código de Aguas, de forma que, bajo criterios fundados, se pueda aplicar una reducción temporal del ejercicio de los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, a prorrata de ellos, cumpliendo con los requerimientos del Reglamento de Aguas Subterráneas, establecidos en su artículo 29.

CAPÍTULO 2

ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Se realizó un análisis hidrológico que incluyó pluviometría y fluvimetría, considerando datos hasta diciembre de 2018. Los datos bases fueron completados, usando un modelo de relleno estocástico desarrollado por este consultor. Además, se elaboró un modelo de distribución espacial de precipitaciones, para generar una distribución realista de recargas.

2.1 PLUVIOMETRÍA

2.1.1 Relleno de precipitaciones mensuales

Se seleccionaron 43 estaciones vigentes de la DGA, en el entorno de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.

Se rellenaron los datos para un período de 40 años (1979-2018); debido a que antes de 1979, menos del 50 % de las estaciones tienen datos. Por otra parte, de las 43 estaciones analizadas, para el proceso de relleno, se descartaron 10 estaciones, porque cuentan con menos del 50 % de los datos, para el período 1979-2018.

2.1.2 Modelo de distribución de precipitaciones

Se elaboró un modelo de distribución espacial de precipitaciones. Éste consiste en una grilla que coincide con la grilla base del modelo numérico de flujo subterráneo (grilla de 640·640 m, ver Capítulo 5). Cada celda de la grilla tiene coordenadas espaciales (x,y,z) y el modelo entrega un valor de precipitación promedio anual en cada uno de los centros de las celdas.

El cálculo se basa en las precipitaciones promedios anuales de los datos rellenados de las estaciones meteorológicas, las que fueron seleccionadas según lo explicado en el punto 2.1.1. El dominio modelado se divide en polígonos (mayormente triángulos), y cada vértice, de cada polígono, coincide con una de las estaciones consideradas. Para un polígono dado, las precipitaciones en las celdas interiores a éste, se estiman en función de las precipitaciones de las estaciones coincidentes con sus vértices. El cálculo es un promedio ponderado (según las distancias de cada celda a cada vértice) y corregido por elevación.

2.2 FLUVIOMETRÍA

Existen 4 estaciones fluviométricas vigentes en la cuenca del río Petorca, y 2 en la cuenca del río La Ligua. Se descargaron, desde la página de la DGA, los datos de caudales promedios mensuales históricos, medidos en las 6 estaciones vigentes y se correlacionaron entre sí, para rellenar los datos faltantes.

Las estadísticas de caudales medios mensuales obtenidas, se usaron para representar los ríos en el modelo de flujo subterráneo.

CAPÍTULO 3 GEOLOGÍA

Se realizó un análisis geológico con el objetivo de identificar unidades geológicas y representarlas en el modelo numérico. La definición de unidades geológicas permitió, además, diferenciar las recargas por precipitaciones, según zonas con distintas permeabilidades verticales y, por consiguiente, con mayor o menor potencial de admitir la infiltración de recarga.

Para la identificación de las unidades geológicas, existentes en el área de estudio, se usó el plano geológico del Sernageomin Quillota-Portillo¹.

Se efectuó una categorización cualitativa de las unidades geológicas, identificadas en las cuencas de los ríos Petorca y La Ligua. Los criterios fueron la edad y el tipo de unidad geológica. De esa forma, se asociaron valores de permeabilidad horizontal a cada unidad y posteriormente, en función de la permeabilidad horizontal, se estimó la permeabilidad vertical.

La permeabilidad vertical, es uno de los parámetros que determina la capacidad de conducción vertical para la infiltración de la recarga de origen superficial.

La porosidad efectiva, es otro parámetro necesario para el cálculo de las recargas. Las porosidades efectivas fueron obtenidas de la bibliografía², según la asociación de unidades.

Como se detalla más adelante, el modelo numérico contiene 2 capas. Con la primera capa (o capa más superficial), se representaron los rellenos. Bajo esta capa, se incorporó una segunda capa que permitió representar las unidades de roca, que subyacen a las unidades sedimentarias recientes. La geología de la capa inferior (sólo unidades de roca), se definió extendiendo la cobertura de las rocas identificadas según la geología de superficie.

¹ Hoja Quillota-Portillo, Carta geológica de Chile, escala 1:250.000, Sernageomin, 1993.

² Fuente: Hidrología subterránea. Emilio Custodio/Manuel Ramón Llamas (directores de edición), Tomo 1, 1996.

CAPÍTULO 4

MODELO DE RECARGAS

4.1 PLANTEAMIENTO CONCEPTUAL

Aceptando como hipótesis de representación, que las divisorias superficiales (límites de cuencas hidrológicas), coinciden, aproximadamente, con las divisorias subterráneas (cuencas hidrogeológicas), la recarga total se puede expresar con la siguiente ecuación:

Ecuación 4-1:

$$R^{\text{Total}} = R^{\text{RSC}} + R^{\text{RBC}} + R^{\text{PP}} + R^{\text{RN}} + R^{\text{CN}}$$

Con:

- R^{Total} = Recarga total de origen superficial al medio subterráneo
- R^{RSC} = Recarga por riego en zonas sobre canal (riego con agua subterránea bombeada)
- R^{RBC} = Recarga por riego en zonas bajo canal (riego con agua superficial o subterránea)
- R^{PP} = Recarga proveniente de las precipitaciones
- R^{CN} = Recarga canal-napa (perdidas por infiltración en canales)
- R^{RN} = Flujo río-napa

4.2 RECARGAS POR PRECIPITACIONES

El cálculo de la recarga proveniente de las precipitaciones, se realizó en función de las precipitaciones diarias y de la caracterización geológica del Capítulo 3. La precipitación diaria fue estimada en función de las precipitaciones diarias medidas históricamente en las estaciones Alicahue y Hacienda El Sobrante, pero escaladas al dominio activo del modelo numérico, según la variación espacial de las precipitaciones estimada en el punto 2.1.2.

El cálculo de la recarga por precipitaciones, se realizó considerando un balance diario de lámina de agua disponible para infiltración. La altura de agua diaria disponible para infiltrar se calculó como la precipitación diaria, menos la evaporación potencial diaria.

4.3 RECARGAS POR RIEGO

4.3.1 Riego con agua de origen superficial

Del modelo MOS, desarrollado en un estudio anterior de 2004 para la DOH, fue posible obtener los caudales captados por los canales del sistema de riego de las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca, para el período comprendido entre abril de 1950 y marzo de 2005. Como ambas cuencas son predominantemente pluviales, los caudales para el período 1950-2005, correlacionan bien con las precipitaciones anuales.

Por lo tanto, se usó la expresión polinómica de mejor ajuste (cúbica), para extender los caudales hasta diciembre de 2018.

4.3.2 Riego con agua de origen subterráneo

En un estudio anterior³, se realizó un catastro de captaciones de agua subterránea y se encuestó a los propietarios sobre los caudales de extracción y la frecuencia de uso. Con esa información, junto con las fechas de construcción de las captaciones, se generó un historial de caudales de bombeo mensuales, para las zonas ubicadas bajo la red de canales de riego (zonas regables con aguas superficiales, gravitacionalmente) y para las áreas ubicadas sobre los canales (riego con elevación). Los caudales fueron calculados hasta diciembre de 2012.

Extrapolando linealmente esos datos, según la variación entre 2008 y 2011, se extendieron los caudales hasta diciembre de 2018.

Con estos resultados se cuenta con una estimación del agua de origen subterráneo, usada en riego, para todo el período histórico.

4.3.3 Infiltración de agua de riego

Para cuantificar qué parte del agua usada en riego, potencialmente podría infiltrar hacia los medios subterráneos, se usó la información del Censo Agropecuario de 2007

Para calcular las eficiencias de riego en las cuencas estudiadas, se adoptó en las zonas bajo canal, una eficiencia promedio, según la ponderación de áreas destinadas a distintos cultivos. Para las zonas regadas sólo con agua subterránea (zonas sobre canal), se usó una eficiencia promedio ponderada sólo por las áreas asociadas a riego tecnificado.

Para la variación del porcentaje de infiltración de la recarga por riego a través del tiempo, se ha supuesto que el cambio mayor de sistemas de riego tradicionales a tecnificados, se produjo en la década de los ochentas, debido al apogeo de los frutales.

4.4 RECARGA TOTAL

En los puntos anteriores, se expuso la metodología para calcular las recargas potenciales provenientes de las precipitaciones y del riego. La suma de los resultados anteriores constituye la recarga total potencial del sistema. Operando el modelo numérico se estimó la recarga efectiva o real.

³ Mejoramiento de agua subterránea para riego Ligua y Petorca, modelos de flujo subterráneo, octubre 2013, GCF Ingenieros para CNR.

CAPÍTULO 5

MODELO NUMÉRICO

5.1 CÓDIGO NUMÉRICO

El modelo fue elaborado con el programa Groundwater Vistas, Versión 7.24, Build 15. Entre las alternativas de mallas no estructuradas, se seleccionó la opción Quadtree Refinement, que permite reducir las dimensiones de las celdas según niveles, dividiendo por múltiplos de 2.

Las elecciones del programa y del tipo de malla, se basaron en la necesidad de modelar el área de interés de forma íntegra, además de poder representar los cauces superficiales y las áreas más explotadas (mayor densidad de captaciones de agua subterránea), con un nivel de discretización fino.

5.2 LÍMITES Y GEOMETRÍA

La zona de flujo, o de dominio activo en el modelo numérico, se definió seleccionando las cuencas de los ríos La Ligua y Petorca.

Para la generación del nivel de terreno, se usaron las elevaciones del ráster ASTER⁴.

La malla construida incluye 6 niveles para las dimensiones de celdas, con tamaños entre 640 m y 20 m.

La red de drenaje quedó representada con celdas de 40·40 m y 20·20 m. Para las áreas más explotadas, es decir, en aquellas zonas con mayor densidad de captaciones de agua subterránea (pozos, norias, drenes, etc.), se usaron sólo celdas de 20·20 m.

El modelo está compuesto por 2 capas. La primera capa permitió representar los rellenos sedimentarios existentes en el área de estudio. La segunda capa, se usó para modelar las unidades de roca sobre las cuales se han depositados las unidades cuaternarias.

5.3 CONDICIONES DE BORDE

5.3.1 Representación de cauces naturales

Se redefinió la variación temporal y espacial de las celdas del tipo río (river b. c.), usando como información base, los datos generados en el análisis hidrológico, particularmente los datos fluviométricos recopilados hasta diciembre de 2018. De esa forma se aseguró que los cauces superficiales constituyan condiciones de borde realistas (río-napa o napa-río), según la escorrentía superficial que se generó a nivel mensual durante el período histórico, la que varía desde: el cauce totalmente seco hasta las crecidas pluviales de invierno.

La red de drenaje, compuesta por los cauces principales de las cuencas estudiadas, fue analizada por tramos, abarcando un total de 24 tramos de cauces.

⁴ La grilla ASTER o ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) corresponde a un reticulado de 29.11·29.11 m, con un dato de elevación en cada centro de celda.

La existencia de escorrentía superficial en el tiempo se modeló con el parámetro de conductancia asociado a cada celda río.

5.3.2 Representación del mar

El borde costero se representó usando celdas de nivel constante, con elevación 0 msnm.

5.3.3 Afloramientos

Los afloramientos se modelaron con celdas dren y se incorporaron en las zonas bajas del relleno sedimentario en torno a los cauces principales.

5.4 BOMBEO EN EL TIEMPO

5.4.1 Datos obtenidos de catastros

Los datos del bombeo de agua subterránea fueron obtenidos del catastro realizado en el año 2013.

Los datos de explotación de agua subterránea se obtuvieron de encuestas realizadas en terreno de las captaciones existentes en el área. (pozos profundos, norias, punteras, drenes y zanjas, además de captaciones mixtas, tales como norias-drenes).

El proceso efectuado, permitió generar reglas de extracción mensuales para 1136 captaciones en la cuenca del río Petorca y 1050, en la cuenca del río La Ligua.

5.4.2 Datos obtenidos de derechos

Por otro lado, se analizaron los datos de derechos de aguas subterráneas del área de estudio, de la DGA.

Hay información de 4073 expedientes (14189 l/s). en que 144 captaciones no tienen coordenadas (650 l/s).

Se obtuvieron los caudales asociados a cada expediente. De esa forma, se llegó a un total de 2725 derechos otorgados (11109 l/s). De éstos, 1253 derechos se ubican en la cuenca del río La Ligua (6344 l/s) y 1472, en Petorca (4766 l/s).

5.4.3 Correlación de catastro con derechos

Se correlacionaron los caudales de bombeo promedios anuales, obtenidos del catastro del estudio anterior, con los caudales promedios otorgados, acumulados cada año y con dicha correlación, se extendieron los bombeos del catastro hasta diciembre de 2018.

Luego, se escalaron los caudales promedios de derechos otorgados, acumulados para cada mes, del período comprendido entre enero de 1979 y diciembre de 2018, usando los caudales de bombeo estimados con los datos del catastro de 2013.

Los resultados obtenidos, se pueden interpretar como los bombeos efectivos, desde las captaciones con derechos otorgados.

5.5 CONSTRUCCIÓN DE MALLA DE DIFERENCIAS FINITAS

Se construyó el modelo, desarrollado con el programa Groundwater Vistas con Modflow-USG, que incluye los mismos elementos que modelos anteriores, pero con algunas ventajas operativas, frente a Visual Modflow.

5.6 RECARGAS EFECTIVAS

Las recargas potenciales provenientes de las precipitaciones y el riego fueron incorporadas al modelo y se redujeron gradualmente, de forma iterativa, hasta verificar que los afloramientos sólo ocurren en los cauces principales.

El proceso de ajuste comenzó con un caudal de recarga total de 2187 l/s y se llegó a un caudal de recarga de 1701 l/s. En promedio la recarga total estimada para la zona de estudio corresponde a un 4.4 % de las precipitaciones.

5.7 NIVELES MEDIDOS

Se cuenta con los datos de niveles medidos de agua subterránea en los 38 pozos de la red de monitoreo de la DGA, Se definieron los niveles adoptados para el estado inicial del sistema, como la superficie freática promedio para el período 1950-1979. Con esos niveles, se efectuó la calibración en régimen permanente del modelo numérico.

5.8 CALIBRACIÓN PERMANENTE

Se calibraron las permeabilidades del modelo, usando 36 puntos de control, alcanzándose un RMS de 0.23%.

5.9 CALIBRACIÓN IMPERMANENTE

Se operó el modelo para el período comprendido entre enero de 1979 y diciembre de 2018. Se incorporó recarga variable mensualmente y celdas río con conductancias variables espacial y temporalmente (a nivel mensual).

5.9.1 Bombeos en el tiempo

Se ingresaron 2725 captaciones al modelo, con los caudales de extracción estimados, lo que originó descensos de niveles locales, que hacen infactibles algunos bombeos, desde ciertos puntos y períodos. El paquete CLN permitió que los caudales de bombeo se fueran reduciendo, hasta alcanzar una condición realista en que su rendimiento va disminuyendo.

5.9.2 Niveles simulados

Los resultados de niveles simulados en algunos de los puntos de la red de monitoreo de la DGA, indican un razonable ajuste con los niveles observados.

5.10 RESULTADOS ESCENARIO HISTÓRICO

Se efectuaron balances hídricos a nivel global y para cada uno de los 12 sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común, generándose gráficos de cada componente del flujo subterráneo, obtenidos de la modelación.

5.11 PERMEABILIDADES Y ALMACENAMIENTOS TRAS CALIBRACIONES

Se modificaron los valores y las distribuciones de permeabilidades y almacenamientos, para mejorar el ajuste entre niveles medidos y simulados, con el modelo histórico transiente, para la capa superior y la inferior.

De igual manera se ajustaron las distribuciones de coeficientes de almacenamiento.

CAPÍTULO 6 OPERACIÓN PREDICTIVA DEL MODELO

6.1 PERÍODO SIMULADO

Se operó el modelo para escenarios futuros, el intervalo de tiempo considerado para el período de simulación futuro, se muestra en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Períodos simulados

Período histórico (calibración transiente)			Período futuro (escenarios de operación)		
40 años			40 años		
Desde		Hasta	Desde		Hasta
01 ene 1979		31 dic 2018	01 ene 2019		31 dic 2058

6.2 CONDICIÓN INICIAL SIMULACIÓN FUTURA

Los escenarios futuros parten con la distribución de niveles obtenida de la simulación histórica transiente, del día 31 de diciembre de 2018.

6.3 HIDROLOGÍA FUTURA

6.3.1 Recargas distribuidas en simulación futura

Se utilizó la distribución de recargas generadas para el período histórico (1979-2018), pero corregidas, según una estimación de la variación de las precipitaciones futuras, por efecto del cambio climático.

6.3.2 Celdas río en simulación futura

El estado de los cauces superficiales, para la operación del modelo, se representó como un estado promedio de los últimos 10 años (2009-2018), período de años muy secos. De esa forma, los cauces superficiales se modelaron de forma conservadora.

6.3.3 Extracciones futuras

Tras operar el modelo en régimen transiente, para el período histórico (1979-2018), se obtuvo como resultado, el bombeo que es factible extraer. El nivel de extracción máxima al que se pudo llegar (como promedio mensual), al final de la simulación histórica (año 2018), de acuerdo a los parámetros incorporados en el modelo, alcanza a un 48% del caudal de derechos otorgados. Si se considera el caudal promedio anual del año 2018, éste corresponde a un 25% del caudal de derechos otorgados.

Para el escenario de operación futuro, se ingresaron al modelo, los caudales mensuales del año 2018, impuestos inicialmente en el modelo histórico.

6.4 RESULTADOS SIMULACIÓN FUTURA

En la Tabla 6-2 se presentan los resultados promedios de los bombeos obtenidos tras operar el modelo de flujo subterráneo, para cada uno de los 12 sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC). Los caudales factibles de ser extraídos, fueron comparados con los caudales de derechos otorgados. Si se consideran los bombeos en términos volumétricos (caudal promedio), los derechos deberían restringirse a aproximadamente un quinto de los caudales actuales otorgados. Por otro lado, si se usa como referencia el caudal máximo factible, la reducción se acerca a la mitad de los caudales otorgados.

La restricción según los caudales de extracción factibles promedio, resulta independiente de los posibles cambios de uso de las captaciones. La reducción basada en el caudal máximo factible, en cambio, está ligada al uso y sería efectiva si se mantiene la distribución temporal dada por los caudales mensuales obtenidos tras operar el modelo.

Tabla 6-2. Bombeos factibles resultantes de la operación del modelo

Zona N°	Cuenca	S.H.A.C.	Caudales [l/s]			Porcentajes con respecto al caudal de derechos otorgados [%]	
			Q^{der}	$[Q^{fac}]_{prom}$	$[Q^{fac}]_{max}$	$[P^{cr der}]_{prom}$	$[P^{cr der}]_{max}$
1	Río Petorca	Río del Sobrante	130	30	66	23.3 %	51 %
2	Río Petorca	Río Pedernal	227	70	161	31 %	71.1 %
3	Río Petorca	Río Petorca oriente	1673	324	651	19.4 %	38.9 %
4	Río Petorca	Estero Las Palmas	316	87	199	27.6 %	63 %
5	Río Petorca	Río Petorca poniente	2733	497	1010	18.2 %	36.9 %
Total cuenca río Petorca			5080	1009	2088	19.9 %	41.1 %
6	Río La Ligua	Estero Alicahue	86	11	21	13.3 %	24.5 %
7	Río La Ligua	Río La Ligua oriente	1825	501	895	27.5 %	49 %
8	Río La Ligua	Estero de Los Ángeles	926	332	619	35.8 %	66.8 %
9	Río La Ligua	Río La Ligua Cabildo	2068	417	699	20.2 %	33.8 %
10	Río La Ligua	Estero de La Patagua	152	51	96	33.2 %	62.8 %
11	Río La Ligua	Río La Ligua pueblo	1587	528	956	33.3 %	60.2 %
12	Río La Ligua	Río La Ligua costa	268	34	57	12.6 %	21.2 %
Total cuenca río La Ligua			6912	1873	3341	27.1 %	48.3 %
Total cuenca río Petorca y cuenca río La Ligua			11991	2882	5429	24 %	45.3 %

Nomenclatura:

S.H.A.C.: Sector hidrogeológico de aprovechamiento común

Q^{der} : Caudal de derechos otorgados en sector

$[Q^{fac}]_{prom}$: Caudal promedio que es posible (factible) extraer por sector, según operación de modelo de flujo subterráneo

$[Q^{fac}]_{max}$: Caudal máximo (como promedio mensual) que es posible (factible) extraer por sector, según operación de modelo de flujo subterráneo

$[P^{cr der}]_{prom}$: Porcentaje al que se debería reducir el caudal de derecho otorgado, para limitar la extracción al caudal promedio factible ($[Q^{fac}]_{prom}$)

$[P^{cr der}]_{max}$: Porcentaje al que se debería reducir el caudal de derecho otorgado, para limitar la extracción al caudal máximo factible ($[Q^{fac}]_{max}$)

Criterios de sustentabilidad DGA

Criterio 1: Descensos sustentables en el tiempo a nivel de sector acuífero.

De los resultados obtenidos, se deduce que el criterio para acuífero abierto, al considerar el dominio activo (ambas cuencas), se superó en 30 años (1979-2008, reducción del 6.7%) y el de acuífero cerrado, se excede largamente, en todos los períodos posteriores, tanto histórico (2009-2018), como futuros (2019-2059). A nivel de SHACs, el 5% se supera en el período histórico (menos de 40 años), excepto en el sector Ligua costa, en el que ocurre en 50 años.

Criterio 2: Interferencia río acuífero.

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. La afección sobre el cauce superficial se define como ΔQ , término compuesto por dos variables:

- a) Aumento de infiltración en el sector acuífero debido al aumento de la explotación.
- b) Disminución de los afloramientos del río.

$$\Delta Q \leq 10\% \cdot Q_{\text{Anual}, 85\%}$$

Para el dominio activo y en todos los SHACs, es posible inferir que, el sistema ha tenido un gran cambio en el flujo río-napa. Las recuperaciones del estado sin explotación (régimen permanente), se han reducido, o incluso se ha invertido el flujo, pasando de recuperaciones a una predominancia de infiltraciones (aportes del río a la napa). Los descensos que se han producido en los niveles, han liberado espacio (volumen de almacenamiento libre), para admitir un mayor aporte río-napa, pero sólo si existe flujo superficial. Debido a que en los últimos años, la escorrentía superficial ha sido mermada, los aportes río-napa están limitados a esa disponibilidad, representada en el modelo de flujo subterráneo con conductividades variables mensualmente.

Criterio 3: Satisfacción de la demanda.

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

$$Q_{\text{Oferta}} > 95\% Q_{\text{Demanda}}$$

Se concluye que actualmente, sólo es posible extraer 24% de los derechos y 60 % de la demanda estimada (según la metodología expuesta en el punto 5.4). Por lo tanto, el sistema se encuentra bastante por abajo del umbral establecido para la extracción, según el tercer criterio DGA.

Criterio 4: Pozos secos.

En cada sector hidrogeológico no debe haber más de un 5% de pozos desconectados o colgados. En caso contrario el sector quedará cerrado. Esta condición apunta a respetar derechos de terceros sin importar la cantidad que extraiga cada pozo.

$$N_{\text{POZOS SECOS}}/N_{\text{TOTAL POZOS}} < 5\%$$

El modelo elaborado en el presente trabajo, fue desarrollado con Modflow-USG, que permite abordar este problema de forma iterativa, reduciendo los caudales de los bombeos, sin secar celdas.

Criterio 5: Afección a sectores abiertos.

Verificar que el aumento de extracciones desde un sector no afecte la disponibilidad sustentable desde otro sector aguas abajo. 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.

En el sistema estudiado, cada sector está sobre explotado, en distintos niveles, por lo que los efectos de la extracción de un sector afectan al mismo sector y, además, se producen efectos sinérgicos. No obstante, el sistema La Ligua-Petorca, está cerrado, por lo que no aplica el criterio de que algún sector abierto afecte a otro sector abierto o cerrado.

CAPÍTULO 7

SUGERENCIAS DE TRABAJOS A FUTURO

Las extracciones, tanto actuales como históricas, son inciertas y se estimaron de forma indirecta en función de los datos de terreno obtenidos de un catastro de captaciones realizado en 2013⁵ y de la información de derechos de aguas subterráneas otorgados. Se sugiere realizar una campaña de terreno para estimar el nivel de extracción actual.

Como existen más de 2600 captaciones de agua subterránea en ambas cuencas en conjunto, sería posible realizar un catastro muestral por sectores, para definir el consumo estacional del agua subterránea, desagregado mensualmente.

Si bien la mayoría de las captaciones se usan para riego, sería de gran utilidad disponer de una base de datos de captaciones, en la que se tenga certeza del tipo de uso real de cada captación. En el marco legal, asociado al otorgamiento de derechos, esto podría estar considerado, puesto que es imprescindible para cuantificar el consumo efectivo del agua subterránea.

La recarga de los medios subterráneos depende directamente de la escorrentía superficial, por lo que es necesario contar con un modelo de flujo superficial, que incluya la red de canales (podría incluir hasta los canales secundarios), las áreas regadas y los aportes naturales provenientes de las precipitaciones. Para este trabajo se usaron los resultados de un modelo de 2004, extrapolados en función de las precipitaciones, hasta 2018. Por consiguiente, un paso natural para una mejor representación del sistema hídrico de Ligua-Petorca, sería el desarrollo de un nuevo modelo, usando alguna herramienta computacional actual (WEAP, MatLab o incluso Excel). Este modelo debería operarse integradamente con el modelo de flujo subterráneo desarrollado en el presente trabajo y permitiría definir las propiedades de las celdas río para los escenarios futuros y ajustar la parte de la recarga proveniente del riego.

Para complementar los estudios hídricos, sería de utilidad analizar cómo ha cambiado en el tiempo la calidad físico-química del agua subterránea. Parte importante de la recarga a los acuíferos, especialmente las zonas más bajas de la cuenca, proviene del aporte río-

⁵ Mejoramiento de agua subterránea para riego Ligua y Petorca, GCF-CNR, 2013.

napa. Como es sabido, los últimos 10 años, los flujos superficiales son captados mayoritariamente en las zonas más altas, por las bocatomas de canales, por lo que la escorrentía superficial, de las zonas más bajas, proviene en parte de los excedentes de riego (¿cuánto?, se podría estimar con un modelo de flujo superficial, como el sugerido previamente). Las recuperaciones de riego, pueden tener contaminación por el uso de pesticidas y fertilizantes, lo que podría estar induciendo un deterioro de la calidad del agua subterránea en el relleno directamente conectados con los ríos La Ligua y Petorca.

Con respecto a los escenarios futuros, se podría complementar el presente trabajo con un análisis de sensibilidad, variando las conductividades de las celdas río y su variación temporal, en el escenario futuro, dado que se consideró una distribución de conductividades representativa de los últimos 10 años, período en que muchos de los tramos de los cauces han pasado por prologados períodos sin escorrentía.

Complementariamente, se podría agregar un escenario con las recargas históricas, sin la corrección por cambio climático. Estas recargas son un poco mayores a las consideradas en el escenario evaluado.

Los escenarios futuros complementarios entregarían rangos para las reducciones que deberían sufrir los derechos otorgados, que se obtendrían al variar levemente la configuración del escenario futuro.

CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES

El sistema estudiado se ha sometido a una intensa explotación, sobre todo los rellenos sedimentarios asociados a los cauces de los ríos La Ligua y Petorca. La modelación realizada, para el período histórico (1979-2018), ha permitido entender cómo ha variado en el tiempo el estado del sistema y cómo se ha llegado al estado actual del mismo.

La componente más determinante en el estado de los acuíferos es la explotación del agua subterránea, la que pasó de un promedio de 421 l/s (1979-1993) a 1431 l/s (1994-2008) y posteriormente, a 2673 l/s (2009-2018).

Ese progresivo incremento de los bombeos, redujo los afloramientos y las recuperaciones en los cauces, que pasaron de un valor promedio neto de 1441 l/s de recuperaciones (1979-1993) a un flujo neto promedio en sentido inverso, de 182 l/s de infiltración desde los cauces a las napas (2009-2018).

El consumo del agua almacenada en los acuíferos ha ido aumentando sostenidamente, para poder alimentar las extracciones de agua subterránea que exceden la capacidad natural de recarga del acuífero. Los caudales de consumo neto del agua almacenada pasaron de 157 l/s (1979-1993) a 505 l/s (1994-2008) y finalmente, a 930 l/s (2009-2018).

Las recargas han aumentado en el transcurso del tiempo. Esto puede sonar paradójico, si se tiene en mente los efectos climáticos del calentamiento global. No obstante, el incremento no se debe a un aumento de las precipitaciones (que no ha ocurrido), sino a una concatenación de efectos. El aumento de la explotación ha deprimido los niveles freáticos, generando un espacio para admitir recarga. De esa forma, una mayor proporción de la recarga potencial, que no tenía cabida en el estado de equilibrio (sin extracciones), actualmente logra infiltrar hacia las zonas deprimidas de los acuíferos. Este aspecto, se aprecia claramente, al ver los gráficos de los flujos netos río-napa, que

pasan de recuperaciones (1441 l/s) a infiltraciones (182 l/s), tal como fuera ya expuesto. Las recargas totales, calculadas como las recargas por lluvia, más los excedentes de riego y sumado al aporte neto río-napa, ha variado de 1891 l/s (1979-1993), a 2221 l/s (1994-2008) y finalmente, a 2609 l/s (2009-2018).

Con relación a la simulación futura realizada, es necesario aclarar que el análisis efectuado, considera la explotación factible del agua subterránea. No se evaluó la extracción sustentable. Para ello, se debería definir previamente, qué significa explotación sustentable para un sistema acuífero que está actualmente en un estado crítico, como el estudiado.

Evidentemente, los porcentajes de reducción de derechos que se obtendrían, resultarían aún más restrictivos, si se impone la sustentabilidad del medio subterráneo, sea cual sea su definición.

Con relación a los objetivos del estudio, particularmente el objetivo de restringir el usufructo de los derechos otorgados, con un objetivo de preservación del embalse subterráneo, es necesario definir, en primer lugar, el criterio a usar, para aplicar dicha restricción.

La **extracción real** es distinta a la **demanda real** y a su vez, ambas difieren del **derecho** de explotación de agua subterránea otorgado.

Con el modelo se calculó la extracción histórica y futura factible, que es semejante o debería corresponder aproximadamente a la **extracción real**. Por otro lado, la **demanda real** no se conoce; para ello se requiere un estudio agronómico (histórico, variable en el tiempo), integrado con un modelo de flujo superficial que considere la hidrología histórica, la red de canales usados para riego y retroalimentado con los resultados del modelo de flujo subterráneo, desarrollado en el presente estudio.

Al analizar **extracción real** se debe tener en cuenta que ésta, varía en el tiempo. En el modelo desarrollado, se discretizó a nivel mensual. La **extracción real** varía mes a mes, con un valor promedio anual y un máximo mensual. Por consiguiente, aparece la disyuntiva si restringir el **derecho** según el caudal **máximo mensual** o el caudal **promedio anual**, si se elige la opción del **promedio anual**, la restricción es mucho mayor. Los resultados obtenidos, para cada cuenca son los siguientes:

Zona	Caudales [l/s]			Porcentajes con respecto a los derechos [%]	
	Q^{der}	$[Q^{fac}]_{prom}$	$[Q^{fac}]_{max}$	$[P^{cr\ der}]_{prom}$	$[P^{cr\ der}]_{max}$
Cuenca río Petorca	5080	1009	2088	19.9 %	41.1 %
Cuenca río La Ligua	6912	1873	3341	27.1 %	48.3 %
Cuencas ríos Petorca y La Ligua	11991	2882	5429	24.0 %	45.3 %
Nomenclatura: Q^{der} : Caudal de derecho otorgado $[Q^{fac}]_{prom}$: Caudal promedio factible de extraer (extracción real como promedio anual) $[Q^{fac}]_{max}$: Caudal máximo (promedio mensual) factible de extraer (extracción real como máximo mensual) $[P^{cr\ der}]_{prom}$: % al que se debe reducir el derecho, para limitar la extracción a la extracción real , como promedio anual ($[Q^{fac}]_{prom}$) $[P^{cr\ der}]_{max}$: % al que se debe reducir el derecho, para limitar la extracción a la extracción real , como máximo mensual ($[Q^{fac}]_{max}$)					

Como es posible inferir de los resultados obtenidos, la restricción de los derechos, para ser aplicable, requiere una gran cantidad de información e infraestructura, que actualmente no existe. En primer lugar, la identificación de todas las captaciones, con coordenadas, caudales de extracción iniciales (prueba de bombeo de construcción), caudales de extracción actuales y situación legal (derecho otorgado, sí o no, fechas). Además, se debe cuantificar, de alguna forma (encuestas, modelos u otro), la demanda real.

Para el control de los caudales, se necesitan flujómetros y para el control de niveles freáticos, se requiere de medidores continuos o, a lo menos, la habilitación de líneas de aire. Si se considera que en el área estudiada existen del orden de 3000 captaciones de agua subterránea, los montos de inversión en equipos son muy grandes, incluso si se les solicita esto a los propios usuarios. La labor de fiscalización, si algo de esto se llevara a cabo, también resultaría logísticamente muy dificultosa.